

Caractérisation des propriétés du mycélium de *Pleurotus  
ostreatus* comme liant de fibres végétales pour un matériau  
isolant

par

Valérie GRENON

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE  
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE  
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT  
M.Sc.A

MONTRÉAL, LE 9 NOVEMBRE 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Valérie Grenon, 2023



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.



**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Wahid Maref, directeur du mémoire  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Claudiane M. Ouellet-Plamondon, codirectrice  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. François Duhaime, président du jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Sophie Lerouge, membre du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 17 JUILLET 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## **AVANT-PROPOS**

Ce projet s'inscrit dans une démarche exploratoire du potentiel d'utilisation du mycélium comme liant de résidus végétaux en vue de produire des panneaux d'isolant thermique concurrentiels dans l'industrie de la construction. Les propriétés liantes du mycélium sont de plus en plus utilisées dans l'industrie artistique et pour la production d'emballages écoresponsables. Ce projet n'est pas une démarche d'optimisation du processus de culture du mycélium ni de comparaison de différentes souches. L'immuabilité du matériau au fil du temps et des saisons n'est pas étudiée dans le cadre de ce projet.



## REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur de recherche, Wahid Maref, ainsi que ma codirectrice de recherche, Claudiane Ouellet-Plamondon, d'avoir cru en mon projet un peu hors norme et d'être embarqués sans hésitation! Ce projet a été rendu possible grâce à la participation de diverses entreprises par l'entremise de dons de matériel. Il est entre autres question de à la ville de Montréal pour les copeaux de frêne, Biopterre pour la souche de mycélium de *Pleurotus ostreatus*, mes collègues des laboratoires de l'hôpital Santa-Cabrini pour les moules de culture et Natures Fibres pour les panneaux de laine de chanvre ainsi que l'entente PARI-CNRC qui en a découlé. Je remercie aussi le Conseil de recherches en science et en génie du Canada (CRSNG), les Fonds de recherche du Québec – Nature et technologie (FRQNT), Hydro-Québec, la Fondation Molson et la Chaire de recherche du Canada sur les matériaux de construction multifonctionnels durables pour le soutien financier accordé. Le projet a pu être mené à terme grâce aux départements de génie de la construction et de génie mécanique de l'ÉTS pour l'accès aux installations ainsi qu'aux nombreuses personnes qui m'ont accompagné dans la réalisation des essais. Je pense, entre autres, à Aguerata Kabore, Marielle Jacques, Mathieu Bendouma, Serge Plamondon, Simon Laflamme et Victor Brial. Finalement, je tiens à remercier Frédérique Rivet pour les nombreuses relectures et Arielle Milot pour les conseils de culture.



## **Caractérisation des propriétés isolantes du mycélium de *Pleurotus ostreatus* comparativement à la laine de verre et la laine de chanvre**

Valérie GRENON

### **RÉSUMÉ**

La réduction des déchets générés par l'industrie de la construction est un enjeu de société. Ce projet exploratoire consiste à développer un matériau composé de fibres végétales, soit les copeaux de frêne, liées par le mycélium de *Pleurotus ostreatus* et de caractériser ses propriétés isolantes comparativement à la laine de verre et la laine de chanvre. Le développement du protocole de culture est basé sur la littérature, mais adapté aux difficultés rencontrées au laboratoire tandis que les méthodes relatives à chacun des essais de caractérisation reposent majoritairement sur des protocoles certifiés par des normes. L'hypothèse soutenue est un comportement du mycélium similaire à la laine de chanvre qui est aussi un matériau isolant biosourcé. Les trois matériaux sont comparés au niveau de la conductivité thermique, la transmission et l'absorption du son, la résistance à la compression, la porosité et la densité. Tous possèdent une faible conductivité thermique caractéristique des isolants, une importante porosité en raison du réseau complexe qui les forme et des propriétés acoustiques intéressantes. En revanche, la densité et la résistance à la compression du matériau à base de mycélium sont plus élevées en raison du type de fibres végétales choisies. Les fibres végétales liées par le mycélium possèdent donc un potentiel d'utilisation comme isolant thermique totalement compostable à la fin de sa vie utile. Le processus de culture ainsi que les espèces choisies doivent être optimisés avant d'envisager une utilisation à grande échelle.

**Mots-clés :** Mycélium, *Pleurotus ostreatus*, Isolant thermique, Économie circulaire, Matériau





# **Characterization of *Pleurotus Ostreatus* Mycelium Insulation Compared to Hemp Wool and Glass Wool insulation**

Valérie GRENON

## **ABSTRACT**

The reduction of waste generated by the construction industry is a social issue. The exploratory project consists of developing a material composed of plant fibres, i.e., ash chips, bound by the mycelium of *Pleurotus ostreatus* and to characterize its insulating properties compared to glass wool and hemp wool. The development of the culture protocol is based on the literature, but adapted to the difficulties encountered in the laboratory, while the methods related to each of the characterization tests are mostly based on protocols certified by standards. The hypothesis supported is that the mycelium has a similar behaviour than hemp wool which is also a biobased insulating material. The three materials are compared in terms of thermal conductivity, sound transmission and absorption, compressive strength, porosity, and density. They all have a low thermal conductivity characteristic of insulators, a significant porosity due to the complex network that forms them and interesting acoustic properties. On the other hand, the density and compressive strength of the mycelium-based material are higher due to the type of plant fibres chosen. Mycelium-bound plant fibres therefore have the potential to be used as thermal insulation that is fully compostable at the end of its useful life. The cultivation process as well as the species chosen must be optimized before large-scale use can be considered.

**Keywords:** Mycelium, *Pleurotus ostreatus*, Thermal insulation, Circular economy, Material



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE .....	3
1.1 Classification des mycètes .....	4
1.2 Morphologie des mycètes .....	8
1.3 Cycle de vie des mycètes .....	10
1.4 Le cycle de l'azote .....	12
1.5 Applications des mycètes.....	14
1.5.1 Environnementale .....	14
1.5.2 Agroalimentaire .....	15
1.5.3 Médicale.....	16
1.5.4 Les mycorhizes .....	17
1.5.5 L'industrie.....	20
1.6 Les propriétés des mycètes .....	21
1.7 <i>Pleurotus ostreatus</i> .....	22
1.8 Brevets sur les produits à base de mycélium .....	24
1.9 Caractérisation des matériaux .....	25
1.9.1 Calorimétrie isotherme.....	25
1.9.2 Conductivité thermique.....	26
1.9.3 Résistance à la compression.....	28
1.9.4 Transmission et absorption du son.....	29
1.9.5 Inflammabilité/classement au feu .....	30
1.9.6 Déphasage thermique.....	31
1.9.7 Capacité thermique .....	31
1.9.8 Mesure de la porosité .....	32
1.9.9 La densité.....	34
1.9.10 Microscopie.....	35
1.9.11 Spectrométrie FTIR.....	36
1.9.12 Analyse thermogravimétrique.....	38
1.10 Substrat de croissance .....	39
1.11 Laine de verre .....	41
1.12 Laine de chanvre.....	42
CHAPITRE 2 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE ET MÉTHODOLOGIE .....	45
2.1 Croissance du mycélium de <i>Pleurotus ostreatus</i> .....	45
2.2 Caractérisation du mycélium de <i>Pleurotus ostreatus</i> .....	47
CHAPITRE 3 Multi property characterization of an experimental material composed of <i>Pleurotus ostreatus</i> mycelium and ash wood chips compared with glass wool and hemp wool.....	55
3.1 Introduction.....	56

3.2	Material and methods.....	58
3.2.1	Mycelium growth.....	59
3.2.2	Materials characterization.....	61
3.3	Results and discussion.....	66
3.3.1	Compression strength resistance.....	66
3.3.2	Thermal conductivity and effusivity.....	67
3.3.3	Specific heat capacity.....	69
3.3.4	True density.....	70
3.3.5	Porosity.....	71
3.3.6	Acoustic properties.....	72
3.3.7	Microscopy.....	74
3.4	Conclusions.....	75
3.5	Acknowledgements.....	76
CHAPITRE 4 RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES ET DISCUSSION.....		77
4.1	Calorimétrie isotherme.....	77
4.2	Microscopie optique.....	81
4.3	Microscopie électronique à balayage.....	83
4.4	Spectrométrie FTIR.....	85
4.5	Analyse thermogravimétrique.....	87
CONCLUSION.....		91
RECOMMANDATIONS.....		93
ANNEXE I CROISSANCE DE <i>PLEUROTUS OSTREATUS</i> DOCUMENTÉE EN IMAGES.....		95
ANNEXE II SCHÉMA DU PROTOCOLE DE CROISSANCE DE <i>PLEUROTUS OSTREATUS</i> .....		99
ANNEXE III CROISSANCE FONGIQUE DANS LE TAM AIR.....		105
APPENDICE A COMPLÉMENT DE DONNÉES POUR LE CALCUL DE LA POSOSITÉ.....		107
APPENDICE B COMPLÉMENT DE DONNÉES POUR LA TRANSMISSION DU SON.....		111
APPENDICE C COMPLÉMENT DE DONNÉES POUR L'ABSORPTION DU SON.....		113
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		115

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1: Mean compressive strength of the samples .....	66
Tableau 3.2: Heat resistance of different experimental materials.....	69
Tableau 3.3: Specific heat capacity of different experimental materials (Equation 3).....	70
Tableau 3.4: Proportion of pore void volume to real surface volume of the material .....	72
Tableau 3.5: Sound absorption coefficient $\alpha$ of different materials as a function of frequency .....	73
Tableau 4.1 Groupements fonctionnels présents dans chacun des composés .....	87



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Évolution sommaire des embranchements de Fungi .....	5
Figure 1.2 Classification simplifiée de <i>Pleurotus ostreatus</i> .....	7
Figure 1.3 Ronds de sorcières, Vignoble du Marathonien, Havelock, Canada .....	9
Figure 1.4 Illustration libre des différents types de basides.....	11
Figure 1.5 La reproduction chez les Agaricomycotina.....	12
Figure 1.6 Prépondérance des divers types de mycorhizes chez les plantes .....	20
Figure 1.7 Apparence de <i>Pleurotus ostreatus</i> sur gélose Sabouraud-chloramphénicol .....	24
Figure 1.8 Appareil TAM Air 8-channels.....	26
Figure 1.9 Appareil C-Therm Trident.....	28
Figure 1.10 Schéma du montage utilisé pour la prise de données d'acoustique.....	30
Figure 1.11 Différents types de microscopes a) Optique et b) Microscope électronique à balayage (MEB) .....	36
Figure 1.12 Appareil de spectrométrie FTIR.....	37
Figure 1.13 Appareil thermogravimétrique .....	39
Figure 1.14 Substrats de croissance utilisés a) Copeaux de frêne b) Grains de seigle .....	41
Figure 1.15 Laine de verre utilisée pour les essais de caractérisation .....	42
Figure 1.16 Panneau de laine de chanvre 3 ½ po.....	43
Figure 2.1 Échantillons obtenus pour a) copeaux fins et b) copeaux moyens.....	47
Figure 2.2 Schéma du montage utilisé lors de la prise de la conductivité thermique pour le matériau expérimental à base de mycélium à l'aide du capteur MTPS de l'appareil C-Therm.....	48
Figure 2.3 Schéma du montage pour la compression du matériau à base de mycélium sur l'appareil MTS Alliance RF/200.....	49
Figure 2.4 Appareil Ultrapyc 5000 utilisé pour la mesure du volume réel et de la densité des trois isolants à l'étude.....	50

Figure 2.5 Système utilisé pour la mise à vide des échantillons d'isolant afin de déterminer le volume des pores.....	51
Figure 2.6 Schéma de montage dans les tubes à impédance des échantillons de a) Laine de chanvre, b) Laine de verre et c) Mycélium fin.....	52
Figure 2.7 Échantillon de mycélium de <i>Pleurotus ostreatus</i> en contact avec le cristal du FTIR.....	53
Figure 3.1 Beginning of colonization of <i>Pleurotus ostreatus</i> mycelium on ash chips.....	60
Figure 3.2 Shape of a mold: a) empty, b) full.....	60
Figure 3.3 Final material obtained for: a) Thin mycelium, and b) Medium mycelium.....	61
Figure 3.4 Thermal conductivity measurement set-up: a) perpendicular to fiber direction and b) in the direction of the fiber.....	63
Figure 3.5 Thermal conductivity measure with MTPS sensor at room temperature a) perpendicular to fibers, and b) parallel to fibers.....	67
Figure 3.6 Thermal effusivity measure with MTPS sensor at room temperature a) perpendicular to fibers and b) parallel to fibers.....	68
Figure 3.7 Average volumetric mass measured with a gas pycnometer.....	71
Figure 3.8 Impedance tubes stuffed with the insulation materials tested a) Hemp wool, b) Glass wool and c) Thin mycelium.....	73
Figure 3.9 Glass wool in a) optic microscopy and b) SEM.....	74
Figure 3.10 Hemp wool in a) optic microscopy and b) SEM.....	75
Figure 3.11 Mycelium in a) optic microscopy and b) SEM.....	75
Figure 4.1 Chaleur totale dégagée par la croissance du mycélium de <i>Pleurotus ostreatus</i> sur copeaux de frêne à diverses températures de croissance.....	78
Figure 4.2 Flux de chaleur produit par la croissance du mycélium de <i>Pleurotus ostreatus</i> sur copeaux de frêne à diverses températures de croissance.....	78
Figure 4.3 Observation de la laine de verre au microscope optique à a) 10 X et b) 100 X....	81
Figure 4.4 Observation de la laine de chanvre au microscope optique à a) 10 X et b) 100 X 81	81
Figure 4.5 Observation d'un copeau de frêne colonisé par le mycélium de <i>Pleurotus ostreatus</i> au microscope optique à a) 10 X et b) 40 X.....	82



Figure 4.6 Laine de chanvre par microscopie électronique à balayage à a) 50 $\mu\text{m}$ b) 100 $\mu\text{m}$ .....	83
Figure 4.7 Laine de verre par microscopie électronique à balayage à a) 30 $\mu\text{m}$ b) 200 $\mu\text{m}$ ....	83
Figure 4.8 Mycélium par microscopie électronique à balayage à a) 50 $\mu\text{m}$ b) 100 $\mu\text{m}$ .....	84
Figure 4.9 Spectre FTIR pour le bois de frêne.....	85
Figure 4.10 Spectre FTIR pour le mycélium de <i>Pleurotus ostreatus</i> .....	86
Figure 4.11 ATG de copeaux de frêne vierge.....	88
Figure 4.12 ATG du mycélium de <i>Pleurotus ostreatus</i> .....	88
Figure 4.13 ATG de copeaux de frêne colonisés par le mycélium de <i>Pleurotus ostreatus</i> .....	89



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADN	Acide désoxyribonucléique
ATD	Analyse thermique différentielle
ATG	Analyse thermogravimétrique
ATR	Réflexion totale atténuée
BPC	Biphényles polychlorés
CCD	Charge Coupled Device
CCTT	Centre Collégial de Transfert de Technologie
COP 26	26 <sup>e</sup> Conférence des parties
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
DSC	Calorimétrie différentielle à balayage
FTIR	Fourier Transform InfraRed (Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier)
GES	Gaz à effet de serre
IRM	Imagerie par résonance magnétique
ITS	Indice de transmission du son
MEB	Microscope électronique à balayage
MS	Mass spectrometer (Spectromètre de masse)
MTPS	Modified Transient Plane Source (Source du plan transitoire modifié)
PBDE	Polybromodiphényles éthers
UL Canada	Underwriters Laboratories of Canada
UV	Ultra-violet



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

°C	Celsius
cm	Centimètres
cm <sup>2</sup>	Centimètres carrés
cm <sup>3</sup>	Centimètres cubes
dB	Décibel
g	Gramme
g/cm <sup>3</sup>	Densité/masse volumique
h	Heure
Hz	Hertz
J	Joule
J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	Joules par kilogramme kelvin
J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>	Joules par mole kelvin
K	Kelvin
KPa	Kilo Pascals
MPa	Méga Pascals
min	Minute
mL	Millilitre
mm	Millimètre
mW	Milliwatts
N	Newton
pi	Pied
po	Pouce
PSI	pound per square inch (livre par pouce carré)
s	seconde
μL	Microlitre
μM	Micromètre
W	Watt
W/mK	Conductivité thermique (λ)
W/m <sup>2</sup> K	Résistance thermique

$W_s^{1/2}/K_m^2$

Effusivité thermique

## INTRODUCTION

Voilà maintenant quelques années que l'objectif de maintenir le réchauffement climatique sous la barre des 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle a été énoncé lors de l'Accord de Paris (COP 21) qui a été ratifié en 2016 (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2022). En revanche, les probabilités de réussir à atteindre cet objectif fondent comme neige au soleil. C'est une des conclusions à laquelle la conférence de Glasgow (COP26) est arrivée. En effet, pour respecter le seuil de 2°C d'augmentation moyenne des températures mondiales d'ici 2100 par rapport aux températures de l'ère préindustrielle, il faudrait réduire de plus de 80% les émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau national et donc complètement revoir notre mode de vie actuel dans un délai des plus restreints (Liu *et al*, 2021). Une des solutions partielles à ce problème serait d'appliquer les principes de l'économie circulaire. Celle-ci est définie par le gouvernement du Canada comme un mode de production où « les déchets [sont considérés] comme une ressource et non comme un coût » dans laquelle on « préserve et récupère le plus de valeur possible des ressources en réutilisant, réparant, reconditionnant, refabriquant, convertissant ou recyclant des produits et matériaux » (Gouvernement du Canada, 2022). Une autre des solutions partielles serait d'utiliser des produits et des matériaux provenant de l'économie circulaire qui ont un faible indice carbone et qui sont entièrement biodégradables, permettant ainsi à notre industrie d'avoir une faible empreinte écologique.

Prenons pour exemple une des industries majeures au Québec présentement, l'industrie de la construction. Un emploi sur 20 est rattaché de près ou de loin à cette industrie qui est en croissance depuis les dernières années (Commission de la construction du Québec, 2022) et ce n'est pas une des industries les plus propres. En effet, celle-ci génère beaucoup de transport de matériaux et de véhicules en plus de générer beaucoup de pollution lors de la production de matériaux comme l'aluminium, le ciment, les isolants et la transformation du bois (Blais *et al*, 2021). Aussi, la quantité de déchets générés par l'industrie de la construction représente jusqu'à 60% de ce qui se retrouve à l'enfouissement au Royaume-Uni (Dobrowolska, 2021). En raison de la précarité alimentaire qui guette la planète, la venue de l'utilisation d'un matériau bio-sourcé ne doit pas se faire aux dépens de l'alimentation humaine. Un exemple est l'utilisation de champs pour la culture de maïs destiné à la production de biodiésel alors qu'un

dixième de la population mondiale souffre de sous-alimentation en 2020 (Organisation mondiale de la Santé, 2021). À l’opposé, il y a l’entreprise Ecovative, basée dans l’état de New York, qui a développé des matériaux d’emballage à base de mycélium. En effet, les champignons sont des organismes ayant des conditions de croissance peu exigeantes et dont le potentiel tarde à être mis en valeur. Les emballages qu’Ecovative crée sont légers, ont une bonne résistance thermique et sont complètement biodégradables en 45 à 180 jours (Ecovative, 2022). Les champignons peuvent pousser dans des espaces restreints et avec peu de lumière ce qui fait en sorte ils ne monopolisent pas des champs entiers pour leur culture (Chevallier, 2016). C’est le cas des champignons de Paris qui étaient originalement cultivés dans les catacombes de la ville du même nom jusqu’à la venue du métro en 1895.

Beaucoup d’études témoignent des propriétés isolantes du mycélium de champignon qui permettrait de confectionner un biomatériau qui pourrait, de surcroît, être utilisé au sein de l’industrie de la construction (Xing *et al*, 2018). Les champignons étant des organismes saprotrophes, leur substrat idéal est de la matière organique. La revalorisation des résidus végétaux provenant de l’agriculture qui se retrouve habituellement au compostage rentre dans le principe de l’économie circulaire. Ceci fait du mycélium de champignon un biomatériau qui semble prometteur. En revanche, son potentiel isolant devra être comparée à des matériaux « traditionnels » à base de laine de verre et de laine de chanvre.

Cette étude vise le développement d’un matériau totalement organique, issu de l’économie circulaire et compostable à la fin de sa vie utile. Il est possible de croire que les propriétés obtenues seront similaires à celles de la laine de chanvre. Les objectifs spécifiques sont de développer un protocole de culture fonctionnel (principale contribution à la recherche dans ce domaine) sans toutefois l’optimiser ou comparer plusieurs espèces de mycélium, de mouler le matériau dans la forme voulue, d’inhiber la croissance du mycélium et caractériser le matériau ainsi obtenu en parallèle avec la laine de verre et la laine de chanvre. Une revue de littérature est présentée en premier, suivie de la méthode d’analyse et d’un article soumis pour publication. Des résultats complémentaires qui ne sont pas inclus dans l’article sont présentés au Chapitre 4 ainsi que la discussion correspondante.



## CHAPITRE 1

### REVUE DE LITTÉRATURE

La vie telle que nous la connaissons aujourd'hui repose sur les trois domaines du vivant établis par Carl R. Woese en 1978: les archées, les bactéries et les eucaryotes. Ce dernier domaine est constitué des règnes des Animaux, des Plantes et des Mycètes (Tortora et *al*, 2017). Contrairement à ce que plusieurs peuvent croire, le règne des Mycètes est plus proche, phylogénétiquement parlant, du règne des Animaux que du règne des Plantes. Cette divergence entre le règne des Animaux et celui des Mycètes aurait eu lieu il y a 800 à 900 millions d'années, moment auquel remonte le dernier ancêtre commun connu à ce jour (Moore et *al*, 2019). En effet, de telles affirmations reposent sur le principe de l'horloge moléculaire établi autour de 1960 qui permet de retracer l'évolution des organismes en fonction des mutations qui se sont produites au niveau de la séquence des acides nucléiques constituant l'ADN (acide désoxyribonucléique) ainsi que sur leur composition chimique. La présence de chitine, de mélanine et d'ergostérol en plus du stockage d'énergie sous forme de glycogène et de lipides contrairement aux plantes qui l'accumulent sous forme d'amidon font des mycètes des organismes qui ressemblent plus au règne des animaux (Willis, 2018). Les champignons sont majoritairement des organismes décomposeurs qui dégradent la matière organique de façon exogène à l'aide d'enzymes qu'ils sécrètent pour ensuite réabsorber les nutriments ainsi rendus biodisponibles. Aussi, le fait que les champignons ne sont pas des organismes photosynthétiques, les exclut du règne des plantes (Willis, 2018).

En revanche, la vaste majorité des organismes de ce règne sont encore méconnus à ce jour. En effet, on estime à environ 7% le nombre d'espèces de champignons connues pour un total estimé allant de 2,2 à 3,8 millions d'espèces, ce qui est plus de 6 fois plus élevé que le nombre d'espèces comprises dans le règne des plantes (Willis, 2018).

## 1.1 Classification des mycètes

La classification des mycètes est basée sur leurs caractéristiques morphologiques, leurs hyphes coenocytés ou septés ainsi que sur la couleur de leur sporée. En effet, le règne des Fungi se divise en 2 sous-règnes comprenant les Fungi basaux et les Dikarya. À leur tour, les sous-règnes sont divisés en embranchements. Dans le cas des Fungi basaux, aussi appelés champignons inférieurs en raison de l'absence de septas dans leurs hyphes qui sont alors coenocytés, ils se divisent en Microsporidia, Cryptomycota, Blastocladiomycota, Chytridiomycota, Zoopagomycota et Mucroromycota. L'évolution des Fungi basaux est visible le long des embranchements nommés ci-haut. En effet, les 4 embranchements les plus primitifs (Microsporidia, Cryptomycota, Blastocladiomycota, Chytridiomycota) possédaient des zoospores mobiles tandis que les Zoopagomycotas et les Mucroromycotas ne possèdent pas de zoospores mobiles. La perte du flagelle permettant la mobilité chez les zoospores est estimée s'être produite il y a environ 700 millions d'années, ce qui correspond approximativement à l'émergence des premiers végétaux. Dans le cas des Dikarya, aussi appelés champignons supérieurs en raison de leurs hyphes septés, ils regroupent les embranchements des Ascomycota et des Basidiomycota. Étant plus évolués que les Fungi basaux, les Dikarya ne possèdent pas de zoospores mobiles. La Figure 1.1 résume la chronologie décrite ci-dessus.

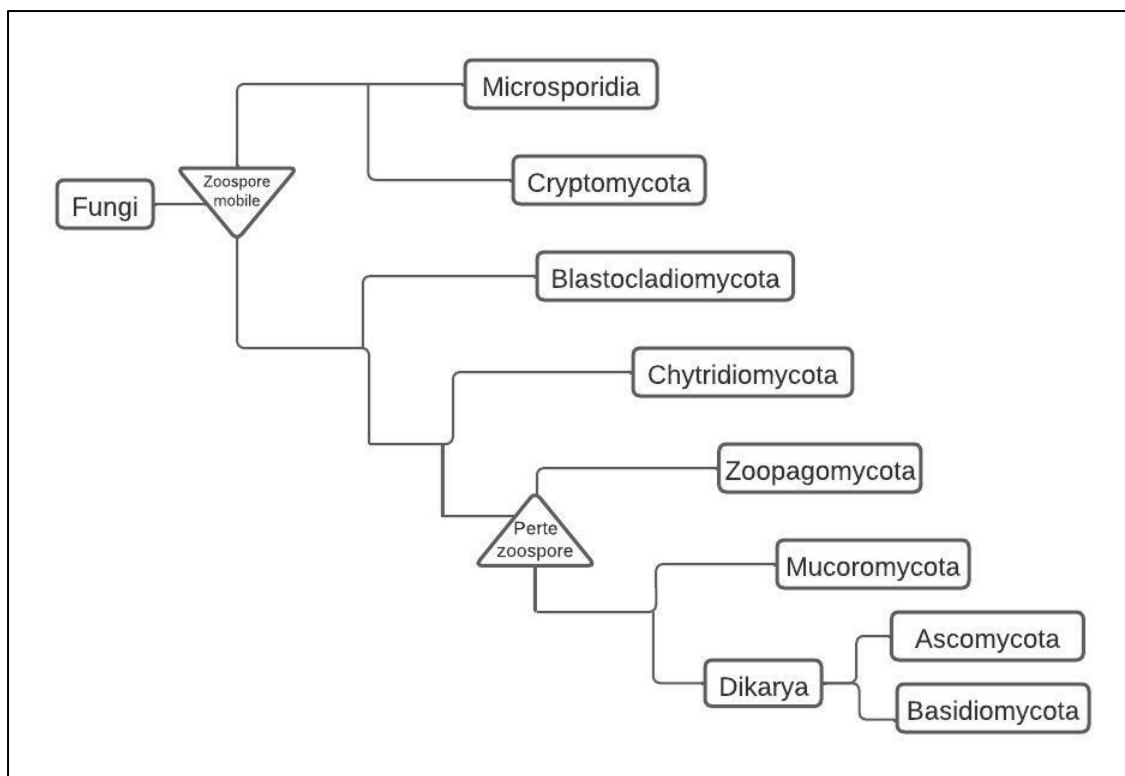


Figure 1.1 Évolution sommaire des embranchements de Fungi

La classification se poursuit alors pour chacun des embranchements en sous-embranchements, classe, sous-classe, ordre, genre et espèce. Compte tenu de la grande diversité morphologique et des modes de reproduction présents selon l'embranchement des Eumycota, la présente revue de littérature mettra l'accent sur ce qui se retrouve chez les Basidiomycètes. Cet embranchement comporte une importante diversité de champignons allant d'espèces symbiotiques, à phytopathogène en plus de plusieurs espèces saprotrophes pour un total estimé à plus de 50 000 espèces (Willis, 2018). La majorité des fructifications macroscopiques retrouvées en forêt font partie des Basidiomycètes.

Ceux-ci se divisent ensuite en 4 sous-embranchements : Agaricomycotina, Pucciniomycotina, Ustilaginomycotina, Wallemiomycotina. Dans le cas des Agaricomycotina, ce sont majoritairement des champignons macroscopiques de nature saprotrophe qui sont retrouvés en forêt. Certains des individus de ce sous-embranchement sont de nature mycorhiziens et parfois même pathogène. Les Pucciniomycotina sont de petits champignons dont les rouilles y sont

caractéristiques. Ces phytopathogènes qui ont besoin de deux hôtes spécifiques différents s'attaquent aux feuilles et tiges de nombreuses cultures à l'aide de la formation d'haustoriums (suçoirs) et doivent leur nom de rouilles au phénotype ainsi observé (Chamont, 2019). Ce sous-embranchement regroupe aussi des champignons saprotrophes et symbiotiques. Dans le cas des Ustilaginomycotina, il regroupe seulement des phytopathogènes ayant besoin d'un seul hôte pour se reproduire et dont la cible est souvent des plantes graminées. Ce sous-embranchement regroupe les maladies dites du charbon et des caries (Chamont, 2019). Finalement, le sous-embranchement Wallemiomycotina a été ajouté récemment et ne comporte que quelques espèces, dont le genre *Wallemia* qui est halophile (Zhao *et al*, 2017). Pour la suite, l'accent sera mis sur le sous-embranchement des Agaricomycotina.

Le sous-embranchement des Agaricomycotina se subdivise en 4 classes soient les Agaricomycetes, les Bartheletiomycetes, les Dacrymycetes et les Tremellomycetes. La particularité des Bartheletiomycètes est que cette classe monotypique regroupe comme seule espèce, *Bartheletia paradoxa*, qui est considérée comme étant un « fossile vivant » en association hôte spécifique avec l'arbre *Ginkgo biloba* dont la période d'effervescence aurait été pendant l'ère secondaire (Scheuer, 2008, et Willis, 2018). En revanche, la classe principale qui nous intéresse pour la suite est les Agaricomycetes qui se divisent en plus de 17 ordres. Comme la phylogénie des champignons sur terre est beaucoup trop grande pour être couverte en entier, seul l'ordre des Agaricales sera abordé pour la suite. Plus précisément, ce sera la famille des Pleurotacées qui comprend les genres *Hohenbuehelia* et *Pleurotus* duquel fait partie *Pleurotus ostreatus* qui est l'espèce qui sera utilisée dans le cadre de ce projet et plus précisément la souche NSP1 qui a été fournie par le Centre Collégial de Transfert de Technologie (CCTT) Biopterre (Biopterre, 2023). La Figure 1.2 décrit la classification sommaire présentée ci-dessus. La section 1.8 sera consacrée à *Pleurotus ostreatus*.

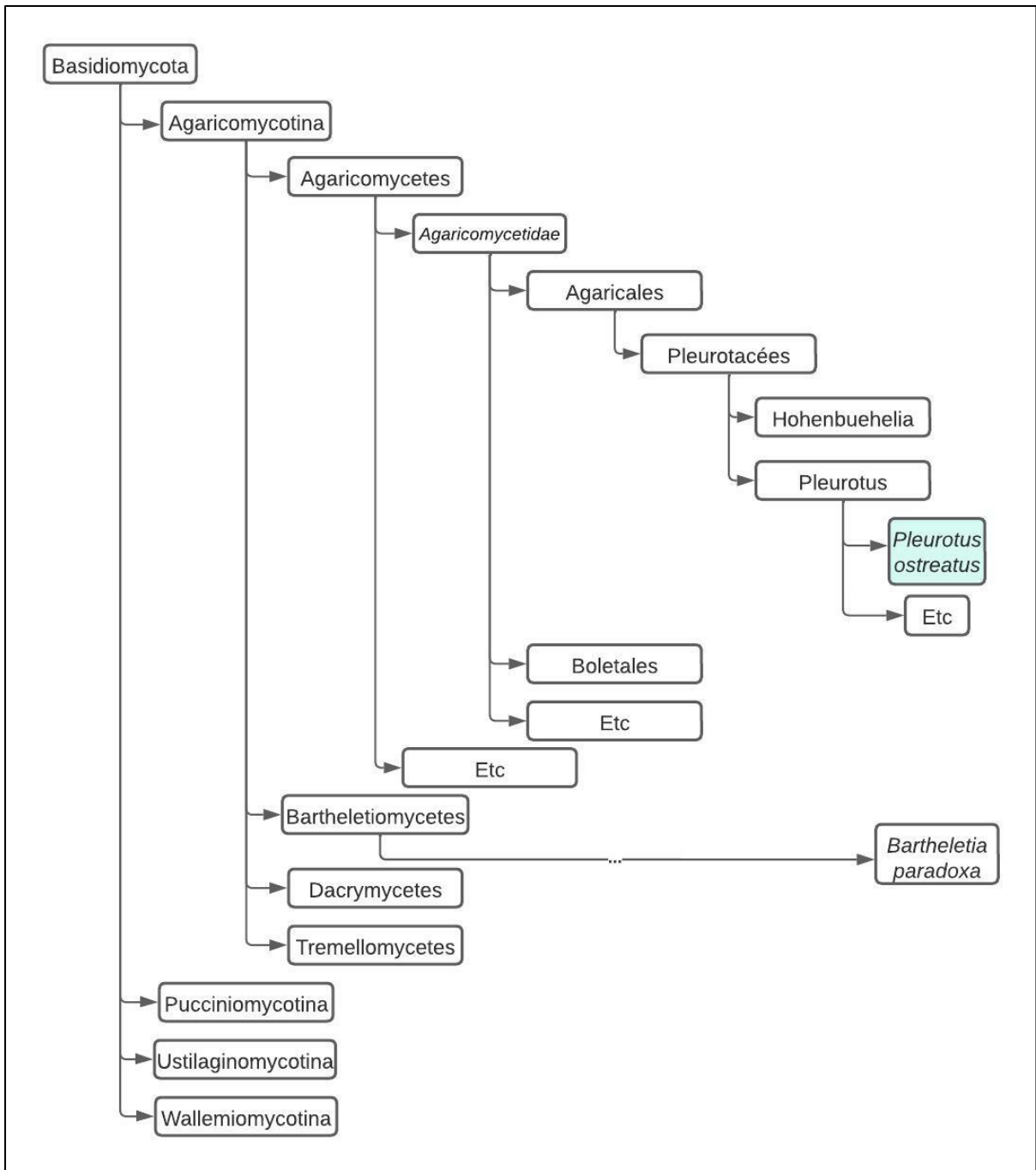


Figure 1.2 Classification simplifiée de *Pleurotus ostreatus*

D'autres espèces peuvent aussi être utilisées pour la constitution de biomatériaux. C'est le cas notamment de *Trametes versicolor*, dont une des principales propriétés est la dureté du chapeau du sporophore. Plusieurs espèces de pleurotes et quelques variétés de champignons de Paris

sont aussi utilisés, entre-autres, par l'entreprise Ecovative pour l'élaboration de leurs produits à base de mycélium (Ecovative, 2023). Toutefois, le choix de l'espèce de mycète repose surtout sur la relation substrat-champignon et sur le fait que l'espèce de champignon choisie ne doit en aucun cas être pathogène ou toxique pour l'homme.

## 1.2 Morphologie des mycètes

Les mycètes sont constitués de structures végétatives et reproductives. La majorité du volume de ceux-ci correspond à leurs structures végétatives qui sont, dans le cas des basidiomycètes entre autres, souterraines et donc cachées de la vue du commun des mortels. L'amalgame de cellules végétatives correspond au thalle et les filaments qui le constituent sont des hyphes chez ces organismes pluricellulaires. Les hyphes du thalle se développent tel un réseau de neurones avec beaucoup d'interconnexions de façon à occuper tout l'espace disponible le plus densément possible. Chez les organismes les plus évolués, des structures perpendiculaires aux hyphes appelés septa sont présents à l'intérieur des hyphes pour les diviser en différentes cellules contenant chacune un noyau. En revanche, des ouvertures appelées dolipores sont présentes sur les septas permettant au cytoplasme de circuler entre les différentes cellules. On parle d'hyphes segmentés ou septés lorsqu'il y a présence de septas (cloisons) tandis qu'on parle d'hyphes coenocytes lorsqu'il y a présence de plusieurs noyaux dans la même cellule allongée. L'ensemble des structures végétative sous forme de thalle est nommé mycélium et peut être comparer aux racines chez les végétaux.

Les cellules végétatives d'un mycète ont pour rôle le catabolisme de la matière organique présente dans l'environnement à l'aide d'enzymes afin d'alimenter à la croissance du champignon. Celle-ci se fait autour d'un point central correspondant originalement à la spore à partir duquel le champignon s'est développé et n'a pas de limite de croissance. Un œil aiguisé reconnaîtra le phénomène des ronds de sorcières présent dans les grandes étendues gazonnées (Figure 1.3). En effet, le catabolisme de la matière organique à l'extrémité distale des hyphes végétatifs génère du même coup des nutriments disponibles (comme les nitrates) qui favorisent une croissance accrue de la tourbe.



Figure 1.3 Ronds de sorcières, Vignoble du Marathonien, Havelock, Canada

Dans le cas des structures reproductives, celles-ci sont majoritairement, chez les basidiomycètes, les structures aériennes macroscopiques aussi appelées sporophores ou basidiomes. Cette fructification, parfois comestible, sert avant tout à la dissémination des spores au gré du vent et des animaux. Cette structure est généralement constituée d'un pied, aussi appelé stipe, sur lequel repose un chapeau dont la partie ferme est de la chair et la partie reliant le pourtour du chapeau au pied est constituée de lames et de lamelles, chez les Agarics, qui peuvent prendre d'autres formes selon l'ordre de champignon (aiguillons (Hydnes), plis (Chanterelles), tubes (Bolets)). La base du pied est appelée volve et possède une morphologie semblable à celle d'un œuf. C'est à la volve que le mycélium, comprenant les structures végétatives, est accroché. Certaines espèces de champignons possèdent un anneau sur leur pied qui est le vestige de la cuticule recouvrant le chapeau qui était initialement relié au pied avant le déploiement du chapeau lors de la maturation de la fructification. La cuticule correspond à la peau qui recouvre le chapeau du sporophore et peut être une caractéristique d'identification importante comme lorsque celui-ci est morcelé chez le genre *Amanita* (McNeil, 2006).

Chez les Basidiomycètes, les spores sexuées sont produites de façon exogène et sont appelées basidiospores. Celles-ci sont reliées à la baside par un stérigmate qui supporte les spores. Les basides sont retrouvées sur les lames et lamelles présentes sous le chapeau du sporophore.

L'expulsion de ceux-ci a lieu dans l'espace interlamellaire selon un processus qui sera développé dans le prochain sous-chapitre.

Chez les Basidiomycota, il existe trois types de mycélium qu'il est possible de retrouver selon le cycle de vie du champignon. Le mycélium primaire est le plus commun et possède uniquement des cellules monocaryotiques. Par la suite, le mycélium secondaire possède des cellules dicaryotiques avec des anses d'anastomoses. Les anses servent à la migration d'un des deux noyaux de la cellule lors du processus de division permettant ainsi de conserver les dicaryons à la suite de la division cellulaire. Finalement, le mycélium tertiaire est lui aussi formé de cellules dicaryotiques, mais celles-ci sont spécialisées dans la croissance du sporophore.

### **1.3 Cycle de vie des mycètes**

Chez les basidiomycètes du sous-embranchement des Agaricomycotina, les spores produites sont appelées des basidiospores, car elles sont formées sur une structure exogène nommée baside et elles sont de type sexué. Il existe cinq types de basides différents qu'il est possible de retrouver chez les Agaricomycotina. Le type le plus commun dans ce sous-embranchement est l'holobaside, ou l'eubaside, chez lequel une seule baside dépourvue de cloisonnements internes supporte plusieurs basidiospores (4) sur de courts stérigmates. On parle d'holobaside réduite lorsqu'il y a moins de 4 basidiospores de présentes par baside. Il est question d'hétérobaside lorsqu'il y a présence de cloisonnements longitudinaux au sein d'une baside. Chacune des hétérobasides ainsi formées (4) supportera une basidiospore par le biais d'un stérigmate. Chez les hétérobasides avec épibasides, ceux-ci sont des excroissances présentes sur la baside originale et chacune des excroissances (4) supporte une basidiospore au moyen d'un stérigmate. Le 5<sup>e</sup> et dernier type de baside est les phragmobasides qui sont une baside avec des divisions transversales où un stérigmate supportant une basidiospore qui provient de chacune de ces sous-divisions transversales (4). Le tout est illustré à la Figure 1.4.



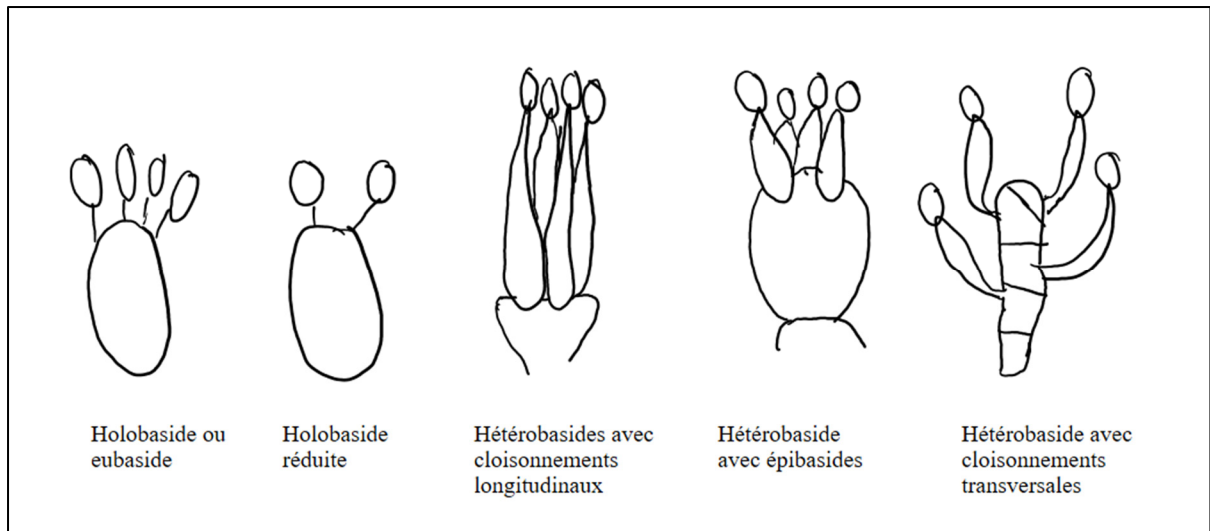


Figure 1.4 Illustration libre des différents types de basides

Par la suite, les spores ainsi produites seront expulsées des basides de manière active. Chez les hyménomycètes (basidiomycètes dont l'hyménium se trouve exposé à l'air libre), l'arrivée de la spore à maturité entraîne la formation de deux gouttes : la goutte de Buller (proche de la jonction entre la basidiospore et le stérigmate) et la goutte adaxiale (sur le côté de la basidiospore). Lorsque les gouttes grossissent, le centre de masse de la basidiospore se rapproche du stérigmate. Quand les gouttes arrivent à leur apogée et fusionnent, elles enrobent la spore instantanément ce qui déplace brusquement le centre de masse de la basidiospore vers son côté apical et entraîne son décrochement du stérigmate.

Ce processus d'expulsion est extrêmement important en raison du faible poids des basidiospores qui rend toutes les forces de cohésion par contact direct énormes par rapport à leur poids. Dans l'optique d'éviter le moindre contact entre la basidiospore éjectée et les lames et lamelles de l'hyménium, un processus de projection des spores au centre de l'espace interlamellaire est donc de la plus grande importance pour une diffusion efficace des spores.

Comme la reproduction chez les Agaricomycotina est de type sexué, il est inévitable de parler de cycle de vie. Tout commence par les basidiospores haploïdes ( $n$ ) préalablement expulsées. Ceux-ci vont commencer à croître pour former du mycélium primaire ( $n$ ) qui va ensuite se

différencier en type + ou -. La prochaine étape, la plasmogamie, est la plus importante du cycle et elle consiste à la fusion de deux cellules de type différent. Ceci entrainera donc la formation d'une cellule dicaryotique qui pourra se multiplier via la formation d'anse d'anastomoses, comme élaborée ci-dessus, et ainsi former du mycélium secondaire dicaryotique. Du mycélium tertiaire pourra alors être formé pour permettre la croissance d'un basidiome et la formation de baside ( $n + n$ ). Il y a ensuite caryogamie lorsque les deux noyaux de la baside fusionnent pour former des cellules diploïdes ( $2n$ ) qui contiennent le génome de chacun des deux parents. Finalement, la méiose permet à chaque baside possédant un noyau diploïde de former 4 basidiospores ayant chacun un noyau haploïde. À la suite de l'expulsion de ceux-ci, le cycle de reproduction des Agaricomycotina recommence (Morrow, 2022). Leur cycle de reproduction est illustré à la Figure 1.5.

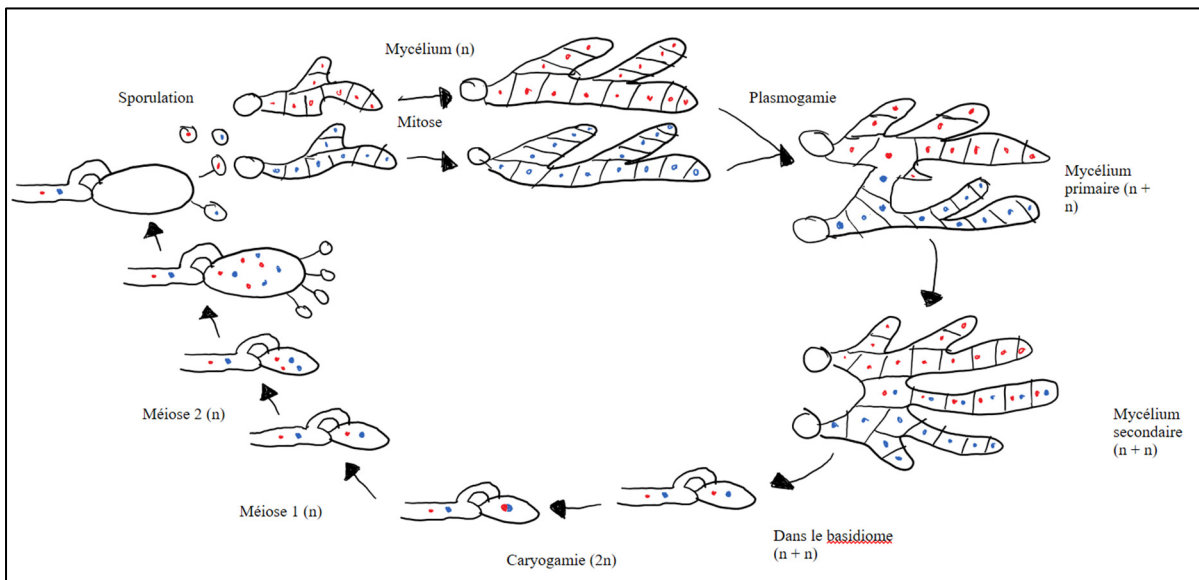


Figure 1.5 La reproduction chez les Agaricomycotina

#### 1.4 Le cycle de l'azote

Les cycles biogéochimiques sont d'une importance capitale pour le maintien de la vie sur terre. En effet, ceux-ci permettent le recyclage des nutriments à l'infini et assurent donc la pérennité de leur disponibilité. Les cycles biogéochimiques essentiels à la disponibilité des 3 nutriments limitants pour la croissance des plantes font référence à ceux du carbone, de l'azote et du

phosphore ainsi que de leur passage à travers l'atmosphère, la biosphère, la géosphère ainsi que l'hydrosphère. Dans le cas des forêts boréales et tempérées, c'est souvent l'azote qui se retrouve à être le nutriment limitant.

Le cycle de l'azote se distingue des autres cycles de nutriments en raison des différents niveaux d'oxydation et des divers types de réaction dans lesquelles l'azote est impliqué allant jusqu'à être l'un des gaz à effet de serre le plus destructeur de l'ozone sous la forme de  $N_2O$  (Gouvernement du Canada, 2013). Le plus grand réservoir d'azote de la planète est l'atmosphère dans laquelle il se retrouve sous forme gazeuse ( $N_2$ ) où il compte pour 78% de la composition totale de celle-ci. En revanche, la fixation de l'azote atmosphérique pour le rendre biodisponible sous forme de  $NH_3$  est un processus très énergivore et exclusif à seulement quelques organismes. La majorité des organismes pouvant effectuer celle-ci sont des procaryotes et surtout des cyanobactéries. Il n'y a aucun eucaryote capable de fixer l'azote de façon naturelle outre les humains qui sont capables de fixer artificiellement l'azote atmosphérique à l'aide du processus de Haber-Bosch développé pendant la 1<sup>ère</sup> Guerre mondiale. Celui-ci a eu diverses utilisations allant de la production d'engrais à la fabrication d'explosif et même jusqu'à la production du gaz Zyklon B (plus connu sous le nom de gaz moutarde) qui était initialement un pesticide, mais qui a malheureusement été utilisé contre l'homme lors de l'holocauste (Knaebel, 2014). Le facteur limitant lors de la fixation de l'azote atmosphérique est l'enzyme mère de cette réaction, la nitrogénase, qui est altérée de façon irréversible par la présence d'oxygène, arrêtant instantanément le processus.

Les mycètes sont impliqués dans le cycle de l'azote au niveau de la relâche d'ammonium ( $NH_4^+$ ) à la suite de la minéralisation de composés organiques. Le taux d'ammonium dans les sols est très bas par rapport au taux de nitrate ( $NO_3^-$ ), car l'ammonium est rapidement transformé en nitrates par la réaction de nitrification qui a lieu en deux étapes effectuées par des organismes différents. Premièrement, l'ammoniac va être oxydé en nitrites ( $NO_2^-$ ). Cette réaction est majoritairement effectuée par les bactéries *Nitrosomonas* et *Nitrospira* qui utilisent l'ammoniac comme source d'énergie dans les environnements où il y a présence d'oxygène. Par la suite, la deuxième étape de la nitrification consiste à l'oxydation des nitrites

en nitrate. Cette étape a lieu quasiment immédiatement après, car il est très rare qu'il y ait accumulation de nitrites dans l'environnement. Le genre *Nitrobacter* effectue l'oxydation des nitrites de façon facultative tandis que les genres *Nitrococcus*, *Nitrospina* et *Nitrospira* effectuent l'oxydation des nitrites de façon obligatoire. L'étape la plus limitante dans le cycle de l'azote une fois la fixation effectuée est l'oxydation de l'ammonium.

Les mycètes, par leur action saprotrophe, effectuent la dégradation de la matière organique morte de façon exogène à l'aide d'enzymes digestives. Ils aident à compléter la boucle en retournant les minéraux et les nutriments au sol sous une forme plus simple. Les champignons absorbent donc ces nutriments et s'en servent pour leur croissance ou pour la croissance de la plante avec laquelle ils sont en association symbiotique. Ceci permet donc une réutilisation de l'azote contenue dans la matière organique qui est absorbée sous forme de protéines sans qu'elle ne retourne sous forme d'azote atmosphérique et ait à être fixé.

## **1.5 Applications des mycètes**

Les mycètes sont partout. Ils sont impliqués dans de nombreux procédés qui nous impactent dans la vie de tous les jours sans même qu'on les soupçonne. Comme le témoigne l'historien Stewart Lee Allen dans son livre *Jardins et cuisines du diable*, la préparation et le gonflement du pain ont longtemps relevé de la superstition, expliquant donc sa mise à l'avant-plan dans la religion chrétienne. En effet, comme celui-ci en fait état, le métier de boulanger était autrefois réservé à de vertueux catholiques dans la France du début du XVI<sup>e</sup> siècle en raison de l'implication de la « fécondation céleste » dans le processus de gonflement de la pâte. Depuis la découverte des microorganismes lors de l'invention du microscope par Van Leeuwenhoek en 1677, l'action du levain est maintenant considérée comme un processus totalement biologique (Diouf, 2021).

### **1.5.1 Environnementale**

Le rôle des champignons dans l'environnement est primordial. En effet, ces êtres saprotrophes contribuent de façon prépondérante à la décomposition de la matière organique et donc à l'augmentation des nutriments disponibles dans les sols pour la croissance des plantes. Cette implication majeure dans la chaîne alimentaire est réalisée à l'aide de la sécrétion de cellulases

de façon extracellulaire qui permet la rupture du lien reliant les deux molécules de glucose qui forment la cellulose (Tortora, 2017). Aussi, le champignon *Trichoderma* est utilisé en bioprévention pour contrer l'action d'autres champignons pathogènes. En effet, celui-ci est capable de faire compétition à un champignon pathogène pour son établissement sur une plante, de parasiter des champignons pathogènes pour induire leur mort ou bien de leur porter préjudice par le phénomène d'antibiose (Willis, 2018). Dans un autre ordre d'idées, certains mycètes possèdent des capacités de bioremédiation. C'est le cas de *Pleurotus ostreatus* et de *Trametes versicolor* sont capable de bio remédier l'eau et les sols contaminés aux biphényles polychlorés (BPC) (Willis, 2018).

Cependant, les effets des champignons sur l'environnement ne sont pas tous bénéfiques. En effet, des mycètes pathogènes sont responsables de nombreuses maladies qui peuvent affectées les plantes et les animaux. *Plasmopara viticola* qui cause le mildiou de la vigne est un exemple parmi les différents champignons qui causent les maladies génériques des mildious et des rouilles qui ont un impact important sur le rendement et la prospérité des cultures (Willis, 2018). Du côté des humains, ce sont les mycoses qui peuvent engendrer des problèmes de santé chez les patients immunodéprimés. Des pathogènes opportunistes comme *Candida albicans*, qui fait partie de la flore normale de l'intestin, des voies génitales féminines ainsi que du tractus respiratoire, peut entraîner des candidoses buccales, vaginales, cutanées ou œsophagiennes pouvant même aller jusqu'à une septicémie. Celles-ci sont habituellement être traitées à l'aide d'antibiotiques (Gouvernement du Canada, 2014).

### **1.5.2 Agroalimentaire**

Les champignons sont très présents dans l'industrie agroalimentaire. En effet, la simple consommation de ces fructifications se chiffre à un marché d'une valeur d'environ 42 milliards de dollars américains pour minimalement 350 espèces (Willis, 2018). Comme discuter ci-haut, la levure *Saccharomyces cerevisiae* est impliquée dans le processus de gonflement du pain depuis la nuit des temps (Lee Allen, 2004). Cette même levure est aussi impliquée dans le processus de fermentation qui entre en jeu lors de la fabrication de la bière. Elle consomme le sucre présent dans le mélange et le transforme en alcool et en gaz carbonique (Willis, 2018).

Pour ce qui concerne la fermentation du vin, se sont encore des levures qui sont impliquées, mais cette fois-ci ce sont celles naturellement présentes à la surface des raisins qui vont entamer le processus de fermentation au contact du sucre présent dans la chaire de ceux-ci.

Du côté des produits laitiers, de nombreux champignons rentrent dans la fabrication des fromages. Ce sont eux qui donnent le goût unique présent sur la croûte des différents fromages. Par exemple, *Penicillium camemberti* sert à la préparation des camemberts et des bries tandis que *Penicillium roqueforti* est impliqué dans la fabrication des fromages à pâte persillée ou « fromages bleus » comme le Roquefort ou le Gorgonzola avec leur goût prononcé qui ne plait pas à tous (Willis, 2018). Encore dans la catégorie des produits laitiers, il y a le yaourt qui est en fait du lait fermenté. Cette fermentation est majoritairement effectuée par des bactéries lactiques, mais elle peut aussi l'être par des levures.

Les mycètes sont aussi impliqués dans la fabrication de diverses boissons comme le Kombucha et le Kéfir (Willis, 2018). De façon industrielle, *Aspergillus niger* sert à la production d'acide acétique tandis que le champignon *Eremothecium gossypii* est fermenté dans le but de produire des suppléments de vitamine B2 (Willis, 2018).

Finalement, l'entreprise américaine Ecovative et plus particulièrement sa filiale MyForest Foods utilise le mycélium de champignon pour en faire des produits alimentaires de tout genre. Le premier produit qu'ils ont sorti en 2019 est MyBacon. Comme le nom l'indique, ce sont des tranches de mycélium avec un assaisonnement et une coloration de bacon. Ce produit végane a fait fureur dès sa sortie! D'autres produits du type Beyond Meat à partir de mycélium sont en cours d'élaboration par cette entreprise (Ecovative, 2022).

### **1.5.3 Médicale**

Aussi étonnant que ça puisse paraître, les mycètes sont d'une grande importance dans le domaine médical. De façon plus historique, ils sont utilisés depuis longtemps dans la médecine traditionnelle chinoise dans laquelle certaines propriétés anti-inflammatoires sont exploitées (Geng et al, 2014). De plus, ils sont le pilier central de la médecine moderne qui n'est basée

sur nul autre que les antibiotiques! On doit leur découverte à Alexander Fleming en 1928 lorsqu'il observa la présence d'une substance fortuite sur ses pétris qui inhibait la croissance des colonies de *Staphylococcus aureus*, le mycète *Penicillium rubens*. Ce n'est que 13 ans plus tard que la pénicilline a réussi à être isolée par l'équipe du professeur Howard Florey de l'Université d'Oxford (Hare, 1982). Depuis, plusieurs générations d'antibiotiques ont vu le jour et ont révolutionné la médecine moderne. En revanche, de nombreuses bactéries résistantes aux antibiotiques qui sont apparues au fil du temps et mettent en danger les bases mêmes de la médecine moderne. De nombreux composés ont par la suite été extraits des mycètes et sont utilisés en médecine en raison de la grande similitude des protéines des animaux et des mycètes. C'est le cas, entre autres, de la cyclosporine provenant du champignon *Tolypocladium inflatum* qui, grâce à son effet immunosuppresseur, permet d'immunoréguler les lymphocytes T et ainsi prévenir le rejet des organes à la suite des transplantations. Dans le même ordre d'idées, la lovastatine qui est isolée à partir d'*Aspergillus terreus* est un des agents les plus efficaces pour diminuer le cholestérol. Pour couronner le tout, les champignons sont capables d'effectuer la biotransformation des stéroïdes. De façon concrète, *Penicillium spp.* Est donc impliqué dans la synthèse des pilules contraceptives de 3<sup>e</sup> génération (Aly *et al*, 2011; Willis, 2018).

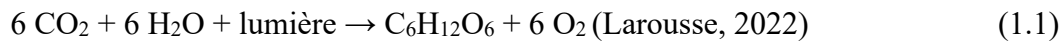
Les levures aussi jouent un rôle important en médecine. C'est le cas de *saccharomyces cerevisiae* qui depuis les années 1990 est impliqué dans la production du vaccin contre l'hépatite B à partir desquels un antigène recombinant est produit ainsi que dans la production d'insuline. Jusqu'à 15% des produits biopharmaceutiques sont produits à base de levures. (Hilleman, 1987; Willis, 2018).

#### **1.5.4 Les mycorhizes**

Les mycorhizes sont le fruit d'une association symbiotique entre un champignon et une plante. Celle-ci a lieu au niveau des racines de la plante et est non spécifique par rapport aux espèces impliquées (Tortora, 2017). La plante profite des nutriments que le champignon dégrade et remet en circulation dans le sol grâce à ses propriétés saprotrophes ainsi que son absorption

d'eau tandis que le champignon profite de l'apport constant en hydrate de carbone que lui fournit la plante qui les produit lors du processus de photosynthèse (Willis, 2018).

Équation 1 : Équation chimique du processus de photosynthèse



Les mycorhizes étaient présents chez les premières plantes qui sont apparues sur terre il y a plus de 400 millions d'années. Aujourd'hui, près de 90% des plantes sur terres entretiennent une association symbiotique avec des mycorhizes dans leurs racines. En revanche, les espèces de champignons qui sont capables d'entretenir ce genre de relation sont très restreintes. En effet, seulement 2% de toute la diversité de mycètes connue et estimée à ce jour peut entrer en relation avec les racines de plantes pour former des mycorhizes (Willis, 2018). Celles-ci se retrouvent majoritairement sous forme d'endomycorhizes ou d'ectomycorhizes.

Les endomycorhizes, comme leur nom l'indique, se retrouvent à l'intérieur des cellules racinaires de la plante où les hyphes du mycélium du champignon forment des structures appelées arbuscules ainsi que des vésicules qui permettent le stockage de nutriments. Cette association spécifique plante-champignon est retrouvée à plus de 80% chez les plantes vasculaires sous forme d'endomycorhizes arbusculaires. Le 20% restant regroupe les endomycorhizes d'éricacées et d'orchidées (Willis, 2018).

Dans le cas des ectomycorhizes, le champignon ne pénètre pas à l'intérieur des cellules de la racine, mais il va plutôt créer une structure appelée le réseau de Hartig qui va entourer les cellules racinaires en plus de créer un manteau de protection mycélien autour des racines. Ce type d'association mycorhizienne représente seulement 2% des mycorhizes présentes sur terre, mais elle a lieu chez certaines espèces d'arbres (ex) que l'on retrouve communément. Aussi, les plantes ayant une association mycorhizienne de type ectomycorhize possèdent généralement jusqu'à 70% plus de moles de carbone par mole d'azote que les plantes ayant une association de type endomycorhizienne (Willis, 2018).



La présence de mycorhizes a de nombreux effets bénéfiques chez les plantes et est même indispensable à la survie des deux partenaires comme c'est le cas chez les plantes gaminées. Il est possible d'observer la présence de structures externes, comme les fleurs, plus imposantes chez les plantes bénéficiant d'une association mycorhizienne, car celle-ci leur permet de consacrer moins d'énergie à l'acquisition de nutriments et donc d'en consacrer plus au développement de leurs atouts permettant un meilleur attrait de pollinisateurs. Aussi, la présence de mycorhizes permet de favoriser un type d'agriculture qui est plus durable en réduisant les besoins d'utilisation d'amendement comme les fertilisants et les pesticides grâce à une meilleure absorption des nutriments présents dans le sol par le champignon. Aussi, les champignons sécrètent des composés carbonés qui stimulent l'activité des bactéries solubilisatrices du phosphate qui sont déjà présent dans le sol. De plus, la présence de mycorhizes stimule le développement des racines de la plante, ce qui permet une meilleure absorption des nutriments déjà présents dans le sol en raison de la plus grande surface de contact.

Enfin, la présence de mycorhizes permet à la plante d'avoir une meilleure réponse face aux situations de stress dues, entre autres, aux changements climatiques (hautes températures, sécheresses) par la modulation de l'absorption et de la rétention d'eau selon les conditions environnantes. Les mycorhizes sont donc un atout en tous points permettant d'améliorer la sécurité alimentaire mondiale en augmentant les revenus de culture grâce à l'efficacité de celle-ci et à une meilleure résilience des plantes.

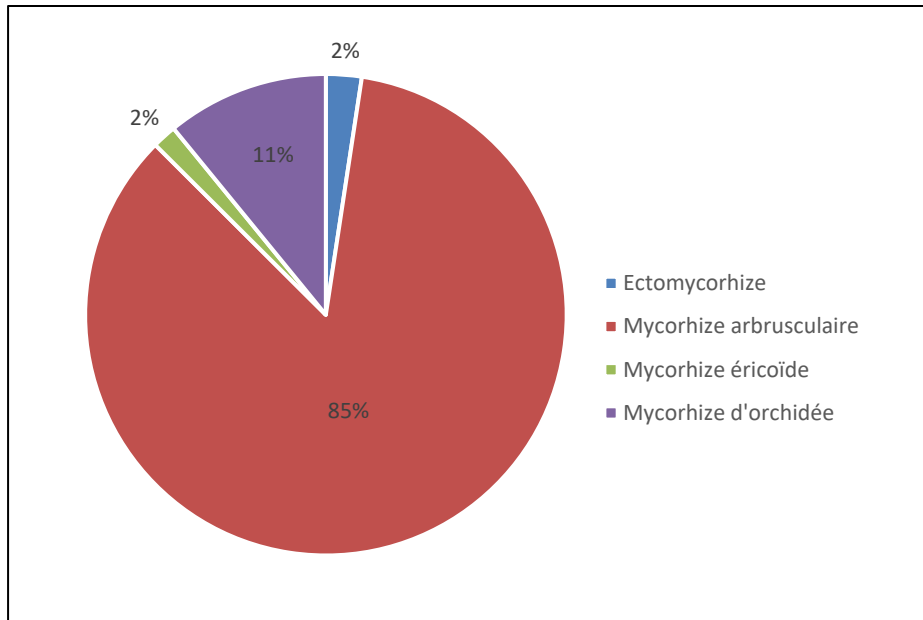


Figure 1.6 Prépondérance des divers types de mycorhizes chez les plantes

Tirée de Willis (2018, p. 36)

### 1.5.5 L'industrie

Les mycètes ont de nombreuses utilisations dans l'industrie qui sont très peu connues. Par exemple, *Aspergillus* est utilisé dans l'industrie du coton en raison de sa catalase qui participe à la dégradation des agents blanchissants utilisés qui se retrouvent par la suite dans les eaux usées générées par le processus. Il sert donc au traitement biologique des eaux usées de cette industrie. Pour ce qui est de l'industrie du papier, ce sont plutôt les laccases qui permettent la dégradation de la lignine qui est un composé brun retrouvé naturellement dans le bois. Celles-ci sont produites, entre autres, par *Pycnoporus cinnabarinus*. Dans le cas de l'espèce *Aspergillus oryzae*, ce sont les lipases qui sont utilisées dans l'industrie du cuir, car elles permettent le dégraissage des peaux de façon totalement biologique (JGI, 2022; Willis, 2018). Les cellulases du champignon *Trichoderma* sont dans plusieurs processus. Premièrement, elles permettent la dégradation des résidus agricoles utilisés pour la production de biodiésel, mais elles permettent aussi, en plus des cellulases du genre *Humicola*, de réduire la quantité d'eau utilisée dans l'industrie de la fabrication des pâtes et papiers en augmentant la vitesse de réaction du procédé de digestion de la cellulose (El-Bondkly, 2014; Willis, 2018). Finalement,

le genre *Aspergillus* produit de l'acide itaconic qui rentre dans la composition de pièces de plastique pour l'industrie automobile, dans la fabrication du caoutchouc synthétique ainsi que dans la production de Lego™ (Willis, 2018).

## 1.6 Les propriétés des mycètes

Les mycètes possèdent énormément de caractéristiques qui les rendent attrayants pour diverses utilisations dans l'industrie. Premièrement, ils ont une croissance indéterminée qui leur permet de croître en continu aussi longtemps que des nutriments seront disponibles et qu'il y aura de l'espace disponible. Ceci fait donc en sorte que, dans un espace restreint, ils vont prendre la forme de leur environnement. De plus, comme mentionné plus tôt, ils ont besoin de peu de lumière, d'une superficie de croissance restreinte ainsi que d'un court délai de croissance pour produire beaucoup de biomasse. Deuxièmement, comme leur génome est relativement court, le séquençage de celui-ci est rapide (Willis, 2018). Ce n'est pas un hasard si le premier organisme à avoir été complètement séquencé était la levure *Saccharomyces cerevisiae* (Tortora, 2017). Aussi, comme les gènes des mycètes ressemblent beaucoup à ceux des humains, leur utilisation est une alternative intéressante pour les chercheurs qui veulent tester leurs théories à moindre coût et avec moins de contraintes éthiques (Willis, 2018).

Bien que les mycètes soient présents sur terre depuis plus de 800 millions d'années, ce n'est qu'autour de 1990 que des recherches commencent à être menées au Japon par Shigeru Yamanaka dans le but de produire du papier et des matériaux de construction à base de mycélium (Girometta et al, 2019; Moore et al, 2019). C'est grâce à une inactivation à la chaleur que la croissance du mycélium est arrêtée, ce qui rend le matériau inerte. Selon diverses études, les matériaux biosourcés à base de mycélium de champignons possèdent de bonnes propriétés d'isolation acoustique par absorption des sons. De plus, ces panneaux isolants de mycélium sont très légers (Pelletier et al, 2017). Du côté des propriétés du mycélium qui en font un bon candidat comme matériau isolant, il y a l'obtention par Elsacker et al (2019) de mesures de conductivité thermique semblables à celle de matériaux isolants qui ont fait leurs preuves comme la laine de roche et la fibre de verre. Dans le cas de la résistance du matériau à la compression, celle-ci est tellement grande que des architectes et des artistes font des structures

de hauteur impressionnante uniquement à base de briques de mycélium (Bonnefin, 2017). Lors d'exposition du mycélium à une flamme nue, celui-ci a démontré un fort potentiel de retardateur de flamme complètement biologique contrairement aux polybromodiphényles éthers mieux connus sous l'acronyme PBDE. En effet, en raison de son faible taux de relâchement de chaleur, le mycélium limite la quantité de gaz qui pourrait alimenter un incendie (Jones *et al*, 2018).

En revanche, pour une même espèce de mycètes, l'utilisation d'un substrat de croissance et de conditions de cultures différentes peuvent modifier les propriétés finales du matériau obtenu. Ceci dépend aussi du type de fibres utilisées comme substrat de culture ainsi que leur forme (copeaux, poussière, précompressée, etc.) (Elsacker *et al*, 2019; Girometta *et al*, 2019). Plusieurs espèces de mycètes ont été utilisés au fil des années dans la production de matériaux biosourcés. Les plus communément utilisés sont *Agaricus bisporus*, *Agaricus brunnescens*, *Lentinula edodes*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus pulmonarius* et *Trametes versicolor* (Ecovative, 2023)

### 1.7 *Pleurotus ostreatus*

L'appellation *Pleurotus ostreatus*, ou plus communément Pleurotes en forme d'huître, ne fait pas l'unanimité chez certains auteurs par rapport aux champignons qu'on peut trouver en Amérique du Nord. Selon Pomerleau (1980), une sporée blanche correspond à *P. ostreatus* tandis qu'une sporée lilas devrait plutôt être considérée comme *P. sapidus* qui se retrouve majoritairement dans le sud de la province. Dans le cas de Després *et al* (2002), une sporée crème en amas avec un chapeau couleur beige qui vire au blanc avec le temps correspond plutôt à *P. populinus* en raison de sa croissance sur du bois de peuplier. Les Pleurotes en forme d'huîtres sont d'excellents champignons comestibles et ils sont cotés de groupe de risque 1 selon Santé Canada (Gouvernement du Canada, 2022). Ils ont une croissance grégaire sur le bois de feuillus, autant mort que vivant, mais peuvent aussi être cultivés, entre autres, sur des résidus de mac de café. Phénotypiquement parlant, le chapeau des Pleurotes est de 2 à 20 cm de diamètre selon une forme ronde avec une légère dépression vers le point d'attache à la tige qui lui donne une forme convexe. Celui-ci est de couleur blanche lorsque le champignon est à

maturité, mais il peut être brun-gris, gris ou olivâtre lors de sa croissance. Sous le chapeau, les lamelles sont rayonnantes et occasionnent une sporée majoritairement blanche, mais qui peut parfois être lilas. La chair du chapeau est blanche et tendre tandis que le pied, lui aussi blanc, est plein avec une chair ferme. Celui-ci est souvent excentrique par rapport au chapeau et à une hauteur d'au plus 3 cm pour une largeur allant de 1 à 2,5 cm (McNeil, 2006).

Les pleurotes en forme d'huître peuvent être retrouvés dans la forêt québécoise comme ils peuvent être facilement cultivés de façon artisanale. À Montréal par exemple, la ferme urbaine Blanc de Gris se sert de drêche de brasserie pour faire pousser ses Pleurotes tout au long de l'année selon un principe d'économie circulaire (Blanc de Gris, 2022). Dans le cas des jardiniers dans l'âme, il est possible de se procurer à la Mycoboutique à Montréal des trousseaux de culture de divers champignons, dont les Pleurotes, à effectuer directement dans sa cuisine (Mycoboutique, 2022).

Le choix de cette espèce de champignon en tant que maillon central de cette expérience repose sur plusieurs facteurs. Premièrement, *Pleurotus ostreatus* est une espèce de champignons comestibles classés de groupe de risque 1 par Santé Canada (Gouvernement du Canada, 2022). Comme les laboratoires de l'École de technologie supérieure (ÉTS) ne sont pas agréés pour les groupes de risque 2 à 4 au niveau des agents pathogènes, le choix d'un champignon de groupe de risque 1 était implicite. Aussi, en raison de l'optique d'utilisation du matériau bioformé développé lors de cette étude en tant qu'isolant de bâtiments, l'utilisation d'une espèce pathogène n'aurait pas été un choix judicieux autant au niveau de la santé populationnelle que pour le niveau de risque encouru. Deuxièmement, *Pleurotus ostreatus* est une espèce de champignons indigène du Québec et donc, sa possible future utilisation à grande échelle ne risque pas de porter préjudice à l'équilibre environnemental de la flore québécoise. Troisièmement, de nombreuses études impliquant le mycélium de champignons mentionnent l'utilisation de *Pleurotus ostreatus* et donc, la littérature sur le sujet est riche et témoigne de précédents (Voir section 1.6). Finalement, c'est une espèce relativement commune dont il est possible de se procurer une souche pure autant à la Mycoboutique que via le Centre Collégial de Transfert de Technologie (CCTT) Biopterre à La Pocatière.

Afin de déterminer si le mycélium de *Pleurotus ostreatus* possède des propriétés isolantes, il est nécessaire de réussir à faire croître celui-ci sous forme de briques et de parvenir à inhiber son développement à perpétuité lors d'une exposition à la chaleur. Ensuite, des essais de caractérisation doivent être effectués en parallèle avec un panneau d'isolant bioformé à base de chanvre provenant de l'entreprise québécoise Nature Fibre à Val-des-Sources ainsi qu'un panneau d'isolant plus traditionnel en laine de verre.

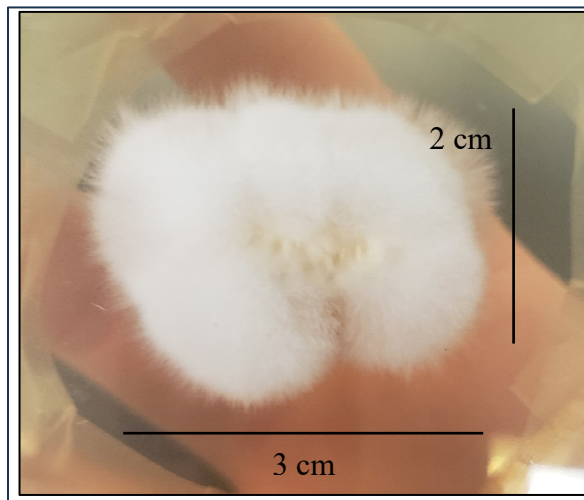


Figure 1.7 Apparence de *Pleurotus ostreatus* sur gélose Sabouraud-chloramphénicol

## 1.8 Brevets sur les produits à base de mycélium

Les produits à base de mycélium sont présents dans l'industrie depuis peu. Les compagnies qui les développent ont donc tout intérêt à faire breveter leur technologie afin de la protéger. C'est le cas de la compagnie américaine Ecovative qui, depuis sa fondation en 2007, multiplie les avancées technologiques dans le domaine des mycomatériaux. Cette entreprise détient depuis 2016 deux brevets européens, les EP2702137 et EP2094856 (Office, E.P., 2019). Ecovative possède aussi le brevet 2834095 au Canada depuis 2018 concernant le « procédé de fabrication d'éléments de mycélium déshydratés et produit fabriqué par ce procédé » (Gouvernement du Canada, 2023). Une autre compagnie américaine, Mycoworks, qui se spécialise en cuire végétale à base de mycélium a aussi déposée une demande de brevet au gouvernement du Canada en 2021 qui est en cours d'analyse (Mycoworks, 2023; Office de la

propriété intellectuelle du Canada, 2021). Une autre entreprise du secteur est la compagnie britannique Biohm qui produit des abat-jours et des panneaux isolants à base de mycélium. L'entreprise a récemment reçu l'accréditation du British Board of Agrement pour l'utilisation de ses panneaux isolants dans la construction résidentielle, mais elle est toujours en attente du classement officiel (Biohm, 2016; Peters 2021).

## **1.9 Caractérisation des matériaux**

L'isolation des bâtiments est une propriété importante qui est autant recherchée en été qu'en hiver pour améliorer l'efficacité énergétique de ceux-ci. Même si une bonne isolation semble une caractéristique à préconiser durant l'hiver pour diminuer les coûts de chauffage et les pertes de chaleur reconnaissables à la présence de glaçons sur les toits, celle-ci est toute aussi importante pendant l'été. En effet, elle permet de retarder la pénétration de la chaleur dans le bâtiment et diminue donc les coûts reliés à la climatisation qui est un atout inestimable dans cette ère de changements climatiques. Le matériau bioformé à base de mycélium de champignon créé lors de ce projet sera caractérisé selon les différents essais décrits ci-bas et comparé aux données obtenues pour la laine minérale et un autre isolant bioformé à base de chanvre. Les trois matériaux seront de même dimension afin d'obtenir des résultats comparables entre eux. Les différents essais de caractérisation ont été choisis librement selon ce qui étaient faisable au niveau du temps, du budget, des installations et de l'optique d'utilisation du matériau biosourcé comme isolant thermique.

### **1.9.1 Calorimétrie isotherme**

La calorimétrie isotherme permet de générer des courbes de la chaleur totale présente dans chacun des échantillons ainsi que le flux de chaleur qu'ils génèrent en fonction du temps. Un appareil comme le TAM Air 8-channels permet l'analyse de 8 échantillons simultanément où chacun d'eux possède son ampoule de référence vierge à laquelle comparer afin de générer la ligne de base. Chaque échantillon est mis dans une ampoule de verre scellée de 20 mL qui peut être stérilisée au besoin. Il n'y a donc aucun échange d'air avec l'extérieur possible, ce qui permet de déterminer avec précision si la réaction qui a lieu au sein de l'ampoule est de nature exothermique ou endothermique ainsi que de quantifier celle-ci avec précision. L'appareil

TAM Air 8-channels possède en effet une grande précision l'analyse allant jusqu'à  $2\mu\text{W}$  avec un bruit de fond de moins de  $0,1\mu\text{W}$ . Aussi, la température de la chambre interne peut être réglée de  $5^\circ\text{C}$  à  $90^\circ\text{C}$  avec une stabilité aussi précise de  $\pm 0,001^\circ\text{C}$  (TA Instruments, 2023).

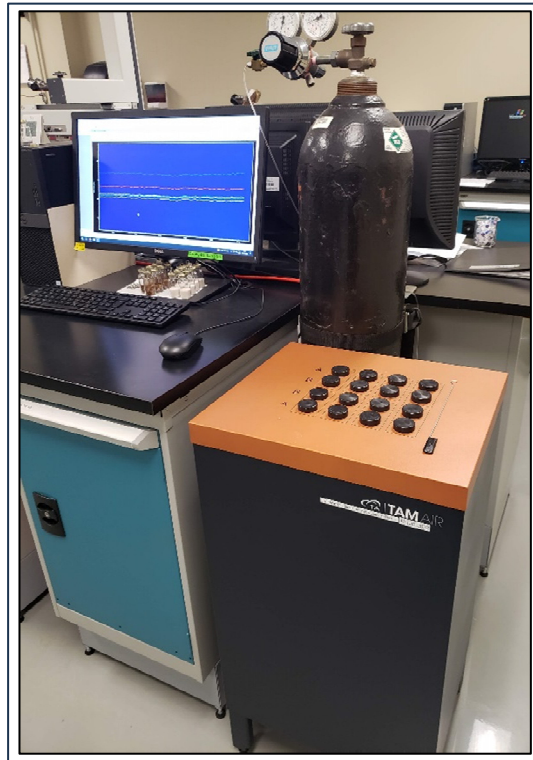


Figure 1.8 Appareil TAM Air 8-channels

### 1.9.2 Conductivité thermique

La conductivité thermique est le temps que prend un matériau pour diffuser une quantité de chaleur sur une distance  $x$  comprise entre ses deux faces. La valeur de celle-ci est notée par la lettre grecque lambda ( $\lambda$ ) dont les unités sont le watt par mètre kelvin ( $\text{W/mK}$ ). L'appareil qui sera utilisé pour mesurer la conductivité thermique des matériaux analysés est le Trident de la compagnie C-Therm que le laboratoire de Thermique et Sciences du Bâtiment de l'ÉTS possède déjà. L'appareil possède trois types de capteurs différents qu'il est possible d'utiliser : la Modified Transient Plane Source (MTPS), la TLS Needle et la Flex TPS. En raison de sa simplicité d'utilisation, sa précision, sa sensibilité et sa rapidité d'analyse, c'est la méthode MTPS, conforme à la norme ASTM D7984, qui sera utilisée à une température ambiante de



20°C. Celle-ci consiste à déposer l'échantillon sur le capteur de 18 mm de diamètre dans lequel de la chaleur est générée par un élément en forme de spirale selon un courant établi. L'échantillon peut autant se retrouver sous forme liquide, de pâte, en poudre ou solide. L'augmentation de la température au point de contact entre l'échantillon et le capteur va provoquer un changement de voltage qui est calibré à la température d'analyse. La taille de l'échantillon doit être de minimalement 17 mm de diamètre ainsi que de 5 mm d'épaisseur, mais il n'y a aucune taille maximale. Celle-ci sera similaire entre tous les essais et tous les matériaux analysés pour assurer une meilleure comparaison. Une courbe plus prononcée sera présente dans le cas des matériaux peu conducteurs tandis que la courbe sera plus aplatie dans le cas de matériaux fortement conducteurs. Toutes les données recueillies sont transférées directement dans le logiciel de C-Therm et peuvent être directement utilisées sans analyse à effectuer (C-Therm, 2022). Comme aucune préparation de l'échantillon n'est nécessaire et que le temps d'analyse est de seulement quelques secondes, l'utilisation du C-Therm est un choix stratégique. L'échantillon reste intact à la suite de l'analyse et celle-ci peut être faite à un intervalle de températures allant de -50°C à 200°C ce qui est très versatile pour différents besoins de caractérisation. Comme la capacité thermique est dépendante de la densité des matériaux, il est important que celle-ci soit la même pour le triplicata de chacun des types de matériaux analysés à chaque température. Le niveau de compaction du matériau lors de l'analyse doit donc être similaire à celui qui sera présent lorsqu'il est installé comme isolant pour que la conductivité thermique mesurée soit représentative. Le matériau de référence à utiliser pour la calibration de l'appareil devra être choisi en fonction de la valeur de conductivité thermique attendue selon la charte présente en annexe du manuel d'utilisateur (C-Therm technologies<sup>Ltd</sup>, 2008).

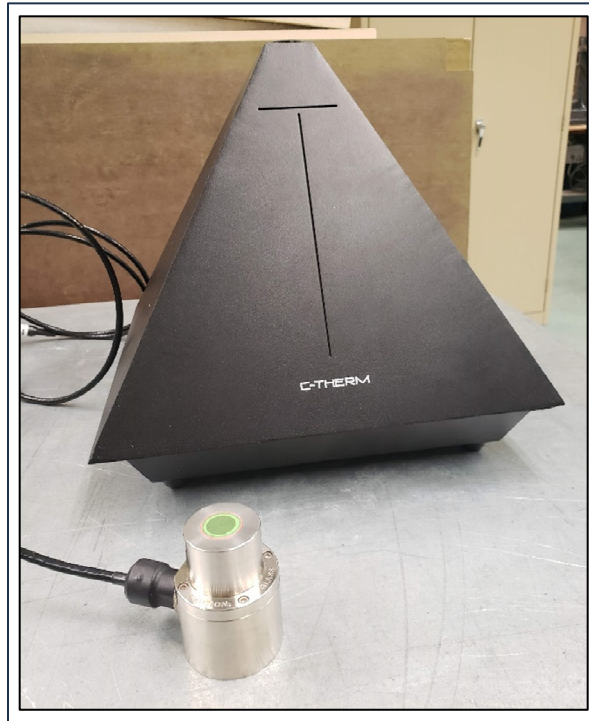


Figure 1.9 Appareil C-Therm Trident

### 1.9.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression est, dans ce cas précis, la contrainte nécessaire à appliquer afin de réduire de moitié la hauteur initiale de l'échantillon en question (Équation 2) (Ammara, 2011). Le choix de cet essai repose sur le côté pratique pour l'entreposage et la pose d'avoir un matériau qu'il est possible de compresser et qu'il sera en mesure de reprendre sa forme par la suite. Cette analyse sera effectuée à l'aide de l'appareil MTS Alliance RF/200 du laboratoire de génie mécanique de l'ÉTS. Cette méthode consiste à appliquer une force, en Newtons, de façon verticale et répartie au moyen d'une plaque sur toute la surface de l'échantillon, selon une vitesse de compression précise jusqu'à atteindre une distance de compression voulue de l'échantillon. La capacité du matériau à reprendre sa forme à la suite de la compression ne sera pas à l'étude. L'appareil compense automatiquement la contrainte nécessaire à appliquer afin de maintenir la vitesse de compression choisie. Cette force, compilée en Newtons (N), est modélisée en fonction du temps sous forme de graphique. Il est ensuite possible calculé la contrainte, en KPa, en fonction de la surface de l'échantillon sur laquelle la force a été répartie selon les formules suivantes.

Équation 2 : Contrainte

$$\tau = \frac{\text{Force (N)}}{\text{Surface (m}^2\text{)}} \quad (1.2)$$

Équation 3 : Conversion de Newtons en kilopascals

$$1kPa = \frac{1kN}{m^2} \quad (1.3)$$

Équation 4 : Conversion de Newtons en mégapascals

$$1MPa = \frac{1N}{mm^2} \quad (1.4)$$

#### 1.9.4 Transmission et absorption du son

La caractérisation de la capacité insonorisant des matériaux biosourcés à base de mycélium de champignon et de chanvre ainsi que celle de la laine de verre seront analysés à l'aide de tubes à impédance de la compagnie Mecanum qui sont conformes aux normes ASTM E1050, ISO 10534-2 et ASTM E2611 (ASTM International, 2019; ISO, 2015; ASTM International, 2019). Cette analyse sera effectuée en collaboration avec le laboratoire d'acoustique de l'ÉTS. Cet appareil possède trois diamètres différents de tube (100 mm, 44,4 mm et 29 mm). Plus le diamètre du tube est petit, plus il est possible d'analyser le comportement du matériau à des fréquences élevées. À une extrémité du montage se trouve la source émettrice de la gamme de fréquences selon un certain niveau d'excitation (dB). Jusqu'à trois microphones se situent après l'échantillon à analyser et captent la quantité de décibels transmis et absorbés par le matériau. Tout espace d'air entre le tube et le matériau biaise les résultats en raison des fuites occasionnées. Il est possible d'évaluer la variabilité des conditions de montage en prenant plusieurs mesures d'un même échantillon qui est enlevé et remis dans le tube à impédance entre les mesures. Il est aussi possible d'évaluer la différence entre les échantillons, mais leur densité doit être similaire afin que les résultats obtenus soient comparables (Mecanum, 2023). Cette méthode consiste à mesurer le nombre de décibels d'un son émis d'un côté qu'a été perdu lors de la transmission du son de l'autre côté du matériau. Plus la différence entre le nombre

de décibels émis et la quantité transmise est élevée, plus la valeur de l'ITS (Indice de Transmission du Son) est importante, meilleure est l'isolation acoustique (APCHQ, 2023). En revanche, il est certain que l'ITS finale d'un mur dépend de l'ITS de tous les matériaux qui le compose et non uniquement du matériau isolant utilisé. Dans le cas de l'absorption du son, celle-ci est notée  $\alpha$  qui est le ratio entre la quantité de décibels absorbée par rapport à la quantité de décibels totale dans l'environnement à l'étude. Un ratio de 1 témoigne d'une absorption totale des sons par le matériau tandis qu'un ratio de zéro témoigne d'une réflexion totale des sons dans l'environnement (Siemens, 2021).

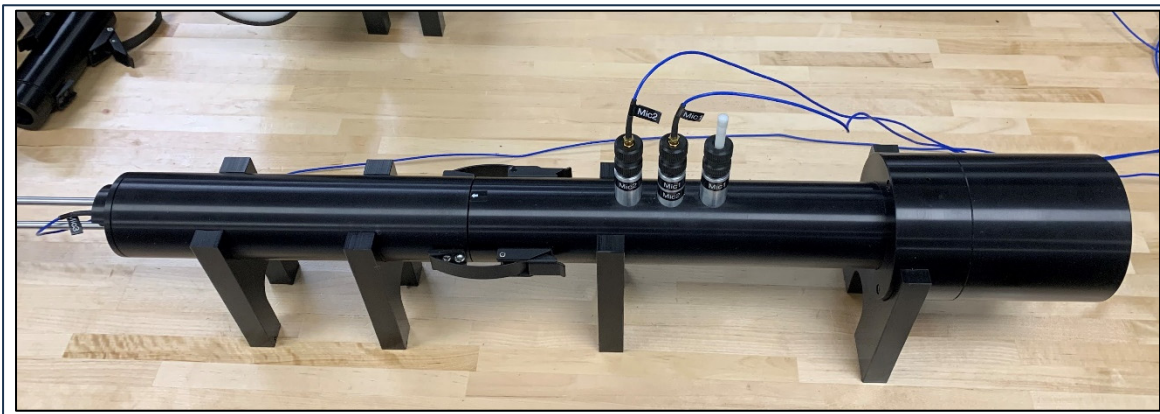


Figure 1.10 Schéma du montage utilisé pour la prise de données d'acoustique

### 1.9.5 Inflammabilité/classement au feu

La capacité d'un matériau à accélérer la progression d'un incendie (inflammabilité) ou l'inverse, sa capacité à retarder la progression de celui-ci en raison de sa combustion lente ou inexistante (ininflammabilité) permet d'effectuer le classement au feu spécifique à chaque matériau. Comme l'ÉTS ne possède pas les installations nécessaires à la réalisation de cette analyse, celle-ci pourrait être effectuée à Toronto dans les locaux de Underwriters Laboratories of Canada (UL Solutions). La norme d'essai CAN/ULC-S102 est la plus adaptée aux types de matériaux à l'étude (UL Solutions, 2023). La comparaison du poids des échantillons avant et après l'exposition à une source d'ignition pendant un temps déterminé permettra de comparer de pourcentage de perte de masse entre les différents matériaux et donc d'estimer la vitesse de combustion. UL Canada est aussi en mesure d'effectuer l'analyse des composés retrouvés dans la fumée de combustion afin de déterminer leur toxicité. En revanche, vu le coût important

d'une telle analyse ainsi que la quantité de matériau nécessaire à sa réalisation (3 panneaux de 22 po sur 24 pi pour chacun des matériaux), celle-ci ne sera pas effectuée dans le cadre de ce projet, mais elle serait intéressante à réaliser éventuellement lorsque la méthode de production de panneaux isolants en mycélium et en fibres végétales aura lieu à grande échelle.

### **1.9.6 Déphasage thermique**

Le déphasage thermique correspond au temps requis pour que la température à laquelle un des côtés du matériau est exposé soit transmise au côté opposé du matériau. Plus le temps de déphasage est important, meilleure est la capacité de l'isolant à freiner la pénétration de la chaleur et donc meilleure sera la performance thermique du bâtiment. Pour qu'un produit soit considéré comme un bon isolant, le temps de déphasage thermique doit être le plus long possible. Ceci permet, par exemple, à la chaleur provenant du soleil de seulement être transmise à l'intérieur du bâtiment à la nuit venue quand le temps est plus frais. Le temps de déphasage devrait être stable pour une température donnée (Wu, 2011). L'étude de celui-ci est pertinente aux extrêmes de température pour que la température ambiante d'un bâtiment reste la plus confortable possible en minimisant l'utilisation de moyens d'appoint (chauffage ou climatisation).

### **1.9.7 Capacité thermique**

La capacité thermique ou calorifique d'un matériau correspond à la quantité de chaleur que celui-ci doit absorber avant que sa température interne augmente d'un kelvin (K). Celle-ci peut être mesurée pour une quantité molaire en joules par mole kelvin ( $J/K \cdot mol$ ) ou pour une quantité massique en joules par kilogramme kelvin ( $J/kg \cdot K$ ). Comme elle est dépendante des conditions opérationnelles pendant lesquelles elle a été déterminée, il peut exister différentes capacités thermiques pour un même matériau. Cette mesure s'exprime donc par  $C_X$  où X correspond aux conditions particulières d'expérimentation, dont le moyen utilisé pour faire augmenter l'énergie thermique de l'échantillon. En construction, moins la capacité thermique d'un matériau est importante, meilleur isolant il sera (Corriou, 1984). Celle-ci peut aussi être calculée à partir des valeurs d'effusivité, de conductivité thermique et de densité du matériau selon la formule suivante :

Équation 5 : Calcul de l'effusivité

$$E = \sqrt{kpC_p} \quad (1.5)$$

Équation 6 : Calcul de la capacité thermique

$$C_p = \frac{\sqrt{E}}{kp} \quad (1.6)$$

Où E correspond à l'effusivité, k à la conductivité thermique (W/m\*k), p à la densité (kg/m<sup>3</sup>) et C<sub>p</sub> à la capacité thermique (J/kg\*K) (C-Therm, 2022). Comme la conductivité thermique et l'effusivité thermique vont préalablement avoir été déterminée par l'analyse avec le C-Therm, il sera possible d'isoler la capacité thermique dans l'équation 5. Pour cette analyse, la taille de l'échantillon n'a pas d'importance, car la densité est un ratio.

La conductivité thermique et l'effusivité peuvent être mesurés à l'aide de l'appareil C-Therm Trident comme décrit précédemment. Dans le cas de la densité réelle du matériau, celle-ci peut être déterminée à l'aide d'un pycnomètre à gaz. À partir d'une masse d'échantillons connue, un appareil comme le Ultrapyc 5000 de la compagnie Anton Paar utilise l'hélium afin de déterminer le volume occupé par l'échantillon dans une cellule de volume connu lors d'une procédure d'environ 10 minutes. Cette méthode possède une précision de mesure jusqu'à 0,02% pour la grande cellule de 135 cm<sup>3</sup> avec une répétabilité de 0,01%. L'instrument permet aussi de contrôler la température ainsi que la pression à laquelle la prise de mesure est effectuée (Anton Paar, 2023).

### 1.9.8 Mesure de la porosité

Beaucoup de méthodes existent afin de déterminer la porosité d'un échantillon comme l'analyse d'images, l'absorption de fluides ou tomographie. La porosité correspond au volume qu'occupent les vides (pores), V<sub>v</sub>, au sein d'un échantillon de masse connue par rapport au volume total (V<sub>T</sub>) de celui-ci (vides (V<sub>v</sub>) + solides (V<sub>s</sub>)) (Dubé et al, 2022). Elle est définie par l'équation 7.

Équation 7 : Porosité

$$n = \frac{V_V}{V_v + V_s} = \frac{V_v}{V_t} \quad (1.7)$$

Malgré son invention au XIX<sup>e</sup> siècle, la mesure de la porosité par analyse d'images est encore une technique très utilisée aujourd'hui qui se réalise à moindre coût. Cette méthode d'analyse peut être effectuée à l'aide d'un microscope optique ou bien à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Le choix de l'un par rapport à l'autre dépend du grossissement recherché. En effet, le microscope optique permet d'atteindre un grossissement allant jusqu'à 100X, mais débutant à 10X. En revanche, il est nécessaire que la surface de l'échantillon soit extrêmement lisse lors de la prise d'image et que l'épaisseur de celui-ci soit très minime. Dans le cas du microscope électronique à balayage, le grossissement minimal commence à 50X pour aller jusqu'à 50 000X. L'utilisation du microscope à balayage va donc générer plus d'images à traiter. Aussi, l'orientation des fibres peut avoir un impact sur les images générées qui peut faire accroire à la présence de porosités lorsqu'il n'y en a pas vraiment. Les images sont, en général, prises à l'aide d'une caméra couplée à un dispositif à transfert de charge (CCD). Ceci indique donc du même coup que l'échantillon analysé doit être capable de conduire les charges en question. Il est « possible de métalliser la surface de l'échantillon » rendant alors celui-ci conducteur (Ledru et *al*, 2009). Peu importe le type de microscope utilisé, il est nécessaire de rendre la surface sur laquelle la lecture va avoir lieu le plus lisse possible. Ceci peut être fait par un polissage mécanique rotatif, à l'aide de disques de granulométrie allant de 800 à 2000 grains/cm<sup>2</sup>, ou bien à l'aide de produits chimiques (Ledru et *al*, 2009). En revanche, le plus important pour que les faibles volumes d'échantillons analysés soient représentatifs de l'ensemble du matériau repose sur un échantillonnage rigoureux qui est aléatoire, isotrope et uniforme. L'utilisation d'un logiciel approprié va permettre le traitement et même le regroupement des images prises (ex : AnalySIS<sup>®</sup> FIVE).

Dans le cas des mesures de porosité par tomographie, une numérisation 3 dimensions (3D) de l'échantillon est effectué à la suite de la prise d'une grande quantité d'images prises en coupes. Ensuite, la pièce est reconstituée à l'aide d'un logiciel d'imagerie grâce auquel il est possible d'observer le nombre de pores, leur forme ainsi que le volume occupé au sein de l'échantillon.

Cette technique n'est pas invasive, car les images sont prises de l'extérieur de l'échantillon sans le toucher. La tomographie est grandement utilisée dans le domaine médical (Bruyant, 2022).

Finalement, la méthode par absorption de fluide est facilement accessible en raison du matériel plus courant qu'elle nécessite. En utilisant un fluide de masse volumique connue à la température d'analyse choisie. Il est possible de déterminer le volume des vides de celui-ci présent dans les porosités de l'échantillon selon la différence de masse de celui-ci avant et après immersion dans le fluide. En revanche, le matériau ne doit pas être perméable au fluide utilisé afin d'éviter son absorption dans les fibres, ce qui fausserait les données. Pour une pénétration optimale du fluide dans les vides, il est important de mettre les échantillons dans un contenant permettant de créer un vide afin que l'air qui remplissait préalablement les pores soit expulsée et laisse place au fluide voulu.

### 1.9.9 La densité

La densité, désignée par la lettre grec  $\rho$ , correspond à la masse d'un échantillon par unité de volume (Alexander, 1993). Dans le cas de la densité réelle, c'est aussi le ratio de la masse sur le volume lorsque tous les pores et vides internes que l'échantillon contient ne sont pas pris en compte dans le calcul du volume (Lowell, 2004). Elle se calcul selon l'équation suivante.

Équation 8 : Densité

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.8)$$

Comme un échantillon de nature poreuse comporte de nombreux vides, il est important de choisir une méthode de mesure de la densité qui va faire abstraction des vides et calculé le volume des solides réellement présents avec grande précision. L'utilisation d'un appareil comme le pycnomètre à gaz permet de calculer uniquement le volume des solides, car les vides présents seront comblés par le gaz. Ce type d'appareil injecte un gaz de volume connu (l'hélium dans ce cas) dans une chambre de volume connu. L'insertion de l'échantillon dans ladite chambre va diminuer le volume de gaz qu'il est possible d'injecter et cette différence de



volume correspond à celui occupé par l'échantillon. Une purge de la chambre est effectuée après l'insertion de l'échantillon pour obtenir une pression de 0 kPa avant l'injection de l'hélium afin de s'assurer que ce soit le seul gaz présent (variation de volume entre différent gaz) (Anton Paar, 2023). L'avantage de l'utilisation d'un gaz réside dans leur capacité à s'infiltrer dans toutes les porosités des échantillons afin de combler tous les vides présents dans la chambre. Comme le volume d'un gaz varie en fonction de la pression et de la température ( $PV = nRT$  selon la loi des gaz parfaits), il est important de choisir une température et une pression d'analyse qui seront constantes tout au long des mesures (Tenny et *al*, 2022).

### 1.9.10 Microscopie

Il existe différents types de microscopie selon le type d'images voulues. La plus accessible est la microscopie optique qui nécessite tout au plus une coloration de l'échantillon et la mise en lame et lamelle de celui-ci pour une conservation à long terme et une protection de l'échantillon. En revanche, il permet seulement d'effectuer des observations dans le spectre de la lumière visible pour des échantillons qui laissent passer ces longueurs d'onde (photon). Le grossissement total s'effectue à deux niveaux. La première lentille se situe dans l'oculaire et son grossissement est inhérent au modèle de microscope. Par la suite, 3 à 4 objectifs sont habituellement présents. Certains nécessitent parfois une observation à l'aide d'huile à immersion pour augmenter la définition de l'image.

En contrepartie, la microscopie électronique à balayage (MEB) nécessite l'utilisation d'échantillons naturellement conducteurs d'électrons. Lorsque les matériaux ne sont pas naturellement conducteurs, une fine couche d'or a été apposée à leur surface afin de les rendre conducteurs ce qui rend leur préparation plus complexe. Le carbone peut aussi être utilisé comme matériau conducteur de recouvrement, mais l'or permet l'obtention d'images à plus haute résolution. Aussi, l'échantillon est déposé sur un ruban de carbone collant avant d'être recouvert d'or ou de carbone au besoin (Castro, 2019). Par la suite, un ruban de cuivre est apposé de l'échantillon jusqu'à l'extérieur du support afin de faire dévier les électrons secondaires émis après la collision du faisceau avec l'échantillon, ce qui permet de rendre l'image obtenue plus claire. Le principe du MEB consiste à l'émission d'un faisceau

d'électrons qui balaye l'échantillon et provoque l'émission d'électrons secondaires lors du contact. Les particules sont ensuite captées afin de produire une image 3D représentative de la surface de l'échantillon (Postek, 1997). Les zones plus blanches de l'image sont dues à la captation d'une plus grande quantité d'électrons secondaires correspondant à une zone plus pentue de la surface de l'échantillon tandis que les zones plus noires sont dues à la captation d'une moins grande quantité d'électrons secondaires ce qui correspond aux zones plus lisses de l'échantillon. Comme la longueur d'onde des électrons est beaucoup plus faible que celle des photons du microscope optique et que le vide peut être créé dans la chambre d'analyse, il est possible d'observer des détails aussi petits que  $0,2 \mu\text{m}$ . Le voltage d'accélération des électrons, la brillance, le contraste, l'accent, l'astigmatisme ainsi que le grossissement peuvent être ajustés afin d'obtenir une meilleure image (Castro, 2019).

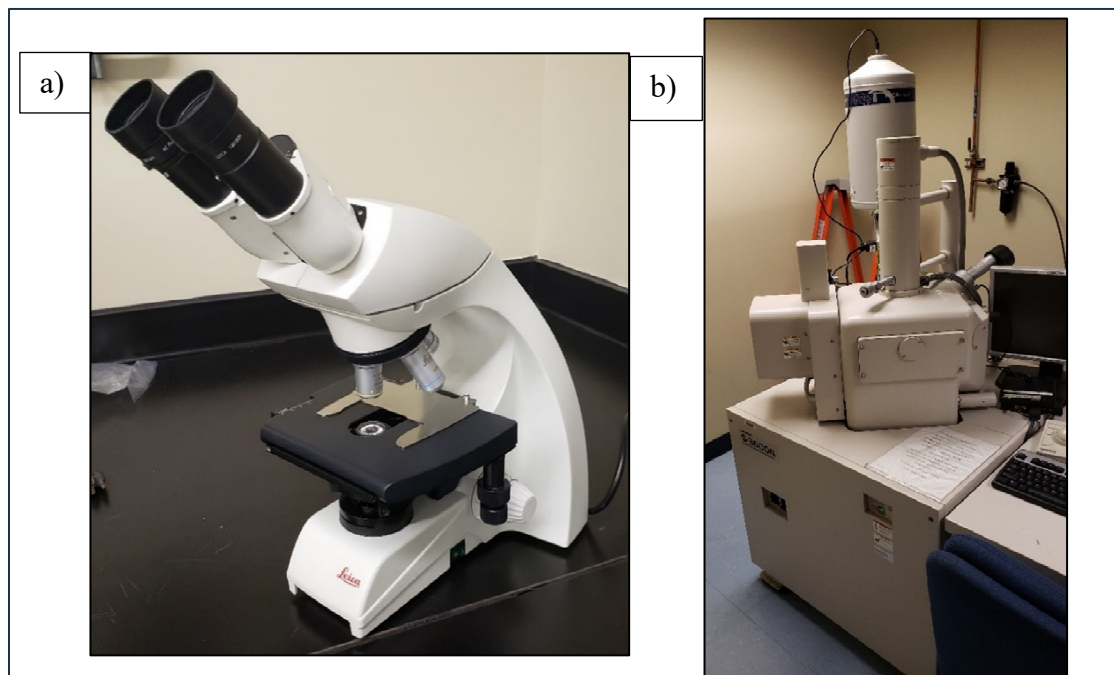


Figure 1.11 Différents types de microscopes a) Optique et b) Microscope électronique à balayage (MEB)

### 1.9.11 Spectrométrie FTIR

La spectrométrie FTIR de « Spectrométrie Infrarouge à Transformée de Fourier » est une méthode d'analyse des groupes fonctionnels présents dans un échantillon sous forme solide,

liquide ou gazeuse. L'échantillon est excité pour une gamme de fréquences comprises dans l'infrarouge, de  $10\text{ cm}^{-1}$  à  $10\,000\text{ cm}^{-1}$ , afin d'obtenir les spectres d'absorption, d'émission, de photoconductivité et de diffusion Raman de celui-ci. Chacun des spectres émis est unique et est comparable à l'empreinte digitale de l'échantillon et permet donc une identification très précise de tous les composés présents ainsi que de leur quantité. (Peak, 2013). Ce type de spectrométrie est des plus populaire en raison de sa rapidité d'exécution, de sa sensibilité et du fait qu'elle n'est pas invasive pour l'échantillon qui reste intact à la suite de l'analyse. En effet, seulement un très petit échantillon est nécessaire pour la mise en contact avec le crystal de l'échantillon. Pour augmenter la précision et la définition des pics, il est possible de compresser l'échantillon à l'aide d'une presse afin d'améliorer la surface de contact et donc d'analyse avec le crystal. La gamme d'application du FTIR est vaste. Elle passe de l'industrie pétrochimique, pharmaceutique et agroalimentaire à l'analyse de sols, de polymères et de composés présents dans un mélange (Millipore Sigma, 2023).



Figure 1.12 Appareil de spectrométrie FTIR

L'identification des groupes fonctionnels présents dans la molécule s'effectue par l'absorption de ceux-ci à une fréquence spécifique qui leur est caractéristique. Les liens covalents qui lient deux atomes ensemble vont changer d'énergie de vibration et de type de mouvement selon les atomes présents (étirement ou rapprochement) ce qui va émettre un pic caractéristique dans le

spectre à une fréquence précise. Les molécules non polaires telles que O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub> n'absorbent pas en IR en raison de leur absence de dipôle ce qui empêche la vibration de la molécule. Le spectromètre convertit automatiquement des données obtenues de l'interférogramme sous forme graphique grâce à la transformée de Fourier. Le graphique de transmittance en fonction du nombre d'onde (en cm<sup>-1</sup>) généré permet d'identifier les groupements fonctionnels présents dans l'échantillon analysé (Peak, 2013). La transmittance est l'inverse de l'absorbance (A). Le pourcentage qui n'est pas absorbé par l'échantillon est donc transmis à travers lui et capté de l'autre côté. L'absorbance de l'échantillon est déduite à partir de la transmittance mesurée (Millipore Sigma, 2023).

Équation 9 : Calcul de l'absorbance à partir de la transmittance

$$A = \log_{10} \frac{1}{\text{Transmittance } (T)} \quad (1.9)$$

### 1.9.12 Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique (ATG) est une méthode de caractérisation qui permet de faire un suivi de la variation de masse d'un échantillon en environnement contrôlé (température et pression) lorsqu'il est soumis à une source de chaleur ou de refroidissement. Selon l'appareil auquel l'ATG est couplé, il est possible d'obtenir d'autres informations sur l'échantillon. Un capteur de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) va permettre de quantifier les réactions endo et exothermiques qui ont lieu entre l'échantillon et son environnement. Dans le cas d'un analyseur thermique différentiel (ATD), les différents changements de phase pour l'intervalle de températures choisies peuvent aussi être observés. Il est également possible de coupler l'ATG à un spectromètre de masse (MS) ou un FTIR afin de décomposer les éléments présents dans la vapeur relâchée par l'échantillon (Nasrollahzadeh et al, 2019).

Cette méthode de précision permet de caractériser un matériau en fonction de sa composition. En analysant individuellement chacun des composants d'un matériau, il est possible d'extrapoler le comportement global que celui-ci risque d'adopter dans certaines conditions de température autant au niveau des propriétés chimiques que physiques (Mettler Toledo, s.d.).

Une analyse sous atmosphère avec présence d'air permet l'oxydation des échantillons. Ce type d'atmosphère peut parfois engendrer un effet de flottaison en raison de l'entrée d'air par injection qui est plus froide que l'intérieur de la chambre tend à porter l'échantillon par sa densité ce qui entraîne une augmentation erronée du poids réel de celui-ci pour un certain moment. La température de l'échantillon en temps réel est déterminée par la différence de potentiel mesurée par l'appareil entre deux fils de platine présents sur capteur.

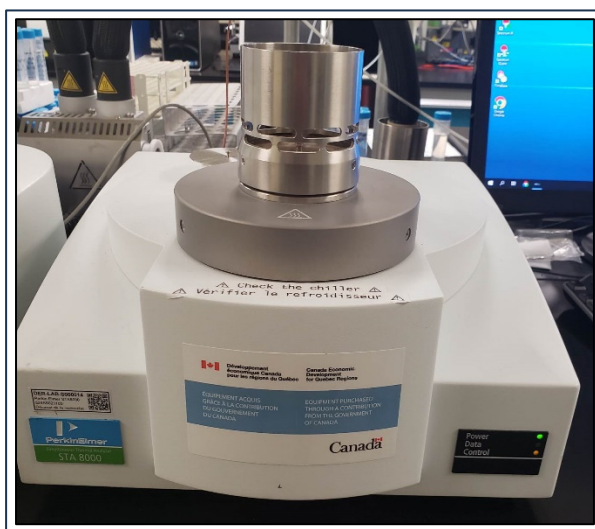


Figure 1.13 Appareil thermogravimétrique

### 1.10 Substrat de croissance

Il est possible d'utiliser une vaste variété de substrat de croissance pour la culture de champignons. Le choix du substrat dépend premièrement de l'espèce de champignon choisie. En effet, chaque champignon possède son milieu de croissance de prédilection qui est assez sélectif pour servir de critère d'identification préliminaire lors de la cueillette en forêt. Certains sont plus riches en nutriments que d'autres comme les grains de seigle d'avoine, de millet et de blé (Mycoboutique, 2022). Le principal désavantage de leur utilisation repose sur leur culture à grande échelle en champ ainsi qu'à leur utilisation primaire dans l'alimentation humaine qui s'en retrouve précarisée lors de leur utilisation pour la production d'objets et de consommables en cette ère de lutte pour la sécurité alimentaire (FAO, 2023). En revanche, il est aussi possible d'utiliser et de revaloriser de nombreux résidus végétaux locaux dans un

principe d'économie circulaire comme la drêche de brasserie, les épis de maïs en fin de saison et les copeaux issus de bois de moindre qualité ou de branches.

Dans le cas de la présente étude, deux types de substrat de croissance sont utilisés entre l'étape de croissance sur gélose et l'obtention de briques d'isolant. Ceux-ci sont les grains de seigle et les copeaux de bois de frêne. En raison de la richesse en nutriments des grains de seigle, ceux-ci sont utilisés après la phase sur gélose. Leur colonisation permet d'obtenir un volume d'inoculum plus important afin d'accélérer la vitesse de colonisation d'un substrat moins riche comme les copeaux de frêne.

Le choix d'utilisation des copeaux de frêne comme substrat de croissance repose sur leur compatibilité de croissance avec les Pleurotes en huître, mais surtout sur leur grande disponibilité à faible coût à Montréal qui permet l'intégration de ce projet dans le principe de l'économie circulaire. En effet, *Agrilus planipennis*, plus communément connu sous le nom d'agrile du frêne, est un insecte envahisseur présent à Montréal depuis 2011, mais qui serait arrivé d'Asie autour des années 90 (Gouvernement du Canada, 2023). Comme il n'a pas de prédateur en Amérique, il se propage à vitesse grand V dans les populations de frêne vierges de la région. L'une des faiblesses additionnelles de la Ville de Montréal face à cet envahisseur est la grande proportion de frêne qui compose la canopée de l'île. Comme l'agrile du frêne ravage environ 99% de la population de frêne d'un territoire sur 10 ans, la Ville de Montréal ne parvient pas à maintenir un rythme de traitement de ceux-ci au TreeAzin assez soutenu pour sauver la population (Thompson, 2013). De nombreux frênes meurent et restent debout 2-3 ans avant d'être abattus (Gouvernement du Canada, 2023). Ils ont donc le temps de sécher et craquer sur place ou de pourrir de l'intérieur ce qui n'en fait pas des arbres de qualité optimale pour l'industrie de la planche. Les frênes sont donc transformés en copeaux de bois, mais les débouchés commencent à manquer. Leur utilisation comme substrat de croissance pour le mycélium afin de fabriquer des panneaux isolants ou d'autres objets créerait donc une débouchée locale en économie circulaire.



Figure 1.14 Substrats de croissance utilisés a) Copeaux de frêne b) Grains de seigle

### 1.11 Laine de verre

La laine de verre ou la fibre de verre est un type d'isolant grandement utilisé dans l'industrie qui a fait ses preuves au fil du temps. Lors de sa fabrication, le verre doit être chauffé jusqu'à environ  $1450^{\circ}\text{C}$  afin d'obtenir une texture similaire à de la laine en raison de la température de fusion du verre qui est de  $1227^{\circ}\text{C}$  à pression atmosphérique normale. La laine de verre est composée de 56% de silice et de 44% d'oxygène. La littérature fait état d'une conductivité thermique de  $0,03 \text{ W/mK}$ , d'une densité de  $20 \text{ kg/m}^3$ , d'une résistance maximale à la compression de  $0,02 \text{ MPa}$  et d'une capacité thermique de  $840 \text{ J/gK}$  (Material Properties, 2021). Les avantages de ce matériau sont son faible coût, sa grande compressibilité lors du transport et de l'entreposage ainsi que sa capacité à reprendre sa forme initiale après sa sortie de l'emballage. En revanche, son principal inconvénient réside en son temps de décomposition au dépotoir à la fin de sa vie utile qui peut être très longue si on fait un parallèle avec le temps de décomposition du verre en général qui est de 4000 ans.



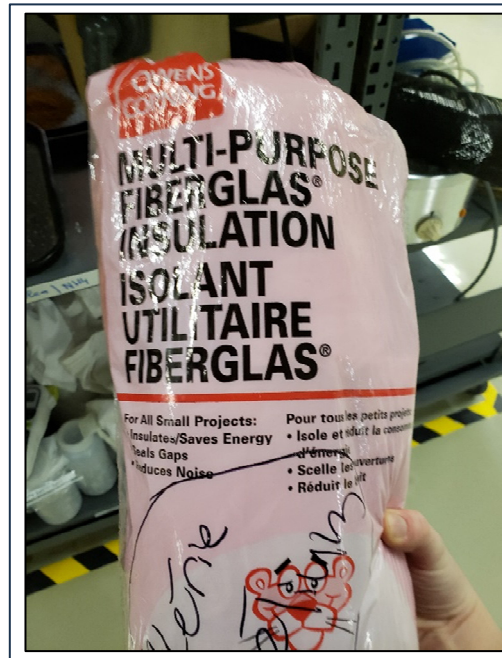


Figure 1.15 Laine de verre utilisée pour les essais de caractérisation

### 1.12 Laine de chanvre

La laine de chanvre est un isolant majoritairement biosourcé qui a été développé par la firme Nature Fibres basée à Val-des-Sources au Québec. Ce matériau récemment introduit dans l'industrie ne possède pas encore autant de données littéraires établies comme c'est le cas pour la laine de verre. Les panneaux sont composés de fibres de chanvre à 92 % et de 8 % de polyester qui sert de liant. La compagnie fait état d'une conductivité thermique de 0,040 W/mK, d'une capacité thermique de 30 kg/m<sup>3</sup>°C, d'une densité de 35 kg/m<sup>3</sup> et d'un classement au feu de niveau E pour leur matériau de laine de chanvre. Aussi, selon l'épaisseur du panneau (2,5 po jusqu'à 8 po), la valeur R de ceux-ci passe de R9 jusqu'à R30 (Naturchanvre, s.d.). En revanche, un des inconvénients mis de l'avant par les consommateurs est le faible niveau de compression des panneaux de chanvre dans les emballages de transport en raison de son incapacité à reprendre sa forme par la suite. Pour une même quantité d'isolant, le volume occupé lors de l'entreposage est beaucoup plus considérable, ce qui arrête certains lors du choix de l'isolant à utiliser.





Figure 1.16 Panneau de laine de chanvre 3 ½ po



## CHAPITRE 2

### PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE ET MÉTHODOLOGIE

Comme ce projet de recherche véhicule des valeurs de réutilisation, d'économie circulaire et d'achat local, celles-ci ont été prises en compte lors du choix des matériaux et du matériel à utiliser pendant la phase de croissance du mycélium ainsi qu'au niveau de leur provenance. La souche de *Pleurotus ostreatus* utilisée provient du CCTT Biopterre à La Pocatière tandis que le substrat de culture, des copeaux de bois de frêne, provient directement du Service des grands parcs, du Mont-Royal et des sports de la ville de Montréal. Dans le cas des contenants utilisés pour la croissance du mycélium sous forme de briques, ce sont des boîtes d'embouts de pipette P1000 auxquelles une 2<sup>e</sup> vie leur a été donnée grâce au personnel du laboratoire de microbiologie de l'hôpital Santa-Cabrini dans l'est de Montréal. En ce qui concerne la phase de caractérisation des propriétés isolantes du mycélium de *Pleurotus ostreatus*, toutes les analyses effectuées sont réalisables directement à l'ÉTS.

#### 2.1 Croissance du mycélium de *Pleurotus ostreatus*

Afin d'assurer la pureté et de prévenir la contamination du matériau bioformé, de nombreuses précautions doivent être prises tout au long de la phase de croissance. En effet, toutes les manipulations sont effectuées sous une hotte à flux laminaire qui possède un filtre Hepa fonctionnel et dont la ventilation et les UV ont été allumés au moins 15 minutes avant l'utilisation. Il est aussi nécessaire de désinfecter à l'alcool 70% toutes les surfaces internes de la hotte ainsi que tous les éléments qui franchissent la vitre de celle-ci.

Afin de déterminer la température de croissance optimale de la souche de mycélium utilisée, des essais de calorimétrie isotherme ont été effectués à 20, 25 et 30°C sur copeaux de frêne pendant 14 jours pour 2 g de copeaux de frêneensemencés avec 100 µL d'un inoculum de mycélium liquide de *Pleurotus ostreatus*. Les courbes de flux de chaleur et de chaleur totale obtenues vont permettre de déterminer la température optimale de croissance de la souche afin d'avoir une croissance rapide et d'intensité maximale.

En ce qui concerne la souche de *Pleurotus ostreatus* NSP1 fournie par Biopterre, elle a été cultivée sur géloses à 25°C sur des milieux de culture Sabouraud-Chloramphénicol préparés précédemment. Dans le cas des substrats de culture (les grains de seigle et les copeaux de bois de feuillus provenant du service d'arboriculture de la ville de Montréal), ils ont été préalablement réhydratés à l'eau distillée 24 heures jusqu'à atteindre un taux d'humidité élevé dans le but de favoriser la croissance du mycélium. Dans le cas des grains de seigle, leur hydratation avant leur stérilisation permet aussi la germination des endospores qu'ils contiennent. Une fois les endospores germées, ceux-ci sont plus vulnérables à la stérilisation que lorsqu'ils sont seulement sous forme de spores recouvertes de leur enveloppe protectrice. Par la suite, ils ont été stérilisés à l'autoclave pendant 40 minutes à 121°C, temps de stérilisation optimal déterminé après quelques essais, afin d'éviter la présence de contaminations indésirables. L'inoculation de *Pleurotus ostreatus* sur les grains de seigle se fait selon un ratio volumique 1 :10 à partir des géloses Sabouraud-Chloramphénicol. Il est important que le substrat ait refroidi jusqu'à atteindre environ la température pièce afin d'éviter de faire mourir la souche de mycélium dès son inoculation en raison du choc thermique fatal. Après environ 14 jours d'incubation à 25°C avec 80% d'humidité dans des sacs de culture munis de filtre Hepa 0,5 µm, où lors de l'obtention d'une colonisation intégrale de la part du mycélium, les grains de seigle colonisés par le mycélium ont subi une autre dilution 1 :10 dans des copeaux de frêne encore vierges. Ceux-ci ont été préalablement stérilisés et refroidis avant d'être incubés pour un autre 14 jours à 25°C dans des sacs de culture. Lorsque la colonisation des copeaux semble intégrale, les sacs sont mélangés et de la farine a été ajoutée comme stimulateur de croissance avant d'être moulée dans les contenants d'embouts de pipettes P1000 de 10 cm x 9 cm x 7,6 cm et compactée à main. Les moules ont été recouverts de pellicule plastique perforée à quelques endroits, afin de permettre au mycélium de respirer, mis dans les sacs de culture avec filtre Hepa et incubés 14 jours à l'étuve à 25°C. Le tout est représenté sous forme de schéma à [l'Annexe II](#).

Le poids des briques obtenues a été mesuré avant et après leur passage au four à 80°C dans le but d'inactiver et d'arrêter la croissance du mycélium. Ceci a permis la mesure du taux d'humidité moyen contenu dans les briques. Le passage au four permet maintenant la conservation des briques de mycélium à température pièce à long terme sans que celles-ci se dégradent ou poursuivent leur croissance. Les briques deviennent donc un matériau inerte.

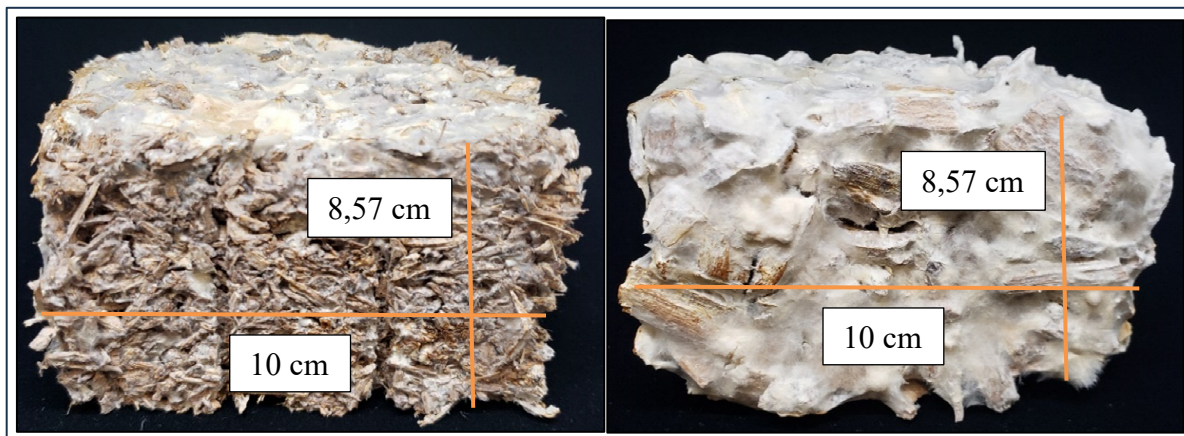


Figure 2.1 Échantillons obtenus pour a) copeaux fins et b) copeaux moyens

En ce qui concerne la gestion des déchets biologiques, toutes les matières jetables ayant été en contact avec le mycélium de *Pleurotus ostreatus* devront être placées dans des sacs autoclavables portant l'indication Biohazard et être autoclavées avant de pouvoir être éliminées selon le processus de gestion des déchets inoffensifs du laboratoire. Les instruments et les contenants réutilisables ont été soigneusement lavés et désinfectés à l'alcool 70% dès la fin de leur utilisation. Des images illustrant le processus de croissance sont présentes à l'[Annexe I](#), tandis que l'[Annexe II](#) présente le protocole de croissance sous forme de schéma.

## 2.2 Caractérisation du mycélium de *Pleurotus ostreatus*

Diverses analyses de caractérisation ont été effectuées en parallèle sur le matériau expérimental à base de mycélium, la laine de chanvre et la laine de verre afin de caractériser leur potentiel d'utilisation comme isolant thermique. La laine de verre étant le contrôle positif/valeur de référence de cette expérimentation tandis que la laine de chanvre sert de comparatif entre deux matériaux biosourcés. Des essais de caractérisation pour les trois matériaux énumérés ci-haut ont été effectués au niveau de la conductivité thermique, la résistance à la compression, le

volume réel du matériau, la porosité du matériau, l'observation de structures au microscope optique et au microscope électronique à balayage ainsi que la transmission et l'absorption du son.

En ce qui concerne la conductivité thermique, celle-ci a été déterminée à l'aide de l'appareil Trident de la compagnie C-Therm. Le capteur MTPS, source en plan transit modifiée, a été utilisé. Cette méthode est conforme à la norme ASTM D7984. Comme les échantillons à analyser sont quelque peu hétérogènes, la surface la plus lisse et uniforme de ceux-ci a été positionnée sur le capteur MTPS afin d'obtenir une meilleure surface de contact. Trois prises de mesure de conductivité thermique ont été effectuées à 1 minute d'intervalle pour chacune des positions analysées. La conductivité thermique de chaque matériau a été analysée en triplicata dans le sens des fibres et de façon perpendiculaire aux fibres à température pièce. L'étalonnage du capteur a préalablement été réalisé à l'aide du matériau LAF6720C fourni par C-Therm en raison de sa conductivité thermique similaire à celle attendue pour les matériaux analysés.

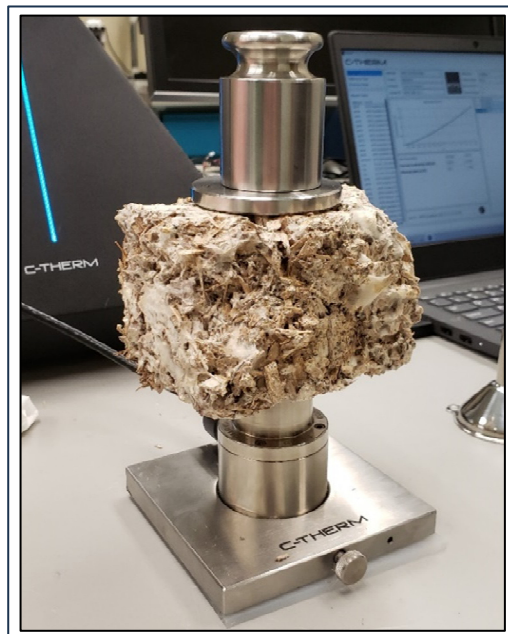


Figure 2.2 Schéma du montage utilisé lors de la prise de la conductivité thermique pour le matériau expérimental à base de mycélium à l'aide du capteur MTPS de l'appareil C-Therm



Pour ce qui est de la résistance à la compression, l'épaisseur des échantillons a été préalablement mesurée. Par la suite, l'appareil utilisé, le MTS Alliance RF/200, a été programmé de façon que la compression arrête lorsque l'épaisseur du matériau est rendue à la moitié de sa taille initiale. La vitesse de compression utilisée est de 2 mm/s. Pour la laine de verre et la laine de chanvre, un morceau de carton est apposé entre la tête de compression et le matériau afin de distribuer la force appliquée sur toute la surface de ce dernier. Dans le cas des échantillons de mycélium, c'est plutôt une plaque de métal qui est apposée afin de résister à la force plus élevée qui sera nécessaire à leur compression. Celle-ci applique une force de base de 12,5 N sur les échantillons testés. La tête de compression de 100 N a été utilisée pour la laine de verre, celle de 1000 N a été utilisée pour la laine de chanvre tandis que la tête de compression de 200 kN a été nécessaire pour le matériau expérimental à base de mycélium. L'appareil génère en temps réel la force nécessaire à la compression en fonction du temps afin de maintenir une vitesse de compression de 2 mm/s. Le retour des matériaux à leur forme initiale après l'arrêt de la compression n'a pas été quantifié. En revanche, la capacité d'un matériau à retrouver sa forme après compression est une propriété intéressante afin de réduire l'espace occupé lors du transport et de l'entreposage.



Figure 2.3 Schéma du montage pour la compression du matériau à base de mycélium sur l'appareil MTS Alliance RF/200

Le volume réel de solides des matériaux ainsi que la densité réelle ont été déterminés à l'aide d'un pycnomètre à gaz à l'hélium. La taille des échantillons a été réduite afin qu'ils rentrent dans les cellules de l'appareil avec l'objectif que les triplicatas d'un même matériau soient de poids similaire. Chaque échantillon a donc été pesé avant l'analyse afin de fournir la masse de celui-ci au pycnomètre à gaz pour l'analyse pour un échantillon de type monolithe. L'analyse a été faite à 23°C et à une pression de 20 psi (6,89 kPa). Le cycle de mesure incluait une purge de la chambre jusqu'à atteindre une pression nulle afin d'éliminer tout autre gaz qui aurait pu être présent. Trois mesures ont été prises pour chaque échantillon à 10 minutes d'intervalle et l'analyse a été effectuée en triplicata pour chacun des matériaux. La chambre interne de 135 cm<sup>3</sup> a été utilisée les échantillons de mycélium tandis que la chambre de 50 cm<sup>3</sup> a été utilisée pour les échantillons de laine de verre et de laine de chanvre.

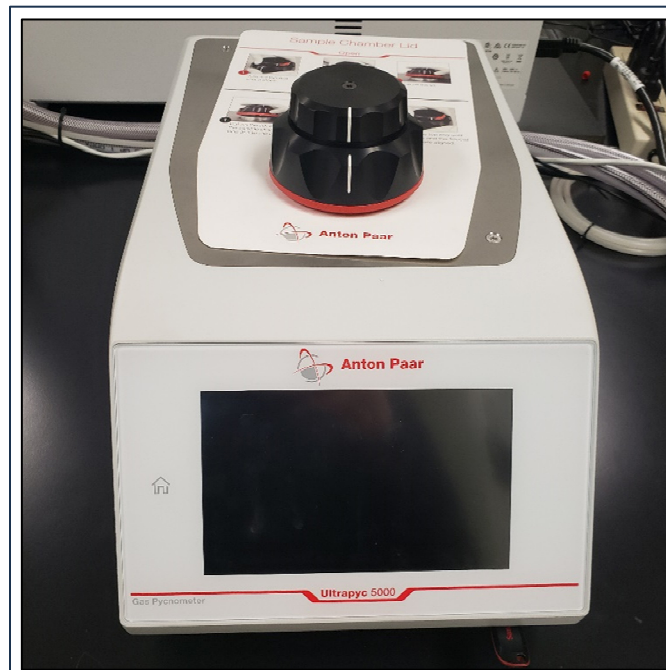


Figure 2.4 Appareil Ultrapyc 5000 utilisé pour la mesure du volume réel et de la densité des trois isolants à l'étude

Afin de pouvoir calculer la porosité des matériaux (voir équation 7), le volume des vides a été déterminé par la méthode d'absorption de fluides. De l'huile végétale a été utilisée en raison de la nature organique de 2 des 3 matériaux dont la nature et la forme auraient été affectées si



le fluide absorbé avait été de l'eau. Chaque échantillon a été mis sous vide 2 heures avant l'ajout du fluide de façon à les submerger. Par la suite, les échantillons submergés ont été maintenus sous vide 24 heures afin de laisser le temps à l'huile de combler les pores préalablement remplis d'air. Le vide a ensuite été brisé et le surplus d'huile a été égoutté avant la pesée finale des échantillons. Le volume des pores a ensuite été calculé avec la masse volumique de l'huile à la température de l'analyse et la différence des volumes.



Figure 2.5 Système utilisé pour la mise à vide des échantillons d'isolant afin de déterminer le volume des pores

L'observation aux microscopes optique et électronique à balayage des matériaux a permis d'obtenir diverses perspectives des échantillons à l'état microscopique. L'observation au microscope optique a eu lieu directement sur lame sans aucune préparation ou coloration préalable des échantillons. Dans le cas du microscope électronique à balayage, comme aucun des matériaux à analyser n'est naturellement conducteur, un enrobage préalable de ceux-ci avec une pellicule d'or a été nécessaire à 30 mA pendant 2 minutes. Ensuite, l'apposition d'un ruban de cuivre entre l'échantillon et la tête d'analyse est essentielle afin de faire dévier les électrons secondaires et ainsi obtenir une image claire. L'appareil utilisé est le Hitachi S3600-N SE. Autant d'images que voulu peuvent être prises à divers grossissements.

En ce qui concerne l'analyse de la transmission et de l'absorption du son, des tubes à impédance de la compagnie Mecanum Inc ont été utilisés. Celui de 100 mm de diamètre a servi pour les mesures de la laine de verre et la laine de chanvre tandis que celui de 44,5 mm a permis de prendre les mesures pour le matériau à base de mycélium en raison de la taille des échantillons qui étaient trop petits pour combler totalement le tube de 100 mm. Les échantillons ont été ajustés le plus possible aux tubes à impédance afin d'éviter les fuites d'air qui biaisent les résultats. L'excitation a été effectuée à 100 dB selon un système de captation à trois microphones.

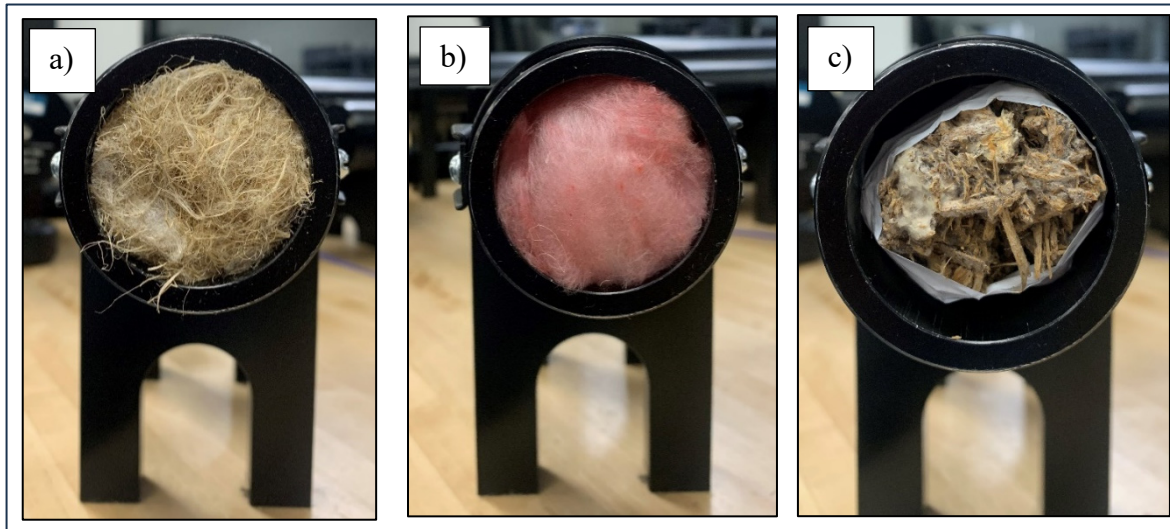


Figure 2.6 Schéma de montage dans les tubes à impédance des échantillons de a) Laine de chanvre, b) Laine de verre et c) Mycélium fin

Dans le cas de l'analyse du mycélium et des copeaux de frêne par spectrométrie FTIR, le mode d'analyse choisi est la réflexion totale atténuée (ATR). L'analyse a lieu en transmittance pour les nombres d'onde allant de  $4000\text{ cm}^{-1}$  à  $400\text{ cm}^{-1}$  avec une résolution de  $4\text{ cm}^{-1}$  pour un total de 10 numérisations consécutives compilés sous forme de courbe moyenne. Le blanc est fait en laissant le cristal exposé à l'air lors d'une numérisation en mode « Background ». Par la suite, l'utilisation de l'option « Preview » permet d'ajuster le contact entre l'échantillon et le cristal. La cible à atteindre pour un contact optimal est lorsque le chiffre 80 apparaît à l'écran (nombre sans unité inhérent à la calibration de l'appareil). Après l'obtention du spectre, la ligne

de base peut être manuellement ajustée à 100% de transmittance. Dans le cas du bois, il est possible de le compresser à l'aide d'une presse afin de comparer les résultats.

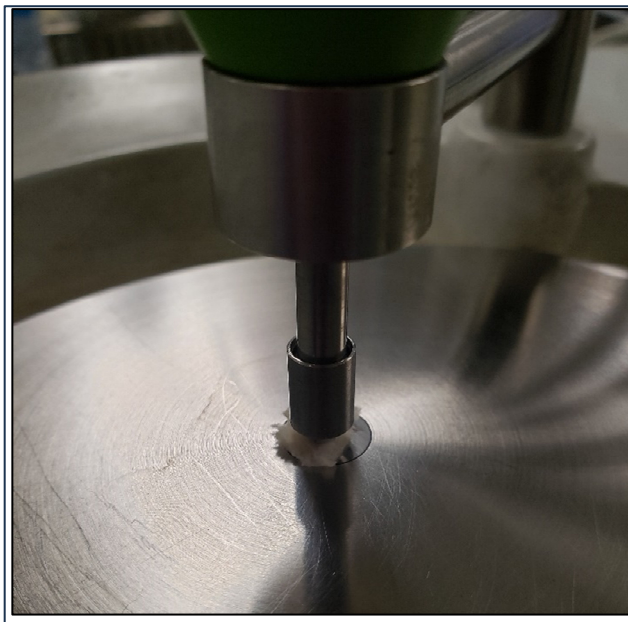


Figure 2.7 Échantillon de mycélium de *Pleurotus ostreatus* en contact avec le cristal du FTIR

Finalement, dans le cas de l'analyse thermogravimétrique, un volume d'échantillon jusqu'à 2 mm x 2 mm x 2 mm peut être mis dans la cuvette d'analyse. Ladite cuvette vide sert de zéro pour la balance interne de l'appareil avant l'ajout de l'échantillon. Une fois la masse de l'échantillon stabilisée, l'analyse peut être lancée. La méthode d'analyse utilisée implique une atmosphère d'air pour une gamme de températures allant de 30°C à 900°C pour le frêne vierge avec une augmentation de la température à un rythme de 10°C/min et un débit d'air de 50 mL/min. La prise des mesures est effectuée chaque seconde pour un total de 5220 points. Dans le cas du mycélium et du frêne recouvert de mycélium, seule la température maximale a été réduite à 700°C en fonction des résultats obtenus pour le frêne vierge. La dérivée de la courbe obtenue permet de quantifier les composés présents dans le matériau en fonction de l'aire sous la courbe.



## CHAPITRE 3

### **Multi property characterization of an experimental material composed of *Pleurotus ostreatus* mycelium and ash wood chips compared with glass wool and hemp wool**

Valérie Grenon <sup>a</sup>, Wahid Maref <sup>a</sup>, Claudiane M. Ouellet-Plamondon <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,  
1100 rue Notre-Dame O. Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

Article soumis pour publication à Construction and Building Materials, juin 2023

**Abstract** Biomaterials have a lot of potential for the construction industry because of their small environmental footprint and their regenerative capacity. Hemp is currently used as an insulation material in construction. The uniqueness properties of mushroom mycelium allow it to be used as a plant fiber binder in the design of bio-based insulation boards with white ash chips as aggregates. The goal of the present study is to design an organic material that will be 100% compostable at the end of its useful life while being biologically inactive. The material is composed of the mycelium of *Pleurotus ostreatus*, an edible fungus grown on rye grains and white ash chips. The objectives are to develop an experimental protocol for the culture of the material and to characterize it in comparison to glass wool and hemp wool, which are two proven insulators. Once the desired shape is obtained, the mycelium is inactivated by heat. The compressive strength, the conductivity, the thermal effusivity, the volume and the density, the thermal mass capacity and the acoustic properties were measured. The stress resistance was found to be up to 1330 times higher for the experimental material (Medium mycelium) than for glass wool; the thermal conductivity was between 0.0313 and 0.0379 W/(mK) for all materials; the porosity was greater than 75% for all materials and the  $\alpha$  coefficient varied between 0.8 and 1 for sound absorption. Mycelium materials have properties that need to be studied in greater details.

**Keywords:** Mycelium, thermal insulation, *Pleurotus ostreatus*, biomaterial, binder, thermal conductivity

### 3.1 Introduction

Biomaterials are highly promising and attractive thanks to their very low carbon footprint and their ability to store CO<sub>2</sub> through the photosynthesis process for materials with plant based component. The costs associated with their transportation are significantly reduced by recycling forest and agricultural residues locally. Mycelium is an excellent binder for plant fibers, with an unlimited growth capacity in the presence of nutrients and favorable conditions (25°C and 80% humidity). Its ability to assume a desired shape and to be inactivated by heat only increases its potential uses. It is indeed reported in the literature that its thermal conductivity is comparable to that of commercial insulation materials such as glass wool (Elsacker et al., 2019).

*Mycelium* is the name of the underground part of mushroom plants one sees during a walk in the forest. It develops in the form of a strongly interconnected network, akin to a network of neurons, and serves as roots for mushrooms. The full mycelium network is referred to as a thallus. It initiates from a central point, corresponding to the original germinated spore, and grows in all directions, in search of nutrients. Mycelium is the vegetative structure of the fungus, and with the help of enzymes, degrades organic matter present in the soil, at the ends of its hyphae, before absorbing it. When conditions are right, the mycelium develops its reproductive structure (the sporophore), which is macroscopically visible, and realise spores. This reproductive organ is the fruit that is found in grocery stores. The spores are present in the interlamellar space, under the cap of the mushroom, and are dispersed by the wind, ensuring the reproduction of the organism (Tortora et al., 2017). Mycelium grows indeterminately, meaning that its growth, either in size or in density, only stops when there are no more nutrients available. Therefore, if it is introduced to a given area, mycelium will grow to fill up the entire void space, for as long as nutrients are present, and the growing will only stop when voids are fully embedded in even the smallest cracks. This has the effect of binding all the elements together (Willis, 2018).

Fungi can decompose all kinds of organic matter according to the specificity of each and every one. They are called saprotrophic organisms. As they grow naturally in Quebec south territory, their ideal growth temperature is around room temperature. Also, the fungus does not need a lot of water and light for their growth, because they do not photosynthesize. Their diversity has just been discovered. Given the large number of different species, it is important to choose one that is suitable for the chosen growth substrate as well as to ensure that the fungus species chosen is not pathogenic to humans given its intended use (Moore et al., 2020). Fungi are also used in many spheres of industry such as food and pharmaceutical (Aly et al., 2011).

Since 2011, the city of Montreal has been grappling with an endemic plant pathogen that affects *Fraxinus americana* (white ash), which composes an important part of the canopy of its territory. This plant pathogen is the emerald ash borer (*Agrilus planipennis*). This insect originated from Asia and it is believed to have arrived in America by boat in the 1990s via wooden shipping pallets (Government of Canada, 2013). After 10 years, it causes mortality in nearly 99% of the white ash it has infected (Thompson, 2013). As a result, the quantity of dead ash trees in Montreal is very high and forestry crews are slow to cut them down, making their condition less attractive to the wood board industry. They are transformed into wood chips, but the chip industry is severely lacking in opportunities despite their low cost. That is why ash is a good substrate to use for bio-sourced material who come from circular economy.

Another local issue is the large amount of waste generated by the construction industry. Indeed, many materials used by the industry end up in landfills, where they last for years on end due to their synthetic nature (Dubé, 2022). That is the case with insulation materials such as glass wool, which take hundreds of years to degrade. The creation of insulating panels from ash chips, for which the industry lacks outlets, allows to reduce the quantity of waste, in addition of revalorizing organic matter present locally that was previously destined for composting. On the other hand, a binder is necessary to maintain the cohesion of the fibers composing the panels. The use of a synthetic binder would not be beneficial for the environment. The mycelium of the fungus *Pleurotus ostreatus* was therefore chosen as a binder to allow complete decomposition of the panels relatively quickly at the end of its useful life. This species was

chosen because it has a saprotrophic growth on hardwood and is not harmful to humans. Because the mycelium has an indeterminate growth pattern, such as an extended neural network, it is easily able to bind all ash chips together (Willis, 2018).

The main goal of this study is to examine the potential of using wood chip from residues bound together by fungal mycelium in designing bio-based insulation boards. Specifically, the objectives are to develop an experimental protocol for growing *Pleurotus ostreatus* mycelium up to the point where it can be molded into the desired shape (panels), and then to characterize the properties of the panels developed as compared to hemp and glass wools as a reference material. The hypothesis is that materials made of white oak bonded by mycelium have thermal properties comparable to those of hemp wool.

This study is divided into two parts. Firstly, a protocol for the cultivation of the mycelium of *Pleurotus ostreatus* is carried out in order to achieve the desired material based on vegetable fibre and mycelium. The experimental material is then compared to glass wool, a proven insulator, as well as to hemp wool, which is a relatively new type of insulation on the market, and which is also a bio-based material. The properties measured are the compressive strength, the thermal conductivity, the volume, the volumetric mass, and the porosity. This work is intended to be a proof of concept which will provide first reference values to continue the research. The strain and the material properties of the mycelium can subsequently be optimized. Optimization of growing conditions, the substrate-fungus mix and material stability over time are not addressed in this study.

### **3.2 Material and methods**

A 38 mm glass wool panel was procured from Owens Corning to be used as a reference material and positive control for the analysis (Owens Corning, 2021). A 90 mm thick hemp wool panel from Nature Fibres was also used as comparative to mycelium panels because of its bio-source constitution. The experimental material developed, composed of *Pleurotus ostreatus* mycelium as binder of vegetal fibers of white oak, so can be compared to a synthetic proven insulator and a bio-sourced insulator.



### 3.2.1 Mycelium growth

*Pleurotus ostreatus* mycelium was grown on Sabouraud-chloramphenicol agar, which was prepared at the ÉTS STEPPE laboratory, at 25°C for 10 to 14 days after isothermal calorimetry tests determined this temperature to be optimal for growing of this mycelium-substrate combination. 20, 25 and 30°C were also tested as possible growing temperature (TA Instruments, 2020). This growth took place in glass vials containing 2 grams of ash shavings and 100 µL of *Pleurotus ostreatus* mycelium in liquid form. They were incubated at the required temperature for a minimum of 10 days, or until the total heat curve reached a certain plateau.

Organic rye grains were then hydrated for 24 hours before being sterilized for 40 minutes at 121°C and cooled for 1 hour in a laminar flow hood. When cooled, the rye was inoculated with *Pleurotus ostreatus* mycelium from agar plates at a 1:10 ratio and brought to the proper moisture content with sterile water before being incubated for a minimum of 14 days at 25°C, or until the grains were fully colonized.

Insecticide- and fungicide-free ash chips were hydrated for 24 hours before being sterilized for 40 minutes at 121°C and cooled for 1 hour in a laminar flow hood. When cooled, the ash chips were seeded at a 1:10 ratio with colonized rye grain, enriched with 3 tablespoons of unbleached flour and brought to the proper moisture content with sterile water before being incubated for 14 days at 25°C or until the chips were fully colonized. Figure 1 shows the growth of *Pleurotus ostreatus* after 5 days on ash chips.



Figure 3.1 Beginning of colonization of *Pleurotus ostreatus* mycelium on ash chips

When the wood shavings were fully colonized, they were mixed with 3 tablespoons of unbleached flour to stimulate mycelial growth. The shavings were placed densely in 12 cm x 7.6 cm x 9 cm culture molds that had previously been sterilized with 70% ethanol. The molds were covered with a plastic film with a few air holes and incubated for 14 days at 25°C, as shown in Figure 3.2.

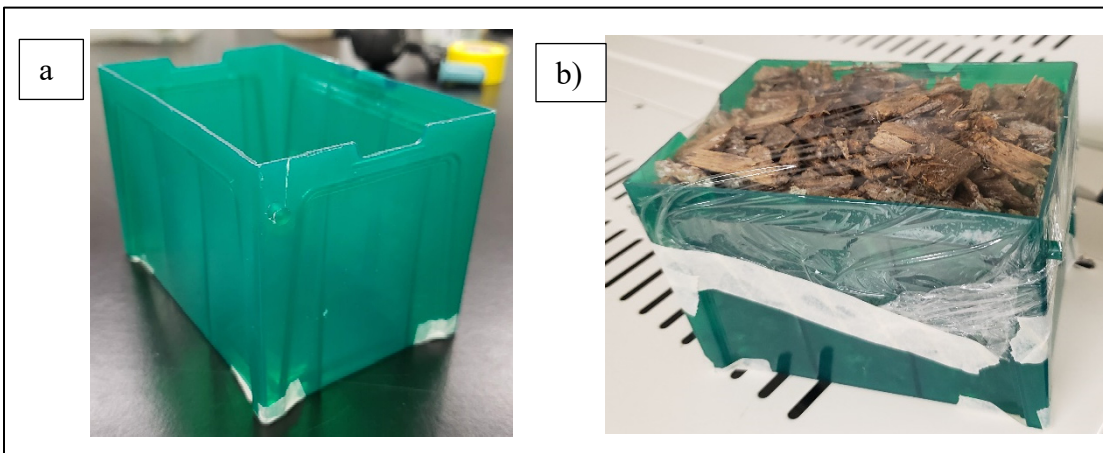


Figure 3.2 Shape of a mold: a) empty, b) full

When colonization of the chips in the desired shape and density was complete, the resulting bricks were unmolded and the growth of *Pleurotus ostreatus* mycelium was inhibited during a 24-hour period in an oven at 80°C (Elsacker, 2019). Samples composed of small particle size

ash chips, herein identified as Thin mycelium, and others with a slightly larger particle size, here identified as Medium mycelium, were prepared in a bid to compare the effects of density on insulation proprieties (Figure 3.3). These two different substrate particle sizes influence the rate of colonization of the substrate by mycelium.

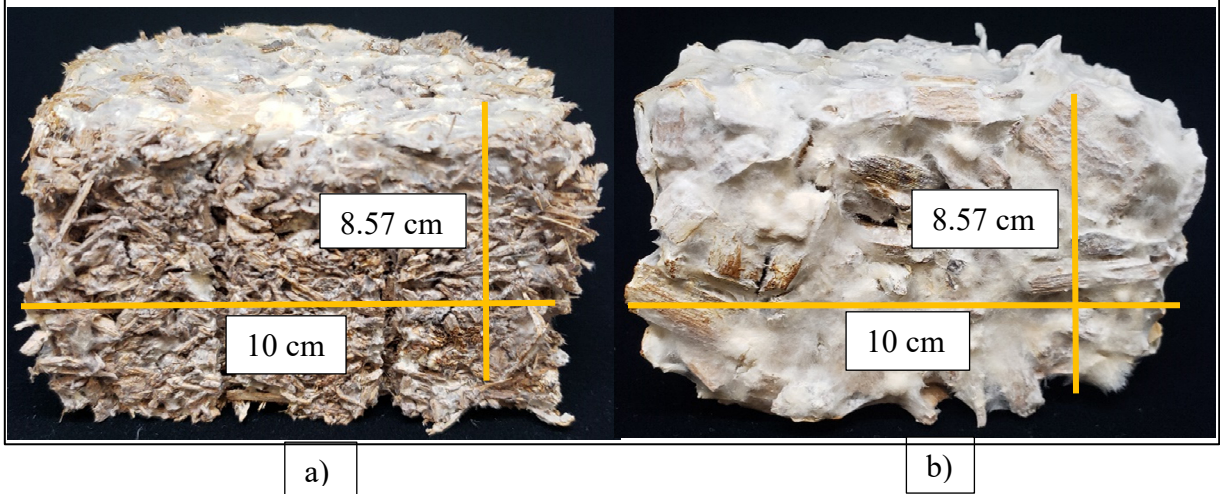


Figure 3.3 Final material obtained for: a) Thin mycelium, and b) Medium mycelium

### 3.2.2 Materials characterization

The characterization of the experimental mycelium-based material, glass wool and hemp wool took place in parallel for the different analyses described below. Glass wool was used as a reference material for insulating properties. Also, it allowed to validate the methods used by allowing comparisons with the ample data available in the literature about glass wool because of its large-scale use in the construction industry. Hemp wool, from Nature Fibres, was also chosen as a bio-based reference material because it is a commercially produced bio-sourced material. Where possible, analyses were performed in parallel for Thin and Medium mycelium. All analyses were performed in triplicate for repeatability.

First, the compressive strength was measured using an MTS Instron Alliance RF/200 device, which was used to perform real-time measurements of the force needing to be applied to compress the samples. The compression speed was set at 2 mm/s and stopped when the specimen was compressed to the height corresponding to half the initial specimen height. The compression head used was changed according to the force assumed for compressing each

material. The 100 N head was used for glass wool (height: 0.0762 m), the 1000 N head for hemp wool (height: 0.0762 m) and the 200 kN head for the mycelium-based material (height: 0.0857 m) (Alliance™ RF Materials Test Systems, 2004). In the case of glass wool and hemp wool, a cardboard plate was placed between the compression head and the sample to distribute the force over the entire available surface. For the mycelium-based material, a 12.5 N steel plate was used for the same purpose. Each material was tested in triplicate.

Secondly, the thermal conductivity was measured using a C-Therm Trident apparatus with the MTPS (modified transient plane source) sensor meeting the ASTM D7984 standard. Calibration of the device was done with the LAF6720C control material for low thermal conductivity in the insulating material range (TA Instruments, 2020). Measurements were taken in the direction of the fibres and perpendicular to the direction of the fibres; three such measurements were taken at one-minute intervals for each position and 3 different positions per material were tested. (Figure 4). The smoothest side of the samples was positioned on the MTPS sensor to allow for a better contact surface and therefore more accurate results. No contact agents were used. Effusivity values were generated at the same time as thermal conductivity values. When the samples were oriented perpendicular to the direction of the fiber, the height of the materials was 0.0762 m (7.62 cm) for hemp wool and glass wool vs 0.0857 m (8.57 cm) for Thin and Medium mycelium. When the samples were oriented in the direction of the fiber direction the thickness of hemp wool and glass wool was 0.0762 m and 0.01 m for Thin and Medium mycelium.

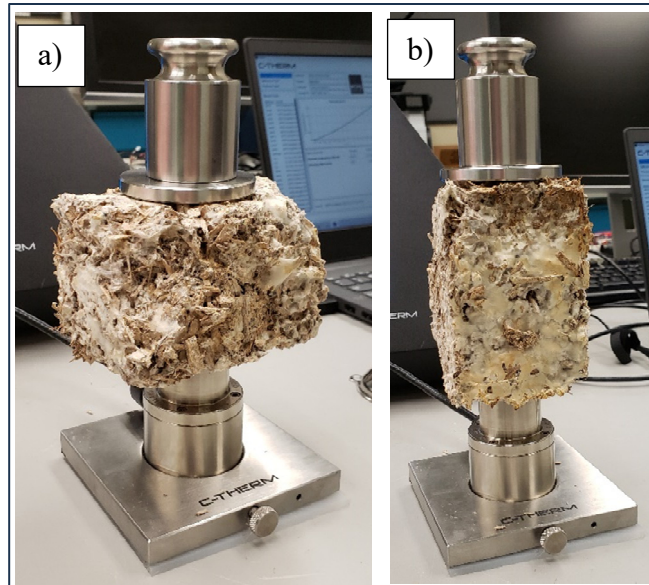


Figure 3.4 Thermal conductivity measurement set-up: a) perpendicular to fiber direction and b) in the direction of the fiber

In the field of construction, we often refer to the concept of thermal resistance (RSI value) which is expressed in  $m^2.K/W$ . The latter is the ability of a body to oppose the transfer of heat. Although the metric system (SI) is used in Canada, values given for building materials in North America are still often in imperial units, in which the ‘R-Value’ is expressed as  $ft^2.F.hr/Btu$ . It is a value that allows to quickly compare several types of insulation to one and others. It corresponds to the thickness of the insulating material used for the thermal conductivity analysis divided by the value of thermal conductivity  $\lambda$  obtained. The mean thickness and thermal conductivity values were used for each material.

$$RSI = \frac{\text{Insulation thickness (m)}}{\text{Thermal conductivity } \left(\frac{W}{mK}\right)} = \frac{m^2K}{W} \quad (1)$$

The thermal resistance value can be given in RSI (metric system-SI) or in R (imperial system-IP). The value in the imperial system is 5.6786 times greater than the corresponding value in the metric system. The higher the value of R or RSI, the better the ability of the material to delay temperature transfer between its two faces (Isolofoam, 2023).

$$R = RSI * 5.6786 (ft^2 \cdot ^\circ F \cdot hr/Btu) \quad (2)$$

Third, the actual volume and true density of the materials were determined using the Anton Paar Ultrapyc 5000 instrument. True density is ratio of mass/volume occupied by the mass when all the pores and internal voids volume are subtracted (Lowell, 2004). The enormous amount of air spaces contains in the voids requires accurate and precise measurement methods. The weight of the samples was determined beforehand, and 3 replicas of the same material were selected because of their similar weight. Three respective 10-minute measurement cycles took place for each sample at an internal pressure of 20 psi (6,89 kPa), and at a temperature of 23°C. Three samples were analyzed for each material, for a total of nine values/material. The gas used was helium for a «flow type» preparation method for monolithic type samples. The cells used to hold the samples were medium (50 cm<sup>3</sup>) for glass wool and hemp wool and large (135 cm<sup>3</sup>) for Thin and Medium mycelium (Anton Paar, 2023).

The mass heat capacity of a material is defined as the amount of heat (in Joules) it must absorb to cause a 1-degree Kelvin increase in its internal temperature. The mass heat capacity of the materials analyzed was calculated from the previously measured density, thermal conductivity and effusivity values where the mean values were used (Corriou, 1984). With values of thermal conductivity, thermal effusivity and density, it is possible to calculate the mass heat capacity of all the materials. The mass heat capacity is calculated from the effusivity equation (C-Therm, 2022):

$$E = \sqrt{k\rho C_p} \quad (3)$$

Since the effusivity (E), thermal conductivity (k), and density ( $\rho$ ) are known,  $C_p$ , which corresponds to the mass heat capacity, can be isolated as follows:

$$C_p = \frac{\sqrt{E}}{k\rho} \quad (4)$$

Next, the void volume was determined using the oil absorption technique. The three samples of each known mass and volumetric mass material previously used for the gas pycnometer analyses were put under a vacuum for 2 hours for the air to be removed from them. Characterization in this order was done after measures taken with the gas pycnometer because

of the changes oil absorption analyse causes to the integrity of the sample. The samples were then submerged in vegetable oil and put back under vacuum for 24 hours. The vacuum thus created allowed the oil to take the place of the air in the voids of the material. After 24 hours, the vacuum was broken, and the sample weighed after the excess oil was dripped off. By knowing the volumetric mass of the oil and the temperature of the part, the volume occupied by the oil within the porosities can be determined (Wang et al., 2016). The void volume was determined by subtracting the "sample + oil" weight at T24 from the "sample" weight at T0. Using the density of the oil at 23°C (the temperature at which the analysis was performed), the weight of oil absorbed by the samples was converted to volume (Sahasrabudhe et al., 2017). After that, the pore void volume ( $V_v$ ) and the solid volume ( $V_s$ ) allowed to determine the porosity ( $n$ ) of the material:

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{V_v}{V_T} \quad (5)$$

Finally, the acoustic properties were quantified using Mecanum Inc impedance tubes. Only the acoustic properties were not measured for the Medium mycelium because of the greater difficulty in shaping the sample in the impedance tubes without air leakage all around the sample. The 44.44 mm diameter tube was used for hemp wool, glass wool and Thin mycelium. The thickness of the sample inside the tube was 0.055 m for hemp wool, 0.035 m for glass wool and 0.070 m for Thin mycelium. Thin mycelium was coated with plumbing tape to prevent air leaks around the tube. This tube allows the material to be excited at frequencies up to 4300 Hz. Excitation took place at one end of the set-up by means of a microphone. Detection was done using a system with 3 microphones placed on both sides of the material to be analyzed (Koruk H, 2014; Mecanum 2023). The test was run 3 times for each material type, but in each case, the same specimen was removed and replaced to see the inherent variability. Since glass wool is the insulating material used as a reference in this study, it is important to know the literary values of this material for the different analyses performed in order to confirm or negate the accuracy of the values obtained for the other materials. The literature reports a thermal conductivity of 0.030 W/(mK), a density of 20 kg/m<sup>3</sup> (0.02 g/cm<sup>3</sup>) and a strength of 0.02 MPa (20 kPa) for glass wool (Material Properties, 2021).



### 3.3 Results and discussion

#### 3.3.1 Compression strength resistance

The mean maximum force applied for each of the materials presented in Table 3.1 in Newtons (N) and Area Stress (kPa) is obtained by analysis of three replicates of each material. Table 3.1 shows that the force required to compress the mycelium and ash chip is much greater than that required for glass wool and hemp wool. This is due mainly to their constitution of more than 90% of ash wood. In fact, if another aggregate were to be used with the mycelium binder, the compressive strength of the material would be completely different; comparing two materials composed of different aggregates, such as wood and hemp, is rather difficult. The use of wood fibres as a substrate for the mycelium may be interesting for structural use, but a texture like wool is not possible to achieve. Because the compression force to be applied to a mycelium-based material is much higher than that needed for glass wool, which is an easily compressible material, the compressive capacity of the former is low.

Tableau 3.1: Mean compressive strength of the samples

<b>Material</b>	<b>Force (N)</b>	<b>Area (m)</b>	<b>Area Stress (kPa)</b>	<b>Standard Deviation (kPa)</b>
<b>Hemp wool</b>	5.4	0.0120	4.7	0.16
<b>Glass wool</b>	5.3	0.0156	0.3	0.03
<b>Thin mycelium</b>	2244	0.0077	261	31
<b>Medium mycelium</b>	3072	0.0077	399	28

The standard deviation is greater for the mycelium materials because of their experimental constitution (not shape by an industrial process). The bricks were compacted manually, which may explain the greater difference in compressive strength resistance seen between each sample. Industrially fabricated reference materials, such as glass wool and hemp wool, are compacted by a machine that always uses the same strength, which explains the lower standard deviation between the samples. The results for Thin mycelium approximate those obtained by Appels et al. (2019), with 0.25 MPa for *P. ostreatus* on straw.



### 3.3.2 Thermal conductivity and effusivity

The values obtained for each of the materials are illustrated according to the range obtained as well as their standard deviation, for thermal conductivity and for thermal effusivity, respectively. Figures 3.5 and 3.6 show the range of all the values obtained for each material, with “X” representing the mean value. For the thermal conductivity, the four materials analyzed have an average  $\lambda$  (thermal conductivity) value of less than 0.040 W/(mK) (Figure 5). The thermal conductivity measures the potential of a material to conduct energy (heat) from one of its sides to the other. As the French RT 2012 standard classifies materials with a  $\lambda$  value less than 0.090 W/(mK) as thermal insulators and the C-Therm analysis conforms with the ASTM C518, the 4 materials analyzed are all considered very good insulators (Molle et al., 2011; ASTM International, 2021). In comparison, copper, known to be a highly conductive metal, has a thermal conductivity of 398 W/(mK) (Mokhena et al., 2018). The thermal conductivity of Medium mycelium is similar to that of glass wool, which is excellent. On the other hand, it is important to add a caveat to the results obtained. Indeed, as the surface of the experimental material is quite heterogeneous, its contact with the MTPS sensor was perhaps not optimal despite the precautions taken. Measures for glass wool were not taken parallel to those of fibers because the sample cannot stay on the C-Therm apparatus in this position.

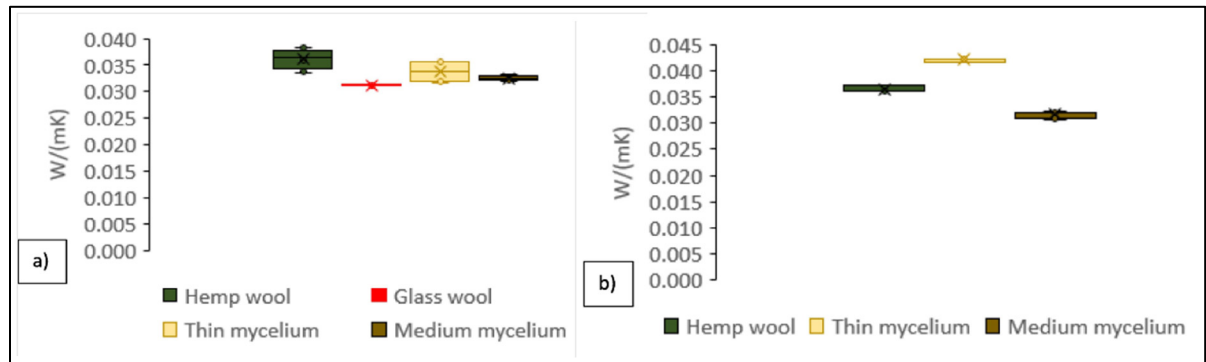


Figure 3.5 Thermal conductivity measure with MTPS sensor at room temperature a) perpendicular to fibers, and b) parallel to fibers

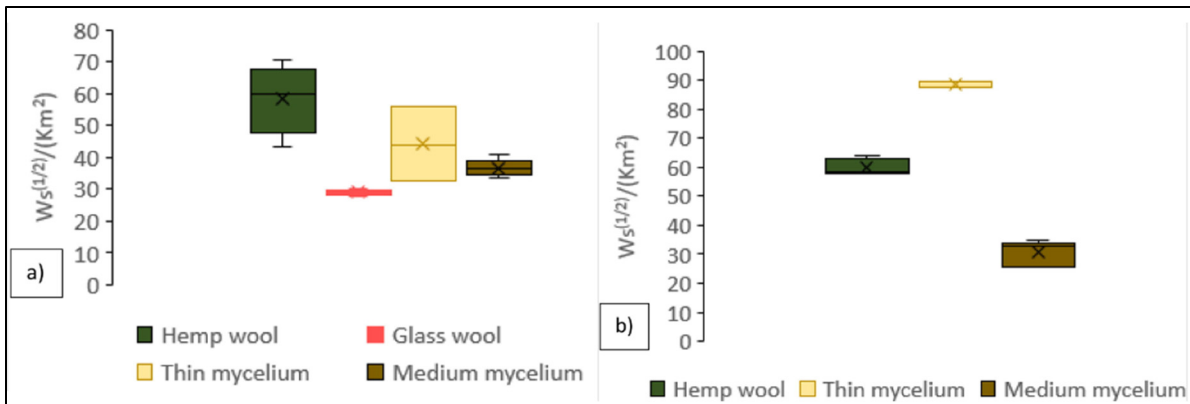


Figure 3.6 Thermal effusivity measure with MTPS sensor at room temperature a) perpendicular to fibers and b) parallel to fibers

A greater variation was obtained between the perpendicular thermal conductivity values measured for Thin mycelium and hemp wool, as compared to the other materials analyzed, for which the variation obtained between measurements was very small. The difference between the effusivity measurements was higher than those for thermal conductivity. On the other hand, the standard deviation between the measurements within each category was low. Some studies show greater values for thermal conductivity (0.078 to 0.081 W/(mK)), but in those, the substrate used is different, which may explain the gap (Xing et al. 2018).

As for the thermal effusivity (Figure 3.6), it shows the speed at which a material absorbs and then releases a quantity of energy in the form of heat. The lower the value, the more insulating the material is, due to its low heat absorption capacity. The insulating materials have a thermal effusivity value lower than 100  $Ws^{(1/2)}/(Km^2)$  while that of the copper, to take the previous example, is 37,000  $Ws^{(1/2)}/(Km^2)$  (Krapez, 2006). All the materials analyzed in this study have a low thermal effusivity, which allows them to be considered as insulators. The accuracy of the measurements obtained is dependent on the homogeneity and planarity of the material's contact surface with the MTPS sensor of the C-Therm Trident.

The thermal resistance of the insulation can be calculated from the thermal conductivity and the thickness of the material. This value, better known as the R-value, is widely used in the industry to indicate the level of insulation achieved. The higher the value, the better the

insulation. Table 3.2 summarizes the metric (R) and imperial (RSI) values obtained for each of the materials analyzed. Medium mycelium is the material with the best R-value. As a reminder, the R-value (IP unit) is equivalent to the RSI (in SI units) x 5.6789 as explained in the equations 1 and 2 in 2.2 Materials characterization section. The four materials are still competitive with one another, and the low standard deviation is an indication of the accuracy of the values obtained. In fact, 0.0313 W/(mK) was obtained as the thermal conductivity of glass wool, while the literature shows a value of 0.0300 W/(mK), thus validating the method.

Tableau 3.2: Heat resistance of different experimental materials

<b>Material</b>	<b>Thermal conductivity W/(mK)</b>	<b>Standard deviation W/(mK)</b>	<b>Thick-ness (m)</b>	<b>RSI factor W/(m<sup>2</sup>K)</b>	<b>R factor BTU/(ft<sup>2</sup>.°F.h)</b>
<b>Hemp wool</b>	0.0364	$1.11 \times 10^{-3}$	0.0762	2.1	11.9
<b>Glass wool</b>	0.0313	$1.10 \times 10^{-3}$	0.0762	2.4	13.6
<b>Thin mycelium</b>	0.0379	$2.35 \times 10^{-3}$	0.0857	2.3	13.1
<b>Medium mycelium</b>	0.0321	$3.31 \times 10^{-3}$	0.0857	2.7	15.3

### 3.3.3 Specific heat capacity

In Table 3.3, the thermal capacity of glass wool is much lower (0.057 J/(kg.K)) than that of hemp wool (0.143 J/kg.K), Thin mycelium (0.162 J/(kg.K)) and Medium mycelium (0.131 J/(kg.K)). Since a low thermal capacity is characteristic of a good insulator, glass wool ranks first among the materials analyzed in this study (Corriou, 1984). To maintain the same material as before as a negative control, copper has a mass heat capacity of 385 J/(kg.K) (Gchem, 2023). Therefore, the four materials analyzed above can be considered as insulators due to their mass heat capacity of less than 1 J/(kg.K) as compared to copper. Xing et al. (2018) obtained specific heat capacity between 0.369 to 0.501 MJ/(m<sup>3</sup>K) for other type of mushrooms on straw which can explain the difference.

Tableau 3.3: Specific heat capacity of different experimental materials (Equation 3)

<b>Material</b>	<b>Volumetric mass (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Thermal conductivity W/(mK)</b>	<b>Thermal effusivity Ws<sup>1/2</sup>/(Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Specific heat capacity J/(kg.K)</b>
<b>Hemp wool</b>	1480	0.0364	59.17	0.143
<b>Glass wool</b>	3020	0.0313	28.85	0.057
<b>Thin mycelium</b>	1330	0.0379	66.38	0.162
<b>Medium mycelium</b>	1380	0.0321	33.83	0.131

### 3.3.4 True density

The true density of the materials analyzed were measured to characterize the physical properties. The materials involved in this study are porous and irregular in nature. The true density values obtained for each of the materials are shown in Figure 3.7 below. Glass wool stands out from the other materials with an average true density value of about 3.0 g/cm<sup>3</sup> as compared to an average of 1.4 g/cm<sup>3</sup> for the other three materials. In the case of the mycelium and ash chip materials, the measured density is similar due to the same substrate used for the two types of material despite the difficulty to compact them similarly. The size of ash chip did not influence the density from our measurements. Again, the small standard deviations obtained between the measured density values testify the measurement accuracy of the method used. The mycelium density cannot be compared with other studies because it depends on a lot of type of substrates and on the compaction method used.

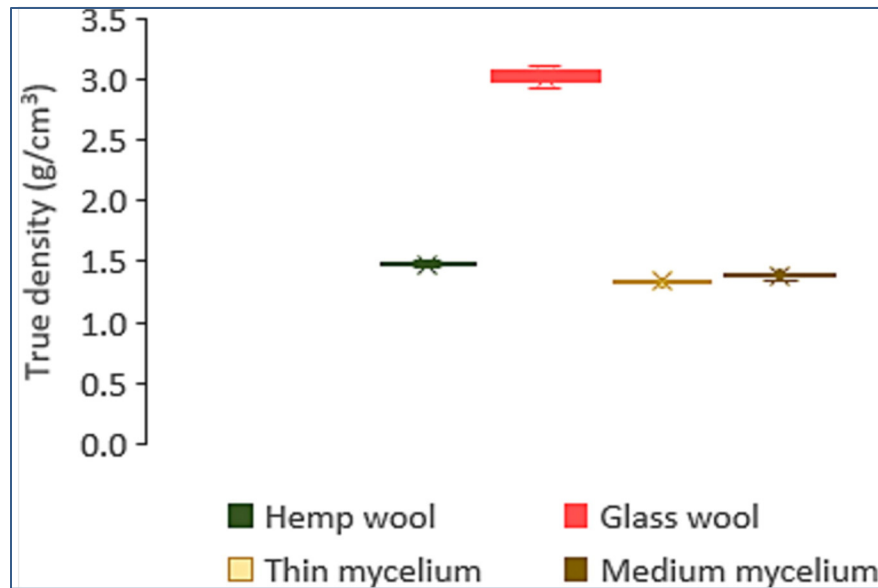


Figure 3.7 Average volumetric mass measured with a gas pycnometer

### 3.3.5 Porosity

The supplementary electronic materials (Appendice A du mémoire) explained the intermediate values used to determine the porosity of glass wool, hemp wool and Thin and Medium mycelium from the solid and void measurements with the gas pycnometer. Table 3.4 summarizes the values obtained for the true density and porosity. The equation 5 presented in the section 2.2 Material characterization was used for the calculus. The values obtain for porosity are 88 % for hemp wool, 99 % for glass wool, 78 % for Thin mycelium and 75 % for Medium mycelium. The greater porosity value for glass wool can be explain because of the finess of the glass fibers compare to the hemp fibers who are a little bit thicker. Same logic for the wood chips in mycelium materials that are bigger than hemp fiber and it is why the porosity value is smaller. In summary, porosity is inversely proportional to true density.

Tableau 3.4: Proportion of pore void volume to real surface volume of the material

<b>Material</b>	<b>True density (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosity (%)</b>
<b>Hemp wool</b>	1.48	88.2
<b>Glass wool</b>	3.02	99.0
<b>Thin mycelium</b>	1.33	78.4
<b>Medium mycelium</b>	1.38	75.2

### 3.3.6 Acoustic properties

Exploratory sound transmission and absorption measurements were conducted on 44.4 mm diameter samples. In the case of Table 3.5, the  $\alpha$  coefficient corresponds to the ratio between absorbed noise and total incident noise. It varies between 0 and 1, where 0 indicates total sound reflection and 1, total sound absorption (Siemens, 2021). The closer the value of the  $\alpha$  coefficient is to 1, the better the insulation on the acoustic side, due to greater sound absorption. The oscillation of values obtained with a greater amplitude at low frequencies and a smaller amplitude at high frequencies can be seen, especially in the case of Thin mycelium. Glass wool is the material with the lowest amplitude, with a coefficient of 0.99 at 1500 Hz and a slight decrease thereafter. In fact, the value of the  $\alpha$  coefficient for glass wool increases very rapidly up to 1500 Hz, and then stabilizes. Hemp wool also has a higher  $\alpha$  coefficient of 0.85 from 600 Hz to 4300 Hz, which, overall, is a good result. The oscillations of the values obtained are still greater than those of glass wool, but less than those of Thin mycelium.

The values obtained for Thin mycelium should be taken with some reservations, due to the inaccurate fit of the sample to the impedance tube wall used, despite the sample being wrapped in plumbing tape to reduce leakage (see Figure 3.8). Air, and therefore, sound leakage, have occurred for Thin mycelium, which distorts the results obtained and may be the cause of the wide amplitude variation and low mean  $\alpha$  coefficient before 1500 Hz.

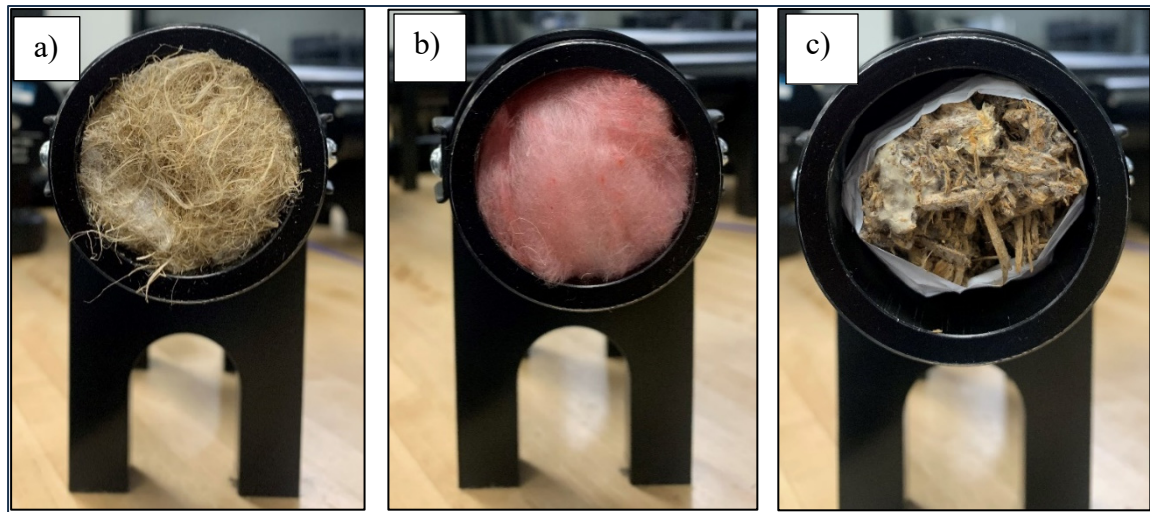


Figure 3.8 Impedance tubes stuffed with the insulation materials tested a) Hemp wool, b) Glass wool and c) Thin mycelium

To make the data used more representative of reality, the insulating materials studied should have been analyzed in sandwich form, with the other typical constituents of a wall partition. This would have allowed to obtain results representative of the interactions of the whole of the wall once in place in a typical environment. As values obtained depend greatly on the compaction of the samples and the substrate used, comparisons with other studies are difficult. For more information, see supplementary electronic materials (Appendice B et C du mémoire).

Tableau 3.5: Sound absorption coefficient  $\alpha$  of different materials as a function of frequency

<b>Material</b>	<b>Thickness (mm)</b>	<b>500 to 1500 Hz</b>	<b>1500 to 2500 Hz</b>	<b>2500 to 4300 Hz</b>
<b>Hemp wool</b>	55	0.40 – 0.95	0.85 – 0.95	0.85 – 0.99
<b>Glass wool</b>	38	0.40 – 0.95	0.95 – 0.99	0.95 – 0.99
<b>Thin mycelium</b>	70	0.65 – 0.99	0.75 – 0.93	0.82 – 0.90

### 3.3.7 Microscopy

Figures 3.9, 3.10 and 3.11 compare optic microscopy and SEM (Scanning Electronic Microscopy) images for the glass wool, hemp wool, and mycelium. A comparison can be done between the diameters of the fibers composing the different kinds of materials. In the case of glass wool, the fibers are around  $20\ \mu\text{m}$ , versus  $50\ \mu\text{m}$  for Hemp wool and  $3\text{-}4\ \mu\text{m}$  for mycelium. The  $50\ \mu\text{m}$  fibers of hemp appear to be a cluster of finer fibers stuck together in bigger fibers. Also, glass wool fibers are much smoother than those of hemp. For mycelium fibers, the small vesicles on the fibers seem to be the beginning of other ramifications of the network which will develop shortly. All images below are not on the same scale, so it is very important to refer to the scale for the estimation of the diameter of the fibers. For SEM, all dots on the scale refer to 1:10 of the number in the low right of image. For optic microscopy, the length of line on the image correspond to the number written under it.

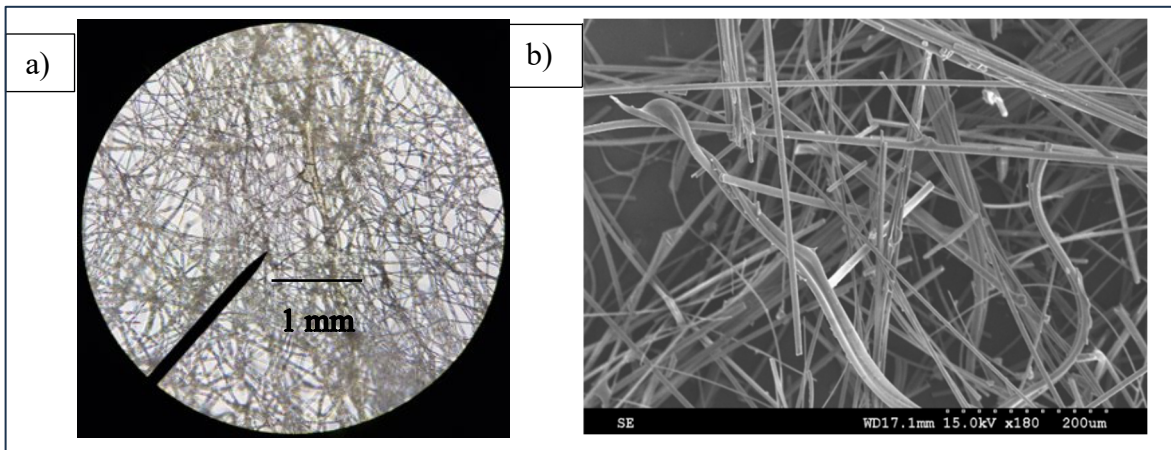


Figure 3.9 Glass wool in a) optic microscopy and b) SEM



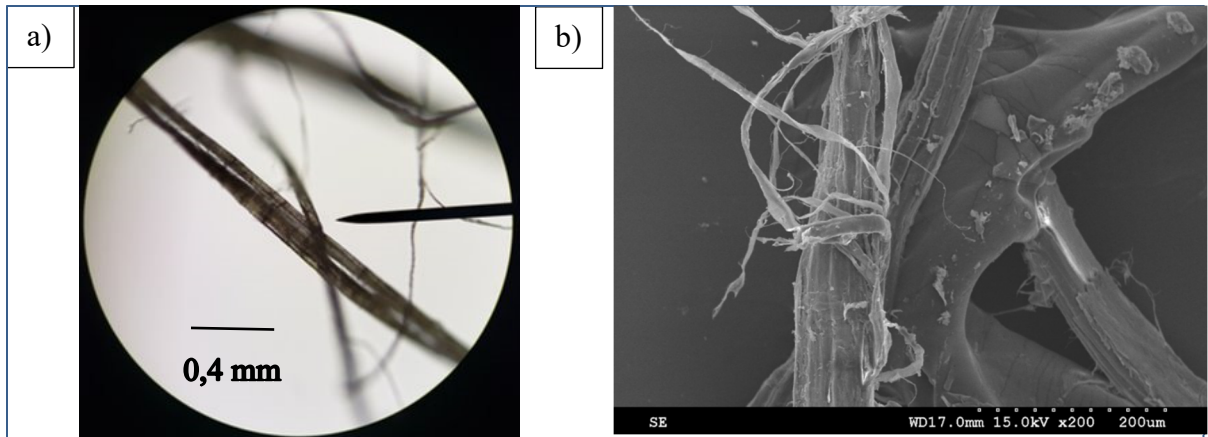


Figure 3.10 Hemp wool in a) optic microscopy and b) SEM

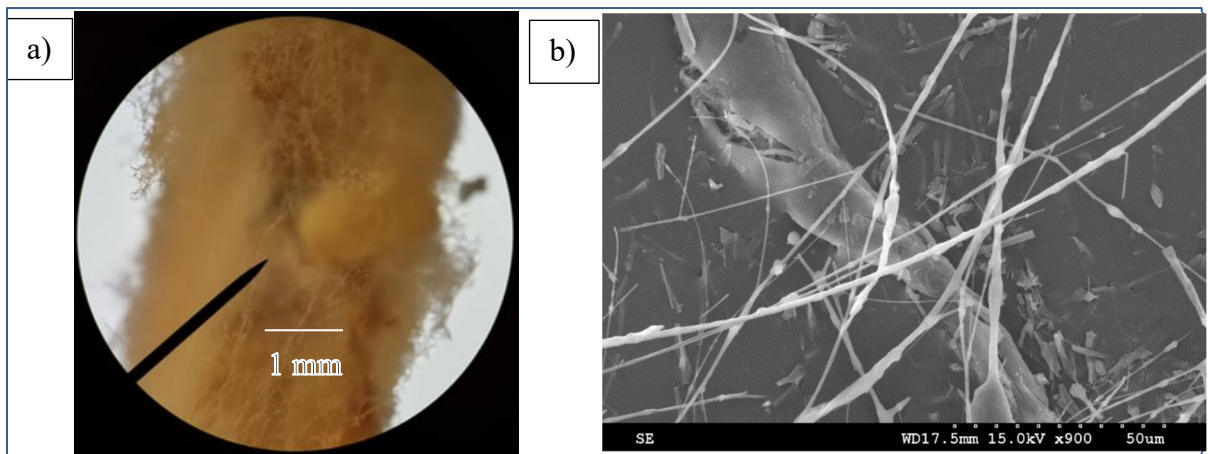


Figure 3.11 Mycelium in a) optic microscopy and b) SEM

### 3.4 Conclusions

In conclusion, the potential of an experimental material composed of recycled plant fibers and the mycelium of the fungus *Pleurotus ostreatus* as thermal insulator was compared to hemp wool and glass wool. A mycelium culture protocol was developed. In most of the analyses performed, the results of the experimental material were comparable to those of hemp wool, which supports the initial hypothesis.

In fact, a compressive strength 85 times higher than that of hemp wool and 1330 times higher than that of glass wool was observed for the Medium mycelium samples. The average thermal conductivity values obtained for each of the materials are below 0.040 W/(mK), which allows for R-values of between 11 and 15, depending on the thickness of the samples analyzed. As for the true density of the materials, it is 1.3 – 1.5 g/cm<sup>3</sup> for the bio-based materials, versus for glass wool, which is around 3.0 g/cm<sup>3</sup>. As for the porosity, that of all the materials is 75% or higher. Finally, the thermal capacity of glass wool is significantly lower, at 0.057 J/kg.K, while the other materials are all between 0.130 and 0.162 J/kg.K. In the case of the sound absorption coefficient (alpha), that obtained for mycelium is more variable as a function of frequency than those for glass and hemp wool, which stabilize at around 0.95 after 1500 Hz.

The experimental material based on hemp chips and *Pleurotus ostreatus* mycelium thus has the potential for thermal insulation. However, more detailed studies must be carried out on its long-term inertia and its behavior in a real environment. Its ambient growth temperature, its low carbon footprint and its absence of synthetic products make it an environmentally responsible material of choice.

### 3.5 Acknowledgements

This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, the Quebec government's Fonds de recherche Nature et technologies, the Hydro-Québec scholarship program, the Fondation Molson, and the Canada Research Chair on Sustainable Multifunctional Construction Materials.

## CHAPITRE 4

### RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES ET DISCUSSION

Les résultats complémentaires regroupent diverses analyses où résultats intermédiaires obtenus lors du projet. Ce chapitre contient tout ce qui n'a pas été inclus dans l'article soumis pour publication chez Construction and Building Materials. Aussi, il regroupe certaines analyses qui ont été effectuées de façon exploratoire et qualitative, FTIR, ATG, sans chercher à identifier avec précision les molécules présentes.

#### 4.1 Calorimétrie isotherme

La calorimétrie isotherme a été utilisée préalablement à la phase de croissance du mycélium de *Pleurotus ostreatus* afin de déterminer la température optimale de croissance de celui-ci sur copeaux de frêne. L'expérimentation a eu lieu en espace clos où aucun échange d'air n'était possible entre les ampoules contenant les échantillons et le milieu ambiant. Les valeurs obtenues pour chacun des 8 réplicas effectués à l'aide du TAM Air 8-channels ont été rassemblées sous forme de valeur moyenne à chacune des températures étudiées. Les Figures 4.1 et 4.2 ci-dessous présentent respectivement les courbes obtenues pour la chaleur totale et le flux de chaleur moyen des échantillons présents dans les 8 puits de l'appareil.

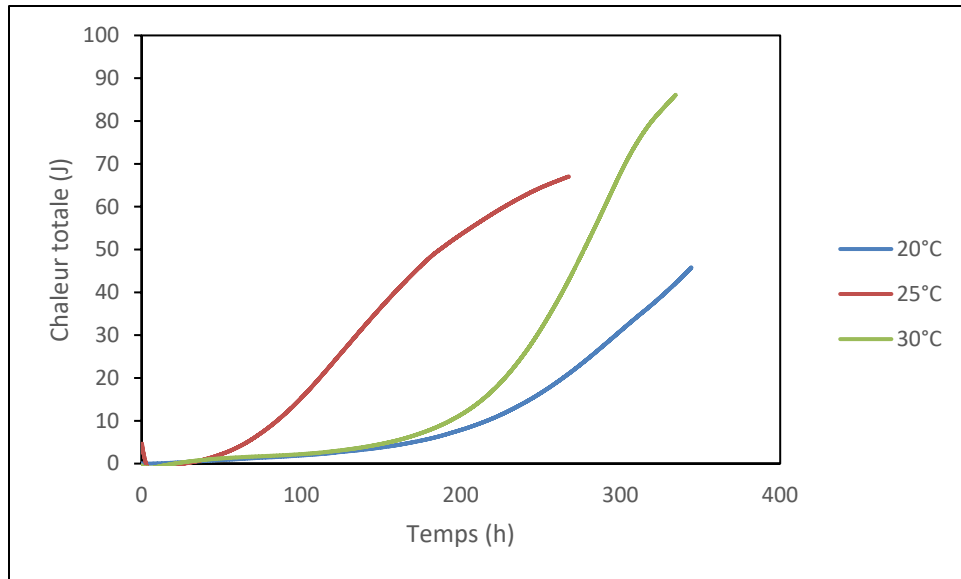


Figure 4.1 Chaleur totale dégagée par la croissance du mycélium de *Pleurotus ostreatus* sur copeaux de frêne à diverses températures de croissance

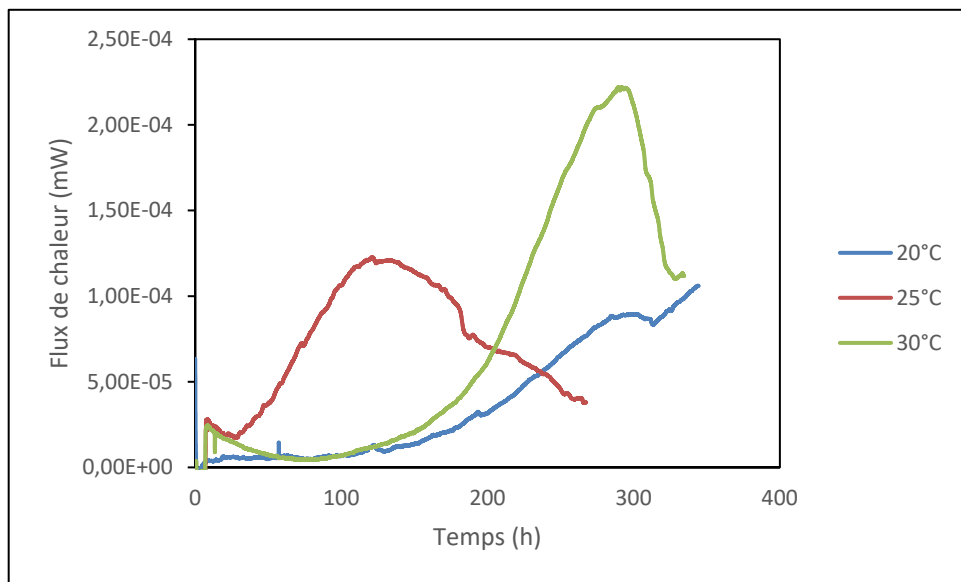


Figure 4.2 Flux de chaleur produit par la croissance du mycélium de *Pleurotus ostreatus* sur copeaux de frêne à diverses températures de croissance

Les analyses de calorimétrie isotherme effectuées à l'aide de l'appareil TAM Air 8-channels ont été arrêtées lorsque les courbes de flux de chaleur (Figure 4.2) de la majorité des répliques ont atteint un plateau. En effet, la courbe de flux de chaleur représente directement le taux de croissance de l'organisme et donc des nutriments qui sont disponibles dans le milieu de croissance. Lorsque la courbe du flux de chaleur est ascendante, l'organisme est en phase de croissance exponentielle. Lorsque le rythme de croissance commence à ralentir, la courbe du flux de chaleur atteint un plateau qui témoigne d'un taux de mortalité de l'organisme équivalant à son taux de croissance. Ceci est habituellement dû aux conditions du milieu qui commencent à être moins bonnes à cause d'un manque de nutriments, d'un taux d'humidité trop faible ou d'une accumulation de déchets qui affecte les paramètres physicochimiques du milieu. Lorsque la courbe du flux de chaleur est descendante, l'organisme subit un taux de mortalité plus grand que son taux de croissance.

Les courbes de chaleur totale présentées à la Figure 4.1 vont prendre plus de temps à atteindre un plateau que celles de flux de chaleur (Figure 4.2). En effet, comme la chaleur totale est cumulative tout au long de l'analyse, le plateau sera seulement atteint lorsque plus aucun joule de chaleur ne sera produit. Ceci aura lieu lorsque 100% du mycélium présent dans les ampoules d'analyses sera mort et donc que les courbes de flux de chaleur seront de retour à zéro. Comme les ampoules utilisées dans le calorimètre sont des milieux clos, aucune perte de chaleur vers le milieu extérieur n'est possible ce qui empêche les courbes de chaleur totale d'être descendantes. Si tel était le cas, ce serait une indication que les ampoules n'auraient pas été bien scellées et donc l'essai ne serait pas valide.

Il est possible de constater à la Figure 4.2 ci-dessus que l'essai à 25°C atteint beaucoup plus rapidement un plateau, après environ 120 heures, que lors des essais à 20°C et 30°C où près de 300 heures sont nécessaires à l'atteinte du plateau bien que la valeur maximale égalée soit plus faible à 25°C. Aussi, la courbe de chaleur totale semble ralentir en vue de l'atteinte d'un plateau ce qui est corroboré par la courbe du flux de chaleur qui est descendante depuis environ 150 heures et s'approche de plus en plus de zéro (Hagedoorn, 2022). Les résultats sont en accord avec la croissance de *Penicillium roqueforti* sur extrait de malt présenté dans la

brochure du TAM Air présenté à l'Annexe III (TA Instruments, 2020). Dans les deux cas, la température optimale de croissance retenue est de 25°C. En revanche, les temps de croissance plus courts ainsi que la plus grande amplitude des courbes de flux de chaleur générée sont dus à la croissance de l'organisme sur un milieu plus riche (l'extrait de malt) par rapport à un milieu plus pauvre en nutriments comme les copeaux de frêne.

Comme le temps passé en usine est un facteur important pour les entreprises et en vue d'une future optimisation du protocole de croissance, la température d'incubation possédant la plus petite phase de latence a été choisie. La culture du mycélium de *Pleurotus ostreatus* dans le cadre de ce projet a eu lieu à 25°C.

## 4.2 Microscopie optique

À des fins de curiosité intellectuelle, de la microscopie optique a été effectuée pour les trois isolants comparés. Aucune coloration ni montage entre lame et lamelle n'ont été nécessaires. Les Figure 4.3, 4.4 et 4.5 présentent respectivement la laine de verre, la laine de chanvre ainsi que le matériau à base de mycélium à faible (10 X) et fort (40 X ou 100 X) grossissement.

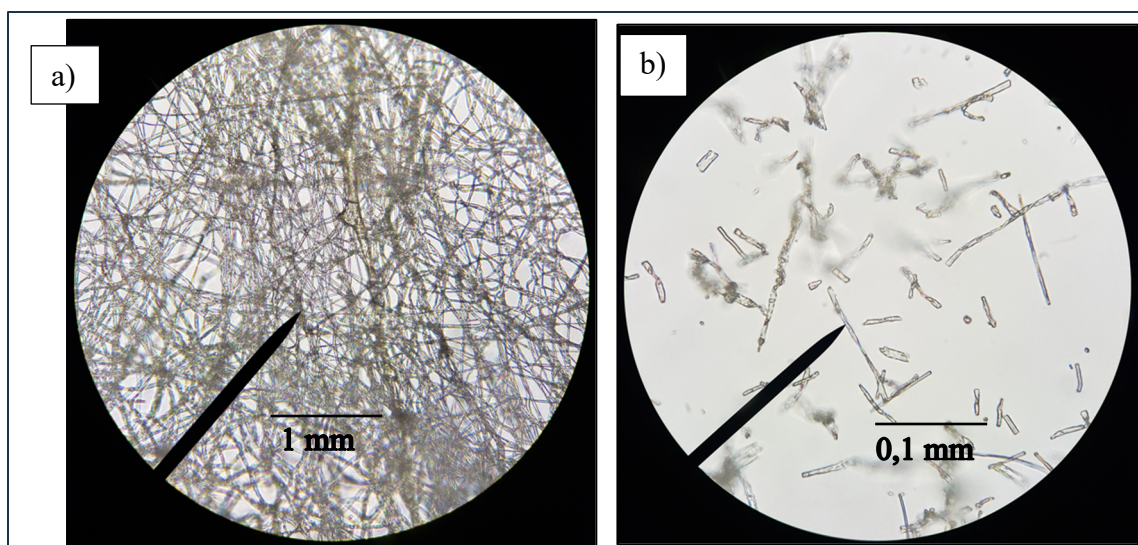


Figure 4.3 Observation de la laine de verre au microscope optique à a) 10 X et b) 100 X

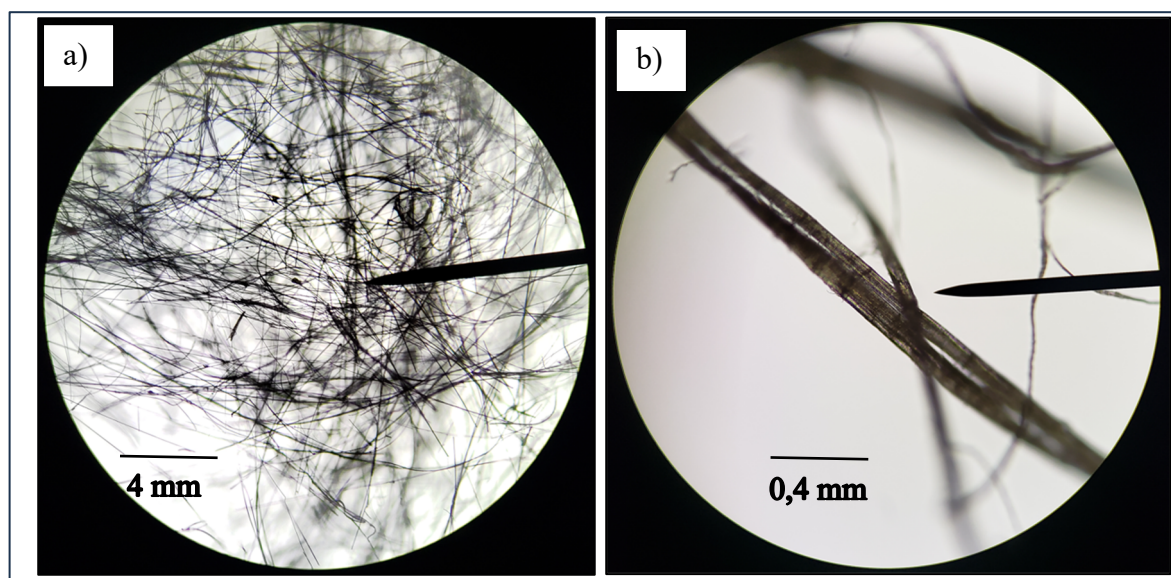


Figure 4.4 Observation de la laine de chanvre au microscope optique à a) 10 X et b) 100 X



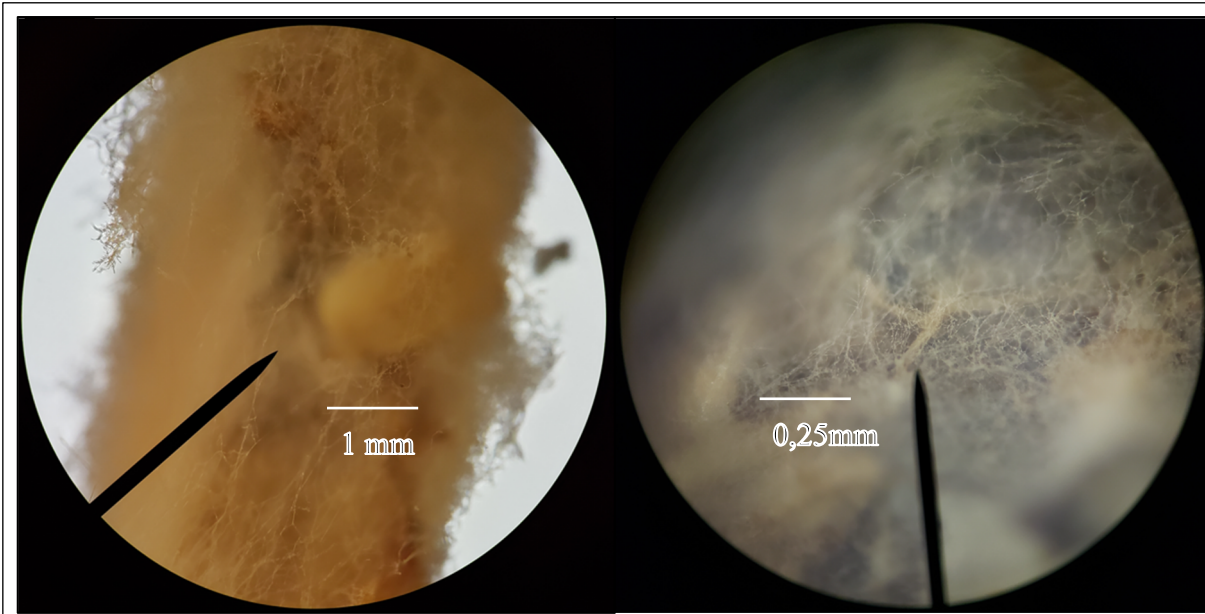


Figure 4.5 Observation d'un copeau de frêne colonisé par le mycélium de *Pleurotus ostreatus* au microscope optique à a) 10 X et b) 40 X

Certaines sections des Figure 4.3, 4.4 et 4.5 présentées ci-haut sont floues par endroit. Ceci est dû aux limites de l'observation de structures au microscope optique. En effet, étant donné la faible profondeur de champ de l'appareil, il est difficile, voire impossible, d'obtenir une bonne résolution pour l'ensemble du champ lors de l'observation de structures complexes avec plusieurs niveaux d'épaisseur. Il faudrait réussir à obtenir une couche mince du matériau exactement à la même distance de l'objectif en tous points.

Il est possible de constater à l'aide des images présentées dans les trois dernières figures que les isolants étudiés sont tous composés d'un réseau complexe de fibres qui s'entrecroisent à plusieurs niveaux. Aussi, dans le cas du copeau de frêne colonisé par le mycélium de *Pleurotus ostreatus* à la Figure 4.5, malgré le choix d'un petit copeau pour l'observation, celui-ci possède tout de même une épaisseur d'environ 2 mm ce qui est énorme pour l'observation au microscope optique.



### 4.3 Microscopie électronique à balayage

Afin d'obtenir des épreuves plus claires avec une plus grande profondeur de champ, des images de microscopie électronique à balayage ont été prises à l'aide du Hitachi S3600-N SE pour la laine de chanvre, la laine de verre et le mycélium. Les figures 4.6, 4.7 et 4.8 les représentent respectivement.

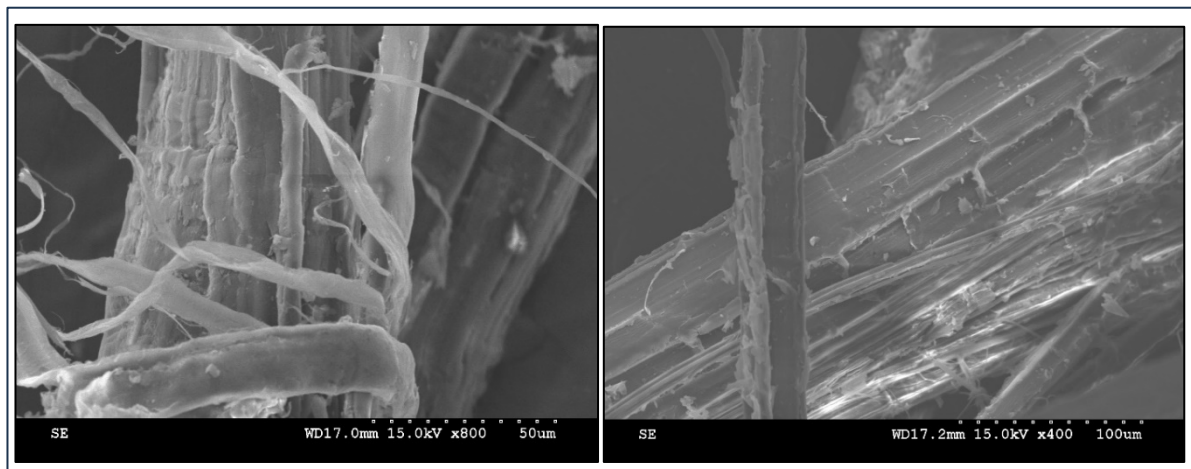


Figure 4.6 Laine de chanvre par microscopie électronique à balayage à a) 50 μm b) 100 μm

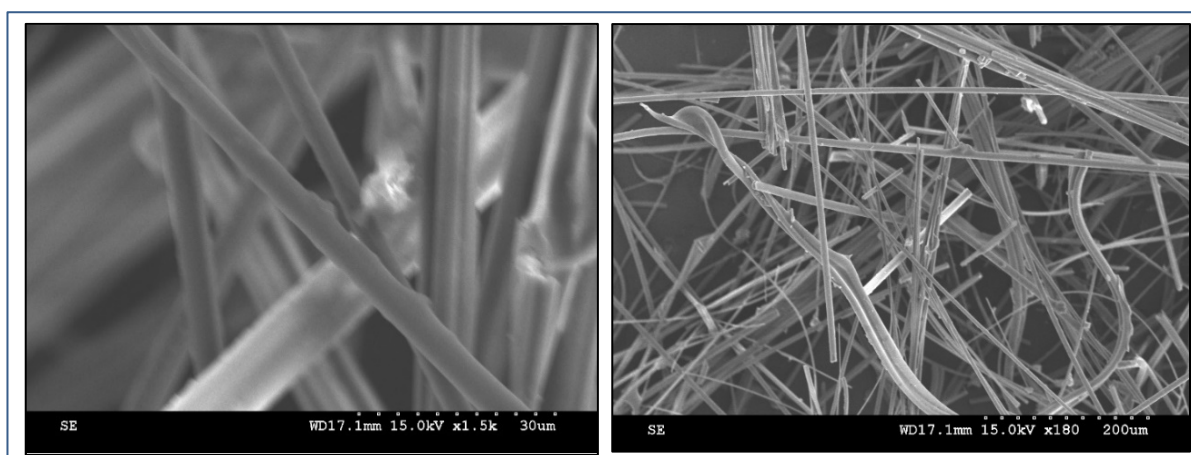


Figure 4.7 Laine de verre par microscopie électronique à balayage à a) 30 μm b) 200 μm

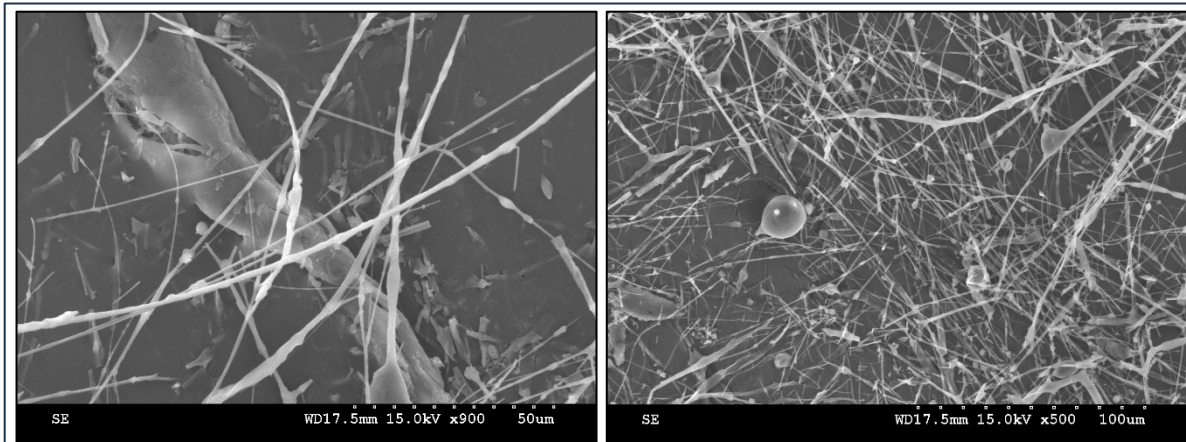


Figure 4.8 Mycélium par microscopie électronique à balayage à a) 50  $\mu\text{m}$  b) 100  $\mu\text{m}$

Il est possible de constater un arrangement des fibres assez aléatoire pour les divers matériaux comparés. En revanche, la texture des différentes fibres diffère. Celles de chanvre possèdent beaucoup de porosités et semblent être constituées d'un assemblage de fibres de plus petit diamètre en une fibre de diamètre plus important. Dans le cas de la fibre de verre, la texture semble être majoritairement lisse de façon continue avec une seule fibre qui constitue chacun des filaments.

Dans le cas du mycélium, des protubérances de taille variable, sous forme de bulles, sont présentes de façon aléatoire le long des filaments. Les fibres sont aussi beaucoup plus fines lors d'observation à un même grossissement (Figure 4,6 a) vs 4,8 a)). Même en comparaison avec la laine de verre à 30  $\mu\text{m}$ , les fibres de mycélium à 50  $\mu\text{m}$  sont beaucoup plus petites. Le faible diamètre de chacune des fibres de mycélium combiné à leur densité importante explique leur grand potentiel de cohésion entre les éléments qui entre dans la composition du matériau.

#### 4.4 Spectrométrie FTIR

À la suite de l'excitation des échantillons de bois de frêne et de mycélium de *Pleurotus ostreatus* par un faisceau dans la gamme de l'infrarouge, des spectres de transmittance des échantillons ont été obtenus. Chacun des pics prédominants témoigne d'un groupement fonctionnel présent dans la composition de l'échantillon. Ceux-ci peuvent être identifiés en fonction de leur nombre d'onde. Les figures 4,9 et 4,10 présentent les spectres obtenus pour le frêne et le mycélium respectivement.

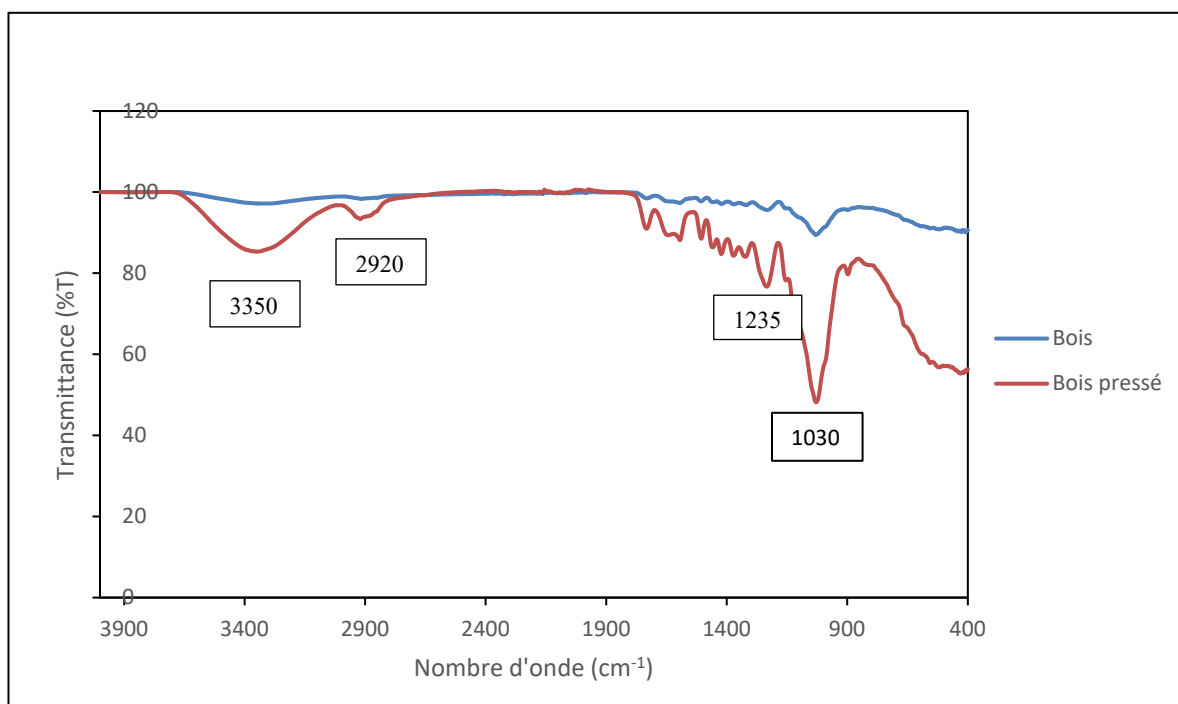


Figure 4.9 Spectre FTIR pour le bois de frêne

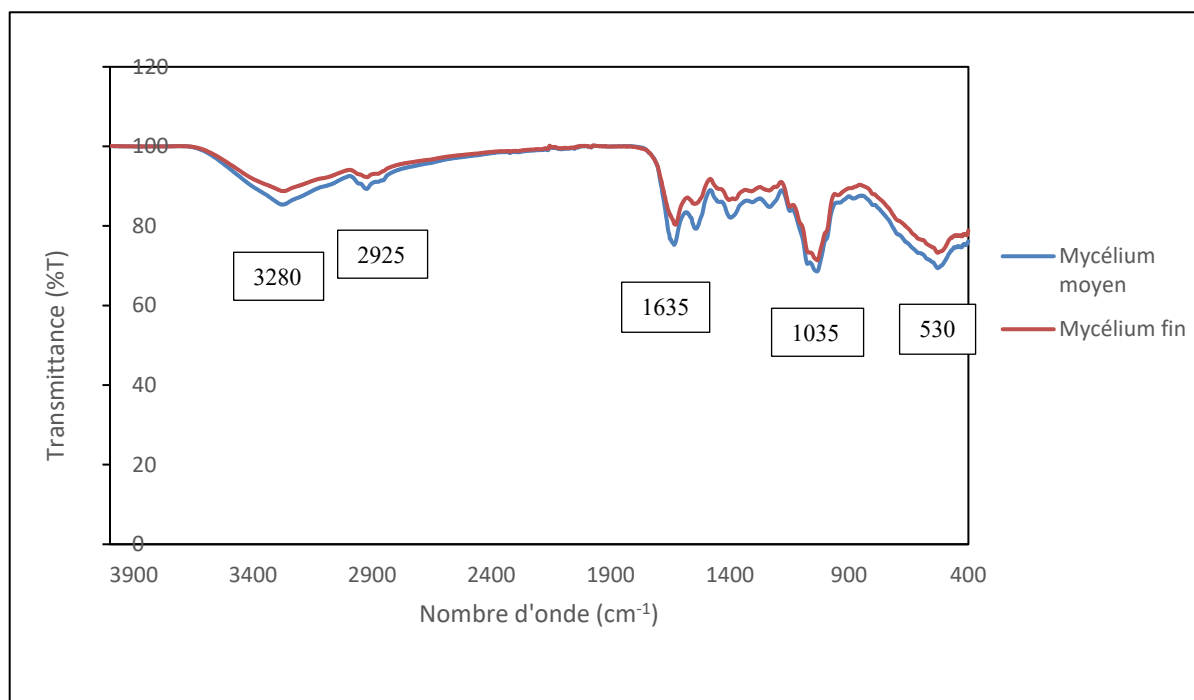


Figure 4.10 Spectre FTIR pour le mycélium de *Pleurotus ostreatus*

Les nombres d'onde correspondant aux pics proéminents ont été affichés afin d'identifier les groupements fonctionnels correspondants. Les deux types d'échantillons analysés présentent un large pic vers 3260 cm<sup>-1</sup> qui correspond au groupement O-H qui s'étire (Levasseur-Thériault, 2018). Un autre pic se trouve à 2920-2925 cm<sup>-1</sup> pour les deux types d'échantillons et il correspond au groupement C-H saturé de type alcane, donc avec un lien simple entre les deux molécules qui s'étirent. Le mycélium possède quant à lui un pic significatif à 1635 cm<sup>-1</sup> qui n'est pas présent chez le frêne. Celui-ci correspond à des liaisons alcènes (C=C) qui se situent entre 1660 et 1600 cm<sup>-1</sup> (Levasseur-Thériault, 2018; Sigma Millipore, 2023).

Ensuite, les deux types d'échantillons possèdent un pic à 1030-1035 cm<sup>-1</sup> qui correspond à un groupement C-O de type alcool primaire qui serait conjugué (alternance d'une liaison covalente simple avec de doubles liaisons) ce qui explique son déplacement vers la droite par rapport à son nombre d'onde de références qui est 1050 cm<sup>-1</sup>. Finalement, un pic à 530 cm<sup>-1</sup> est présent pour le mycélium qui correspond fort probablement à du bruit de fond, car

seulement des halogènes émettent en bas de  $700\text{ cm}^{-1}$  et il est peu probable qu'il y ait présence d'atomes halogénés (Levasseur-Thériault, 2018).

En résumé, le bois et le mycélium contiennent des groupements O-H, C-H et C-O, ce qui est typique des molécules organiques. En revanche, le mycélium possède des insaturations de type alcène (C=C) que le bois ne possède pas. Aussi, la compaction de l'échantillon de frêne a permis d'obtenir un spectre FTIR beaucoup plus défini par rapport à l'échantillon original en raison de l'obtention d'une meilleure surface de contact avec le cristal. Le Tableau 4.1 résume les groupements obtenus ainsi que leur nombre d'onde théorique.

Tableau 4.1 Groupements fonctionnels présents dans chacun des composés

<b>Groupement fonctionnel</b>	<b>Nombre d'onde de référence (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Présent chez le frêne</b>	<b>Présent chez le mycélium de <i>Pleurotus ostreatus</i></b>
<b>O-H</b>	3550 -3200	X	X
<b>C-H</b>	3000 - 2840	X	X
<b>C-O</b>	1050	X	X
<b>C=C</b>	1600 - 1660		X

#### 4.5 Analyse thermogravimétrique

À la suite d'essais thermogravimétriques pour des copeaux de frêne vierge, le mycélium de *Pleurotus ostreatus* et des copeaux de frêne colonisés par le mycélium de *Pleurotus ostreatus*, les courbes suivantes ont été obtenues. La dérivée des courbes de perte de masse permet d'obtenir la température de dégradation des différentes molécules qui constituent les échantillons. L'utilisation d'un gaz inerte comme atmosphère lors de l'analyse, par exemple l'hélium, permet à l'échantillon de réagir uniquement avec la température lors de sa décomposition. C'est une pyrolyse lorsque le chauffage a lieu sous atmosphère inerte.

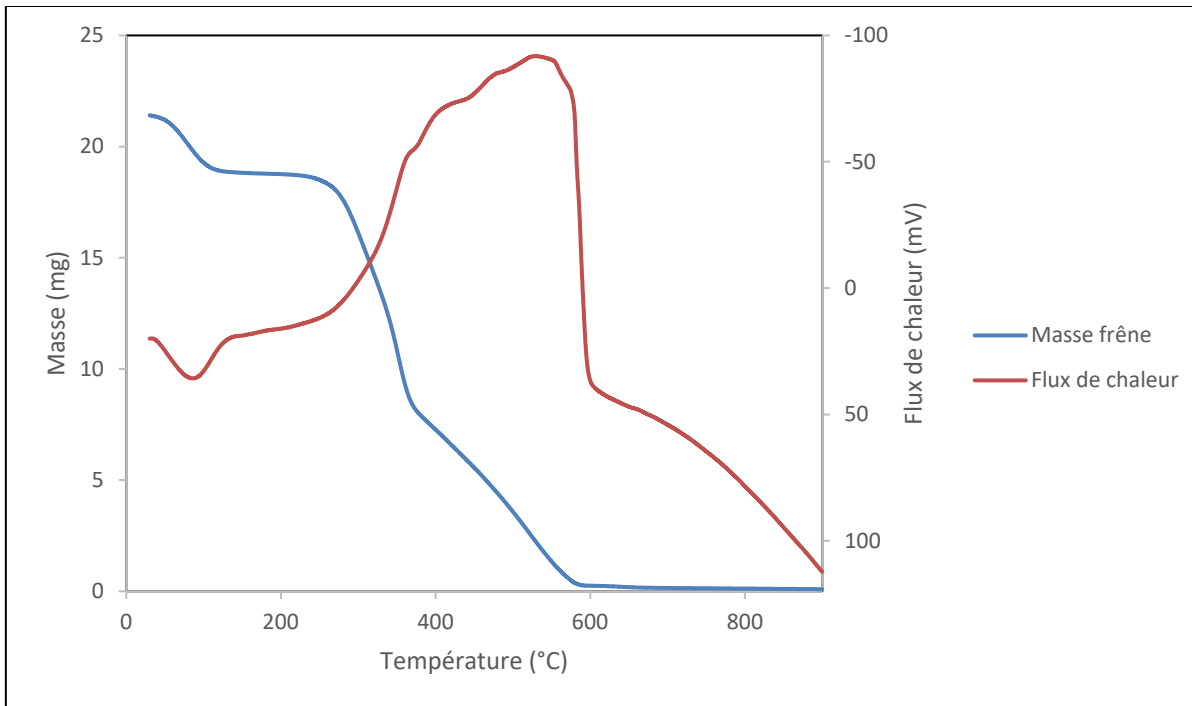
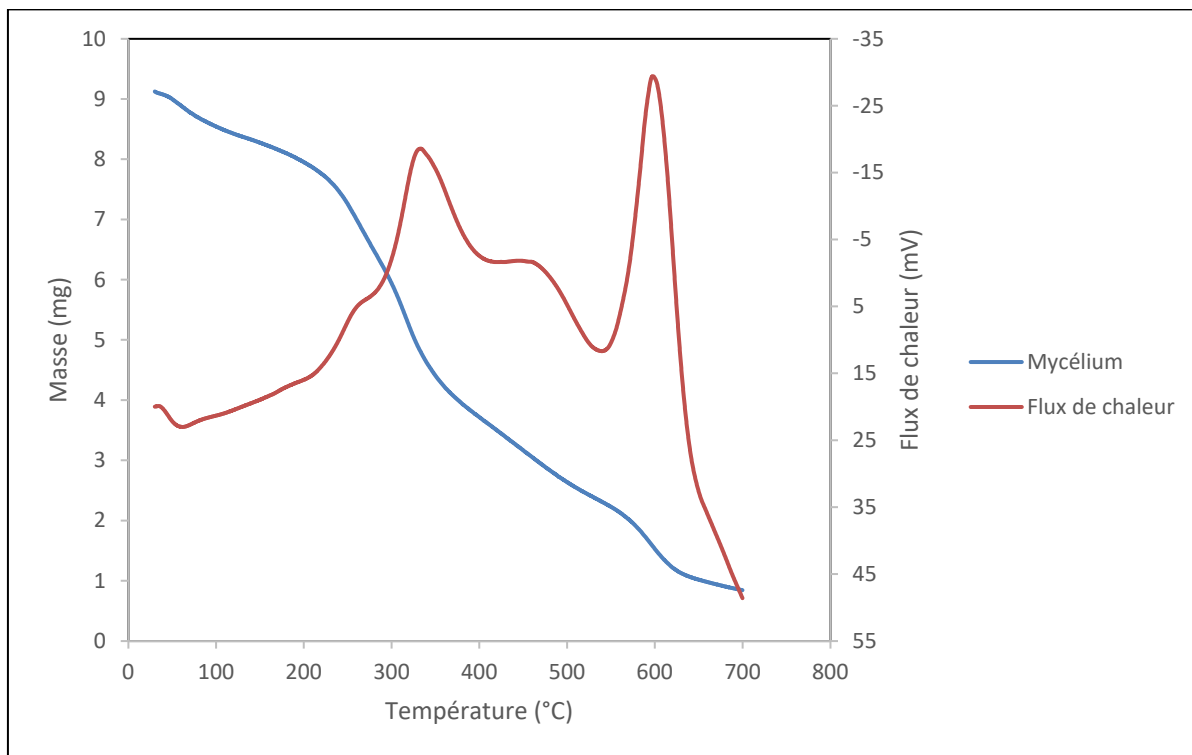


Figure 4.11 ATG de copeaux de frêne vierge

Figure 4.12 ATG du mycélium de *Pleurotus ostreatus*

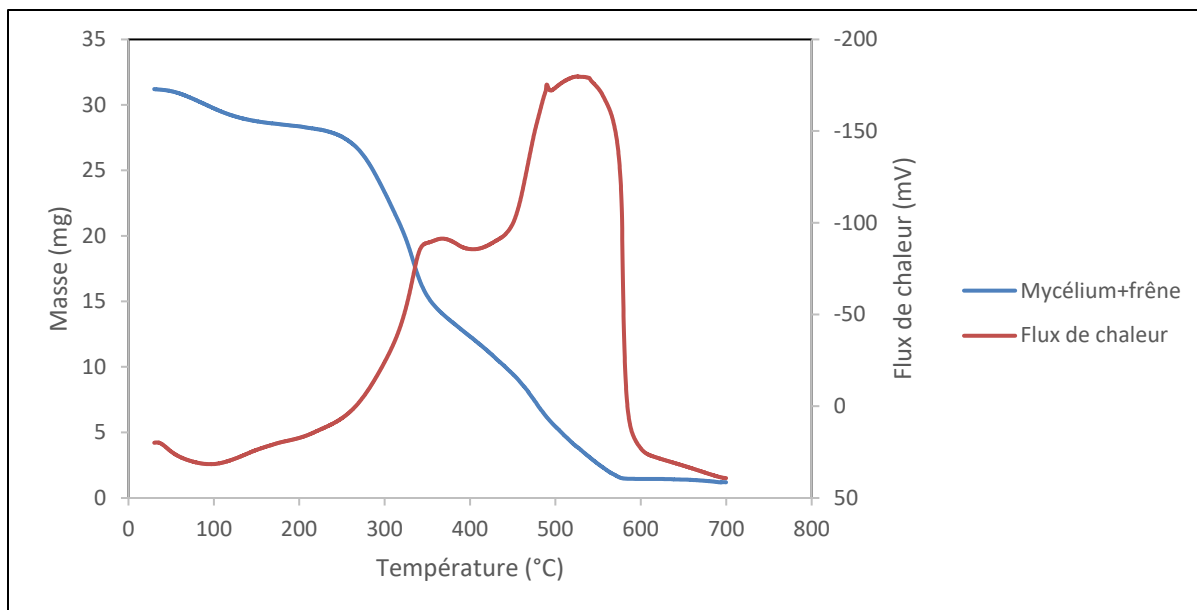


Figure 4.13 ATG de copeaux de frêne colonisés par le mycélium de *Pleurotus ostreatus*

Le premier pic présent vers 100°C pour les trois échantillons correspond à l'évaporation de l'eau résiduelle contenue dans les échantillons malgré le séchage au four à 80°C pendant 24 heures (Nagata, 2015). Il est possible de constater une dégradation totale plus rapide pour le frêne vierge et du frêne colonisé par le mycélium de *P.ostreatus*, autour de 610°C, tandis que le mycélium de *Pleurotus ostreatus* seul se dégrade totalement juste avant 700°C. En raison de la connaissance de quelques liaisons moléculaires présentes dans le matériau à la suite des essais de FTIR, mais de l'ignorance de leur conformation spatiale, il est impossible de se prononcer sur les molécules responsables des autres vagues de dégradation. Un couplage ATG-MS, ATG-FTIR ou ATG-GC/MS serait nécessaire afin de pouvoir identifier les composés représentés par chacun des pics ainsi que leur proportion dans chacun des échantillons (PerkinElmer, 2010).





## CONCLUSION

Pour conclure, un matériau totalement biosourcé à base de copeaux de frêne et de mycélium de *Pleurotus ostreatus* a pu être développé. Après quelques essais, un protocole de culture fonctionnel a émergé. Il a été possible de mouler le matériau et d'inactiver la croissance de celui-ci lorsque le bon niveau de cohésion entre les fibres végétales était atteint afin que l'échantillon tienne sous la forme d'une seule pièce au moment du démoulage et de sa manutention. À la suite de la caractérisation des propriétés isolantes du matériau à base de mycélium, de la laine de verre et de la laine de chanvre, il est possible de partiellement infirmer l'hypothèse de départ qui stipulait des propriétés isolantes similaires entre le matériau à base de mycélium et la laine de chanvre. En effet, ces deux matériaux possèdent des différences majeures au niveau de la résistance à la compression qui est jusqu'à 50 x plus importante pour le matériau à base de mycélium par rapport à la laine de chanvre et 550 x supérieure à la laine de verre. Cette différence repose principalement sur le type de fibres végétales qui a été choisi comme substrat de croissance pour le mycélium de *Pleurotus ostreatus*. Le bois étant de nature plus dense et rigide que le chanvre à la base, une force plus importante est nécessaire à sa compression.

En revanche, la conductivité thermique du matériau à base de mycélium est meilleure (plus basse) que celle de la laine de chanvre jusqu'à être compétitive à la laine de verre avec des facteurs R calculés entre 11 et 15. À la fois plus dense et plus poreuse, c'est la laine de verre qui possède des valeurs de densité et de porosité environ deux fois supérieures à celles obtenues pour le chanvre et le mycélium. Pour ce qui est de la capacité thermique massique, c'est au tour de la laine de verre de faire moins bonne figure que le chanvre et le mycélium avec 0,057 J/kg.K comparativement à 0,130J/kg.K et 0,162 J/kg.K respectivement. Finalement, du côté des propriétés acoustiques, le coefficient d'absorption  $\alpha$  de tous les matériaux augmente avec la fréquence. Les mesures acoustiques restent exploratoires, parce que les échantillons avaient des tailles différentes et un protocole contrôlé doit encore être mis au point. La laine de verre atteint un coefficient variant entre 0,95 et 1 à partir de 1500 Hz jusqu'à 4300 Hz tandis que la laine de chanvre varie entre 0,85 et 0,98 pour les mêmes fréquences. Les valeurs obtenues pour

le mycélium sont toutefois plus faibles avec une variation de 0,75 à 0,93. Pour ce qui est de la transmission du son, la laine de verre et de chanvre possède une transmission similaire avec des valeurs d'indice de transmission du son (ITS) de 5 dB et 4 dB respectivement tandis que le mycélium obtient une valeur de 9 dB en moyenne. Finalement, l'analyse du mycélium de *Pleurotus ostreatus* et des copeaux de frêne par FTIR a permis de mettre en évidence la présence de groupements alcool, alcane et C-O. Seul le mycélium contient des liaisons de type alcène. Dans le cas de l'ATG, la présence d'humidité résiduelle a été détectée malgré le passage au four des échantillons et une température de décomposition autour de 700°C a été mesurée.

Le mycélium possède donc des propriétés prometteuses pour une utilisation en tant qu'isolant thermique en étant concurrentiel avec des matériaux isolants qui ont fait leurs preuves. En revanche, d'autres essais doivent être effectués au niveau de la stabilité du matériau à long terme et d'optimisation du protocole de culture afin qu'il soit plus concurrentiel en termes de temps de croissance. La plus grande difficulté sera au niveau de l'acceptation sociale d'un tel matériau et de sa réelle innocuité.

## RECOMMANDATIONS

En vue de futures études sur la fabrication de panneaux isolants biosourcés qui utilisent le mycélium comme liant des fibres végétales, voici quelques avenues qu'il serait pertinent d'explorer. Premièrement, le protocole de culture devrait être revu afin d'optimiser le temps de culture. En effet, les quelques 6 à 8 semaines nécessaires pour passer de la croissance sur pétri à des briques formées qui possèdent une bonne cohésion est beaucoup trop long pour convaincre l'industrie de faire le virage. Ceci peut passer par l'exploration de différentes espèces de champignons dont la croissance pourrait être plus vigoureuse et rapide, par l'utilisation d'un inoculum plus important, par une optimisation de la taille des particules de substrat afin de permettre une meilleure compressibilité dans les moules et une cohésion plus rapide des particules entre-elles via le mycélium ainsi que par un choix de substrat plus riche. En revanche, le choix du substrat doit être fait de façon consciencieuse afin qu'il provienne de l'économie circulaire locale et que son utilisation ne se fasse pas au dépit de l'alimentation humaine. Aussi, la forme des moules pourrait être revue de façon à faciliter le démoulage et à faciliter l'observation de la croissance du mycélium (matériau transparent et clair). Un processus de compression automatisé dans les moules pourrait être développé afin d'obtenir une meilleure homogénéité et finalement un matériau et des caractéristiques plus constantes entre les échantillons.

Deuxièmement, les propriétés isolantes et acoustiques du matériau pourraient être comparées selon différentes combinaisons de substrat et d'espèces de champignon utilisées. Ceci permettrait l'obtention d'un matériau répondant exactement à l'utilisation voulue. Aussi, l'utilisation de spécimens de même dimension serait nécessaire pour fins de comparaison, particulièrement pour les propriétés acoustiques.

Finalement, une étude du comportement d'un isolant biosourcé contenant du mycélium *in situ* dans les conditions réelles des changements de température et d'humidité serait pertinente. En effet, ça permettrait de voir si le matériau conserve ses propriétés au fil du temps, s'il ne se

dégrade pas et surtout si le mycélium reste bien inactif ou bien s'il colonise d'autres structures dans le mur.

## ANNEXE I

### CROISSANCE DE *PLEUROTUS OSTREATUS* DOCUMENTÉE EN IMAGES

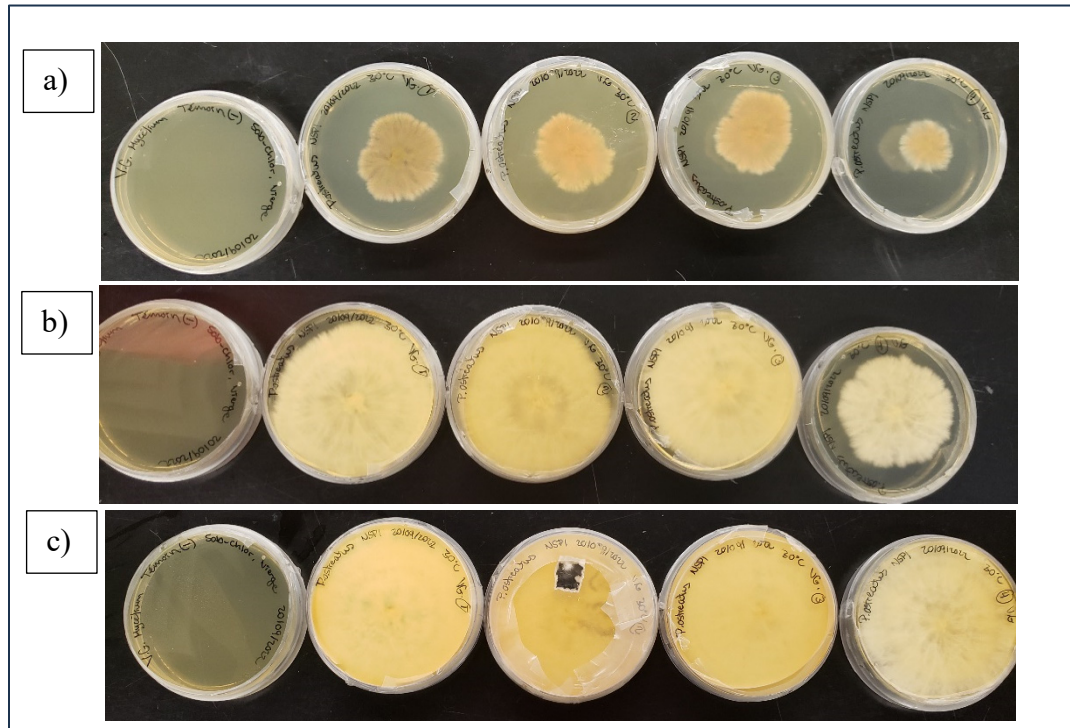


Figure A I-1 Croissance du mycélium de *Pleurotus ostreatus* sur gélose Sabouraud-chloramphénicol à 25°C pendant a) 5 jours, b) 10 jours et c) 15 jours



Figure A I-2 Croissance du mycélium de *Pleurotus ostreatus* sur grains de seigle à 25°C après a) 3 jours, b) 7 jours et c) 13 jours





Figure A I-3 Croissance du mycélium de *Pleurotus ostreatus* sur copeaux de seigle avec un inoculum de 10% de grains de seigle colonisés après a) 2 jours, b) 10 jours et c) 14 jours

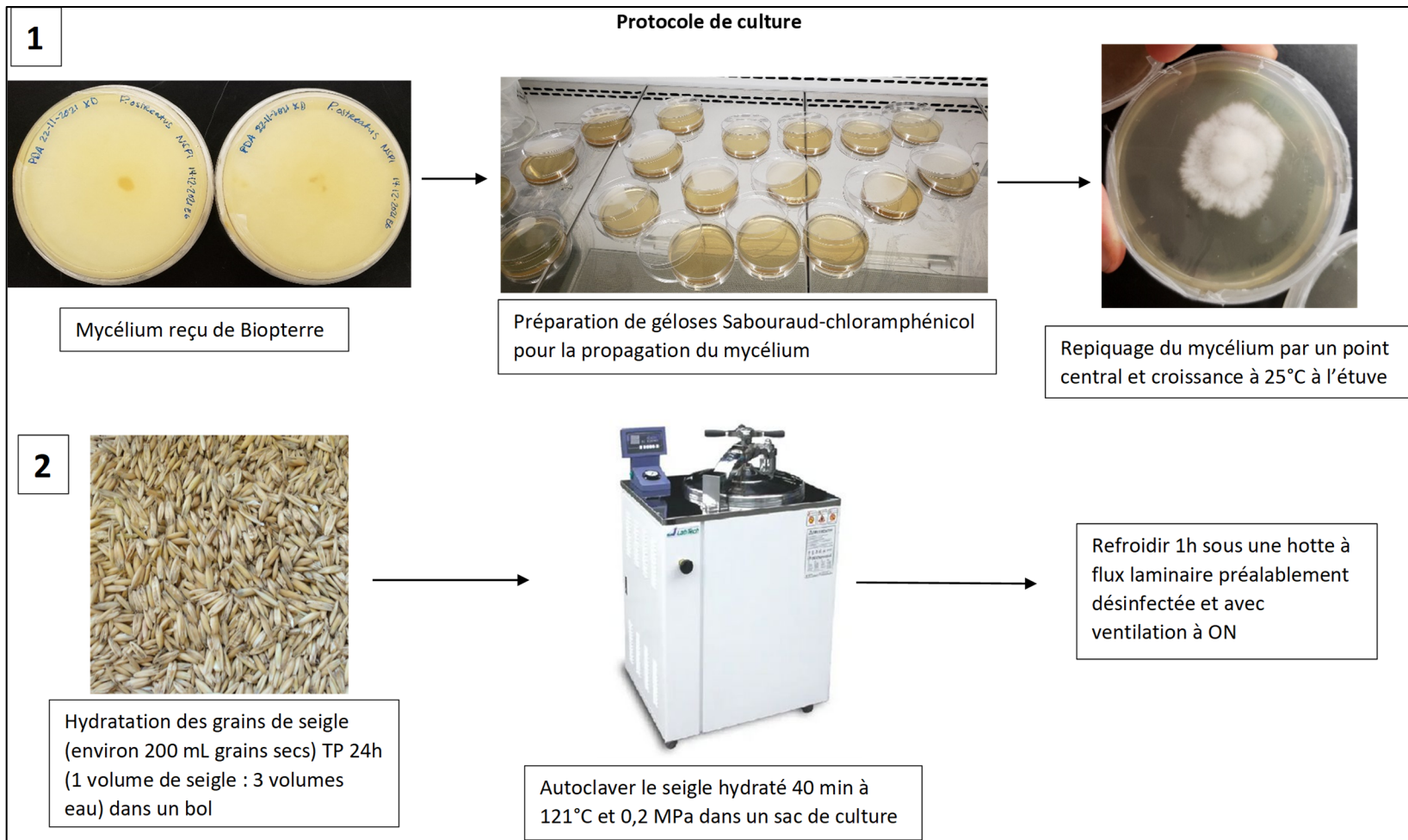


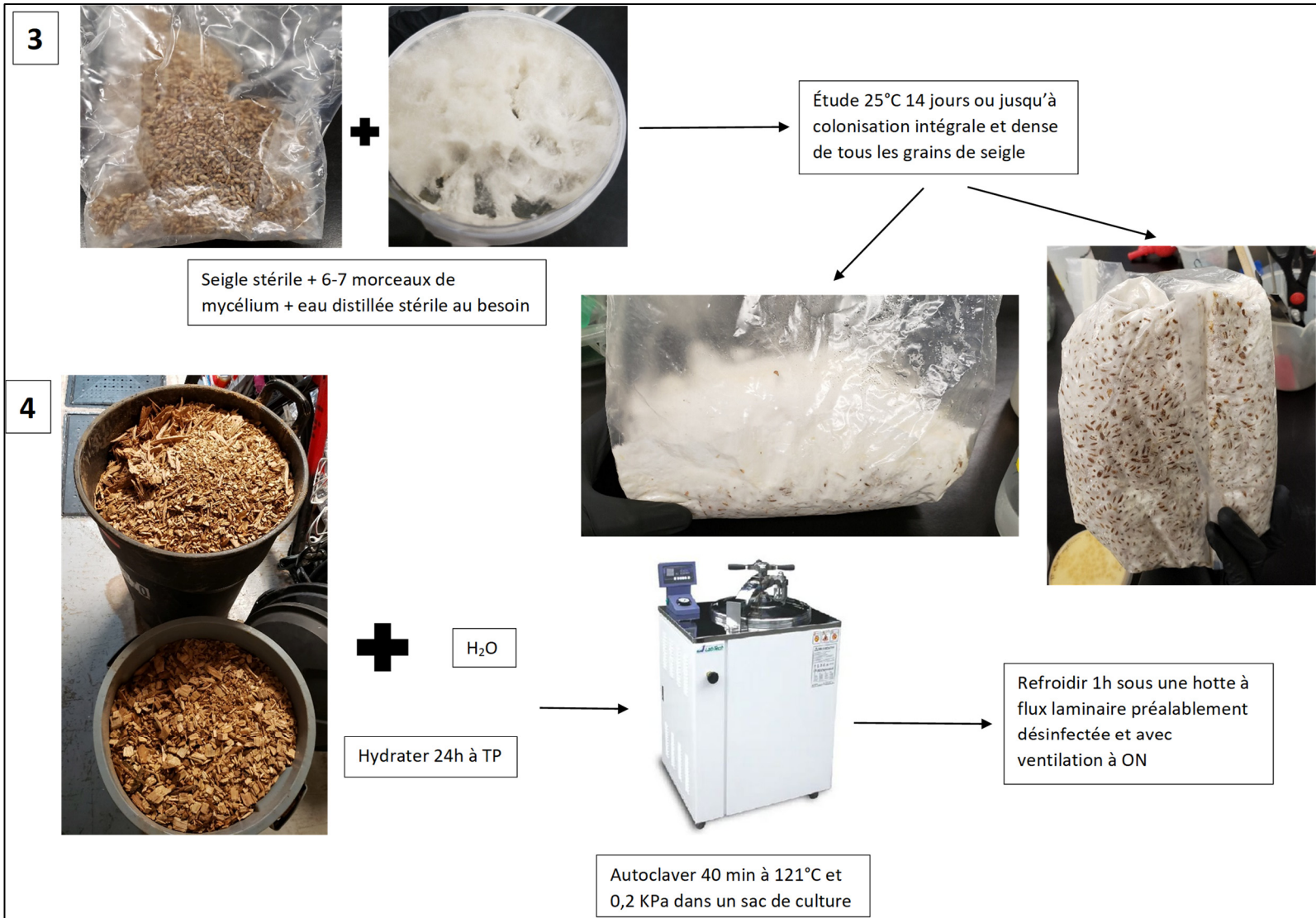
Figure A I-4 Briques de mycélium de *Pleurotus ostreatus*, de grains de seigle et de copeaux de frêne a) avant séchage, b) pendant séchage et c) après séchage à 80°C pendant 24 heures



## ANNEXE II

### SCHÉMA DU PROTOCOLE DE CROISSANCE DE *PLEUROTUS OSTREATUS*



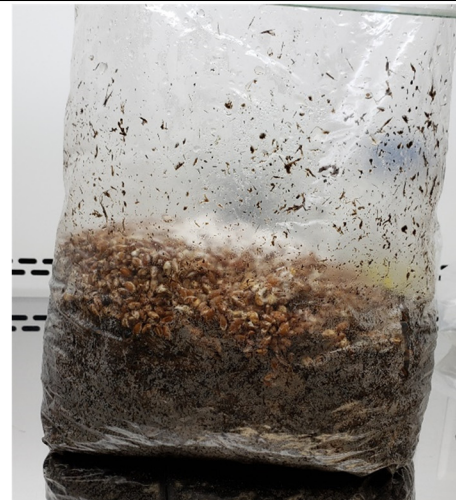




5



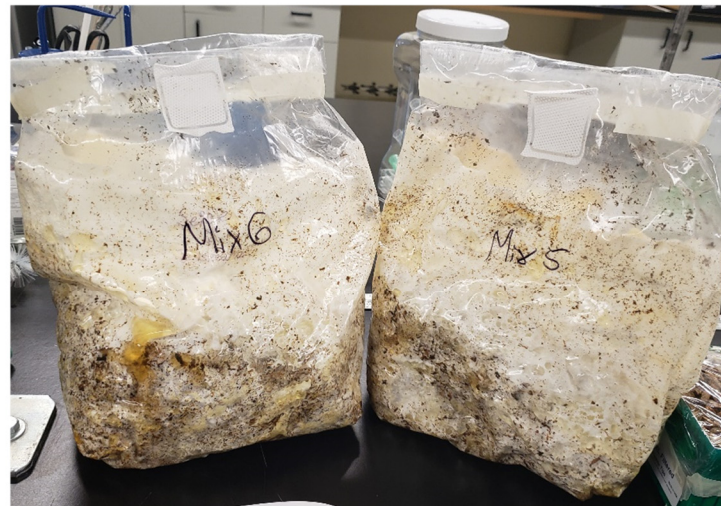
Copeaux de frêne hydratés et stériles



Bien mélanger. Incuber 14 jours à 25°C ou jusqu'à colonisation intégrale du substrat

3-4 jours d'incubation

14 jours d'incubation







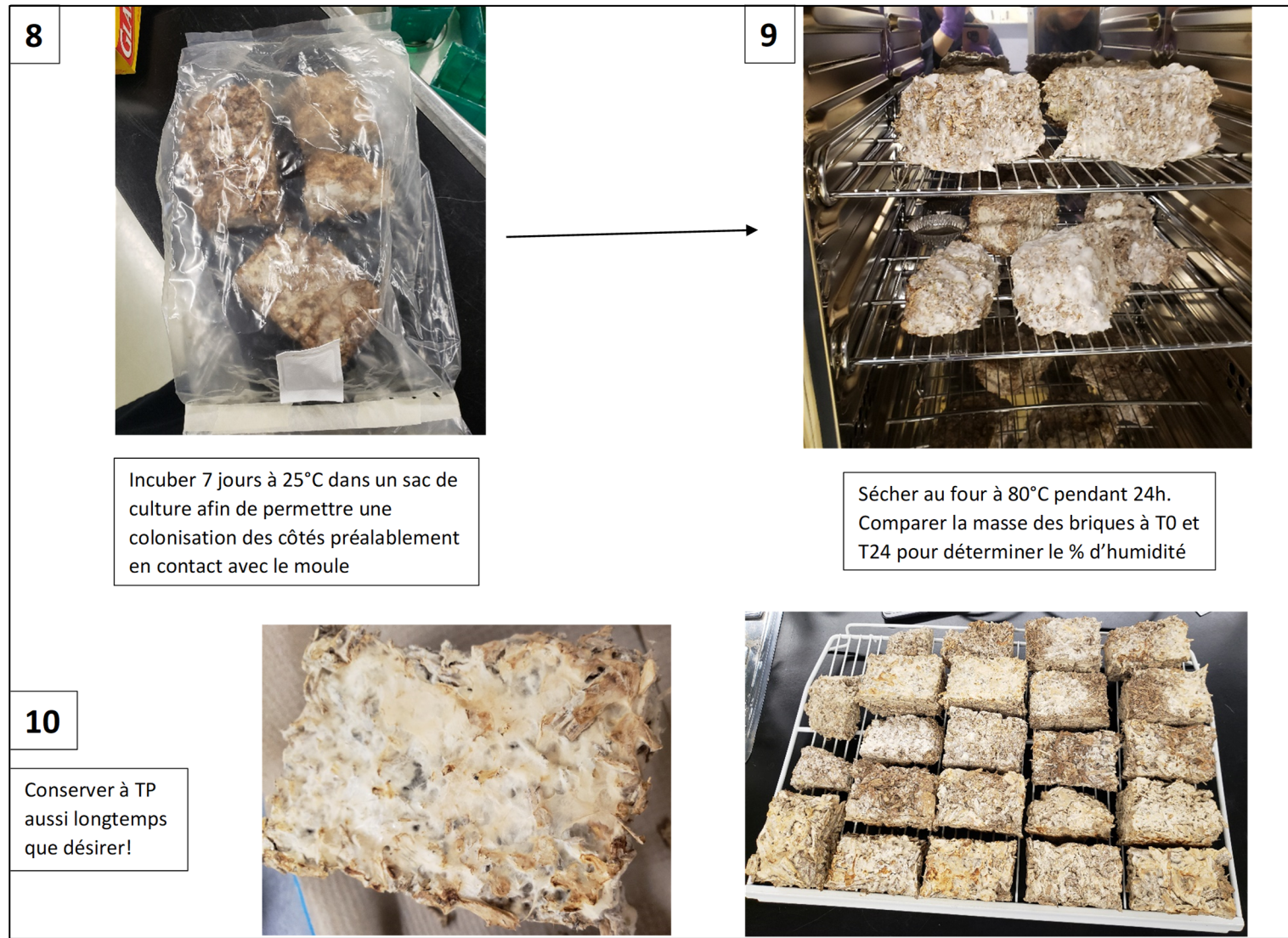


Figure A II-1 Protocole de culture détaillé du mycélium de *Pleurotus ostreatus* de géloses jusqu'en forme de briques



### ANNEXE III

#### CROISSANCE FONGIQUE DANS LE TAM AIR

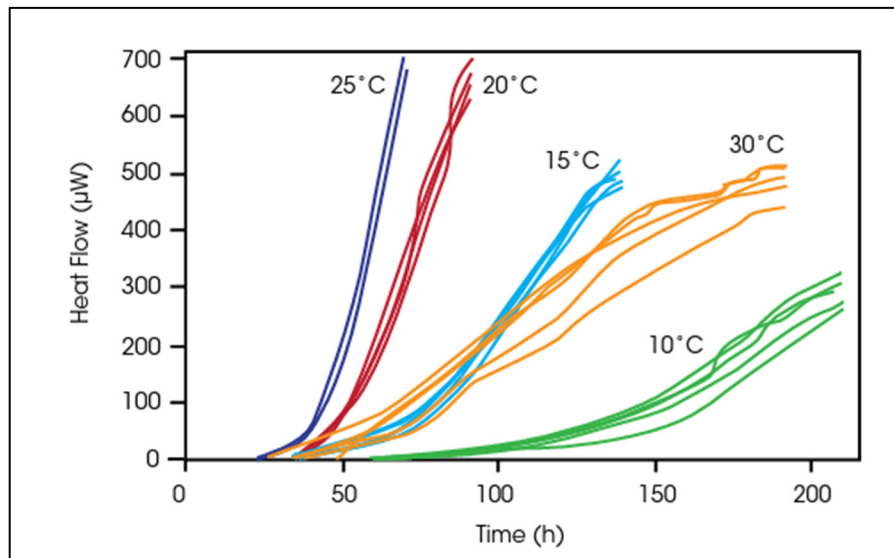


Figure-A III-1 Croissance de différents réplicats de *Penicillium roqueforti* sur extrait de malt à différentes températures dans l'appareil TAM Air de TA Instrument

Tirée de TA Instrument (2020, p. 26)

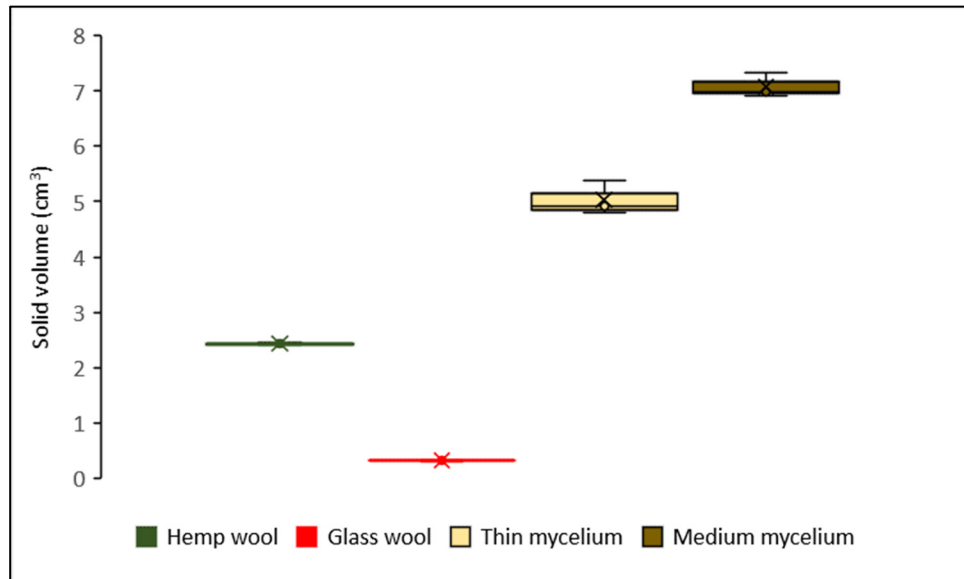




## APPENDICE A

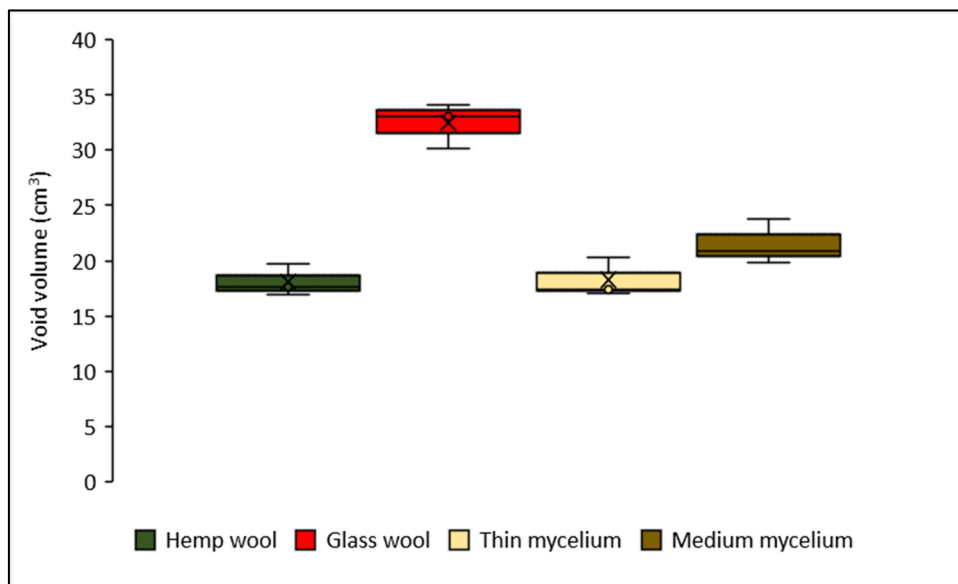
### COMPLÉMENT DE DONNÉES POUR LE CALCUL DE LA POSOSITÉ

The Anton Paar gaz pycnometer use helium to measure the solid volume of the samples inside the close chamber. The solid volume of every sample was measure three times. The Supplementary Figure S1 illustrates a small standard deviation between the values measured within each of the materials. The average volumes obtained for Thin mycelium and Medium mycelium are higher than for the two types of wool due to their composition of ash chips, which necessarily occupy a larger volume than a typical fiber network arrangement of a wool. Also, samples with larger ash chips have a larger volume than those composed of smaller ash chips. The hemp wool has a volume of about  $2.4 \text{ cm}^3$ , which is slightly higher than that of the glass wool, which is about  $0.3 \text{ cm}^3$ . This is due to the diameter of the hemp fibers being larger than the diameter of the glass fibers. However, the volume is specific to each sample, and cannot be compared between the different materials. It can, however, be compared between two samples of similar mass for the same type of material and will be useful for comparisons with the pore volume that will be detailed below.



Supplementary Figure A A-1: Average solid volumes measured with a gas pycnometer

The Supplementary Figure S2 shows a void volume of around 33 cm<sup>3</sup> for the glass wool, as compared to 18 cm<sup>3</sup> for the hemp wool and Thin mycelium, and 22 cm<sup>3</sup> for the Medium mycelium. When the final weights were taken, the vegetable oil was rapidly exiting the voids of the glass wool samples prior to weighing, and the air bubbles trapped within the glass wool could still be observed after 24 hours under vacuum. This suggests that the actual void volume of glass wool may be much higher, which could influence the validity of the value obtained. As the void volume depends on the volumetric mass measured, the value obtained for mycelium samples between studies cannot be measured, for the same reason mentioned above. A different measurement method might be more appropriate in order to get a better idea of the actual porosity. A comparison of Figures S1 and S2 shows that the void volume of all the materials under study is greater than the total volume of the same sample measured with the gas pycnometer (see Table S1).



Supplementary Figure A A-2: Average void volume present in three replicas of each material

Supplementary Table S1: True density and porosity of the materials

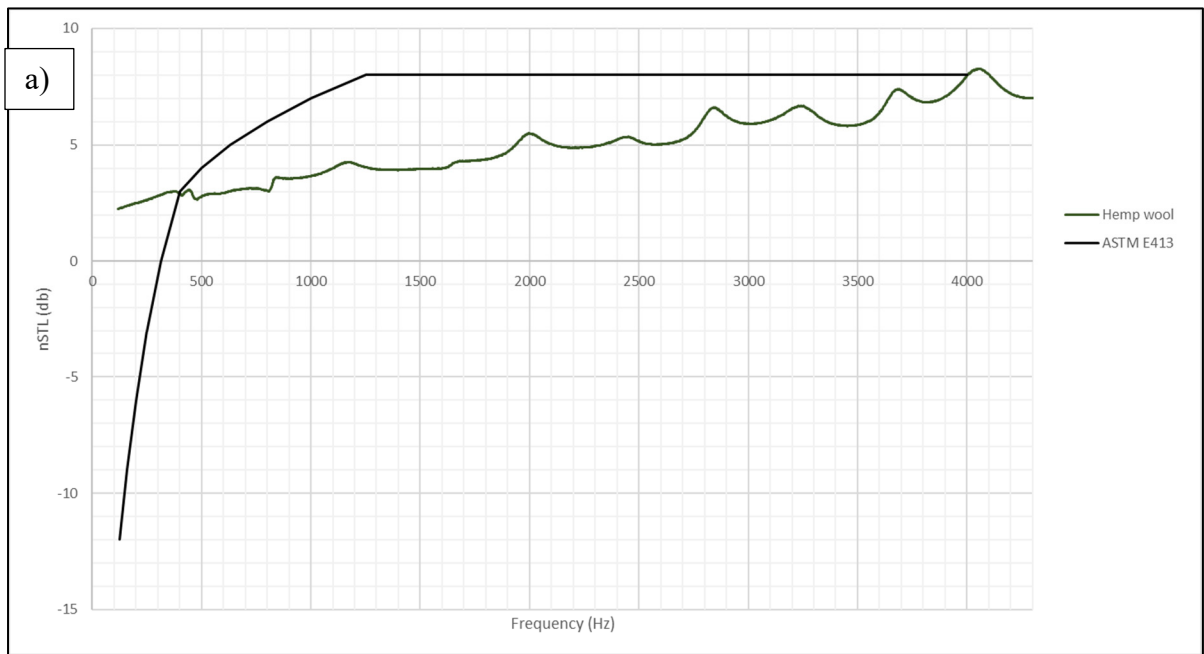
<b>Material</b>	<b>True density (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Solid volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Void volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosity (%)</b>
<b>Hemp wool</b>	1.48	2.43	18.1	88.2
<b>Glass wool</b>	3.02	0.32	32.5	99.0
<b>Thin mycelium</b>	1.33	5.03	18.2	78.4
<b>Medium mycelium</b>	1.38	7.08	21.5	75.2



## APPENDICE B

### COMPLÉMENT DE DONNÉES POUR LA TRANSMISSION DU SON

The Supplementary Figure A B-1 show the adaptation of the normal curve of the ASTM E413 to each material analysed for sound transmission in impedance tubes to determine ITS value at 500 Hz. In the case of Figure S4, it is the absorbances curves obtains during the analyse of the materials with the impedance tubes. The verticals lines delimit three intervals to compare the values obtains: 500 to 1500 Hz, 1500 to 2500 Hz and 2500 to 4000 Hz.



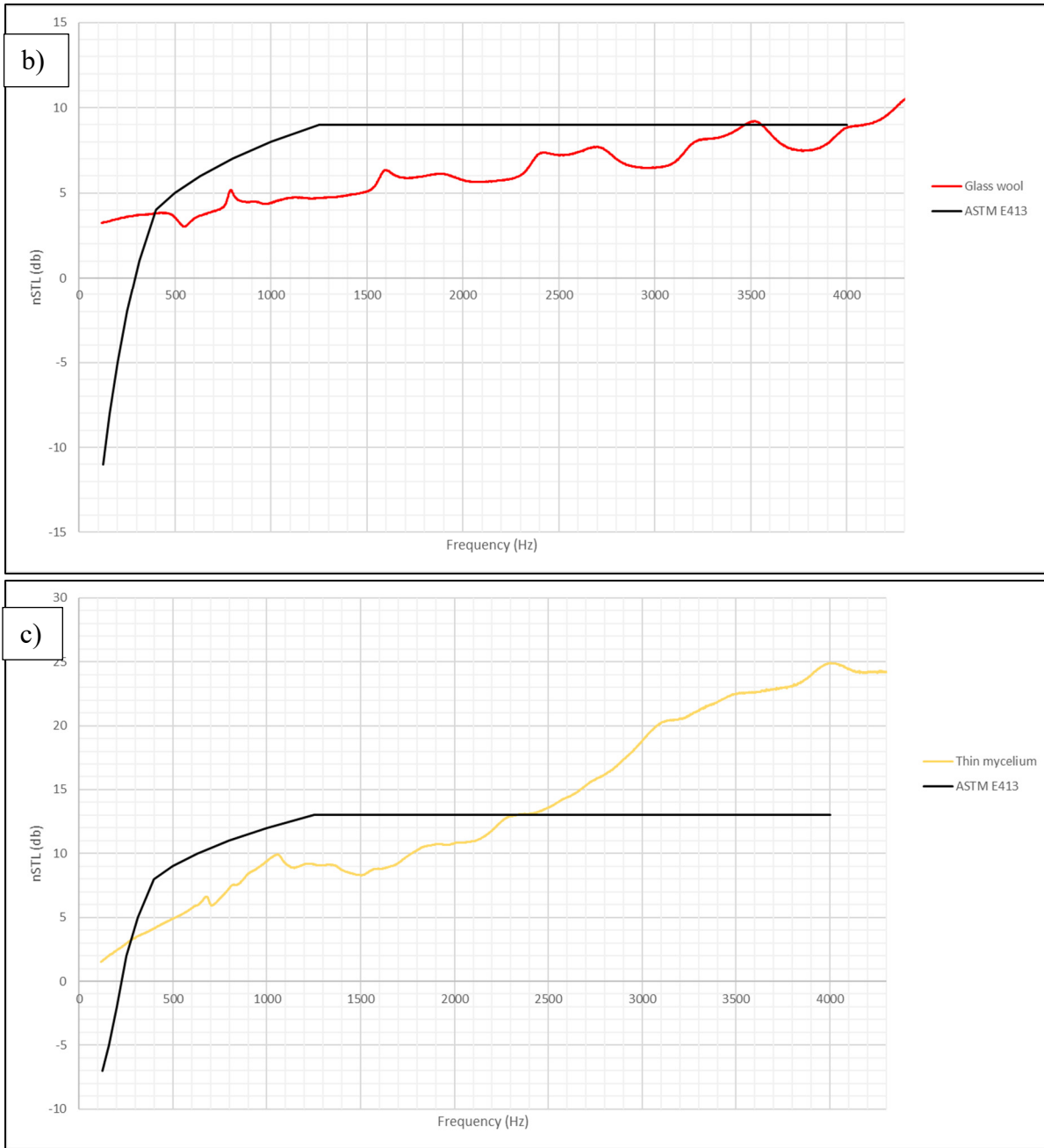


Figure A B-1 Depicting TL values adjusted to the ASTM E413 standard curve a) Hemp wool, b) Glass wool and c) Thin mycelium

## APPENDICE C

### COMPLÉMENT DE DONNÉES POUR L'ABSORPTION DU SON

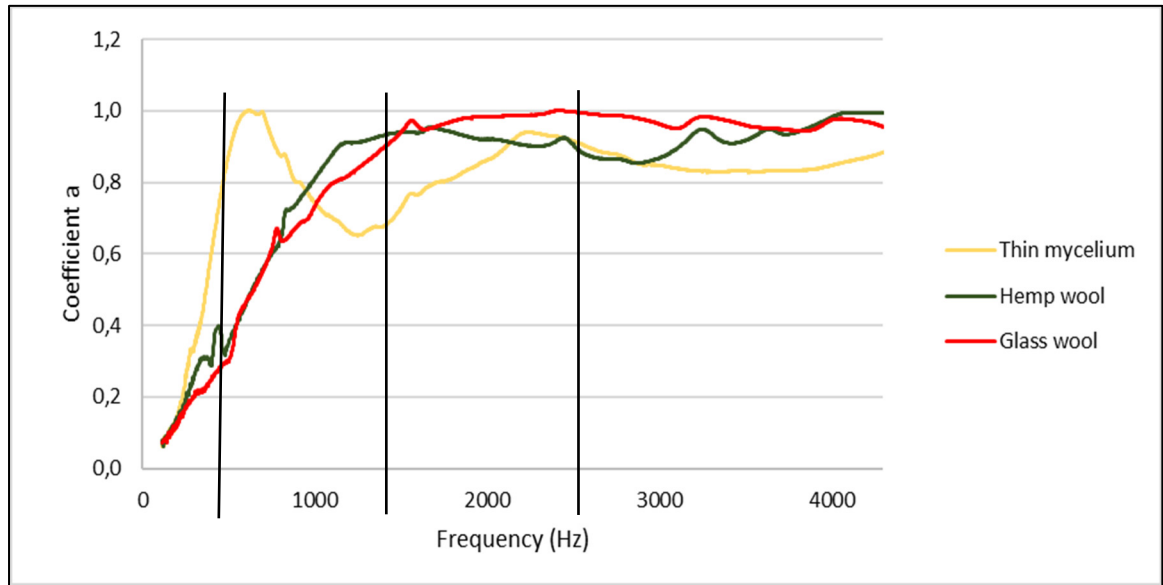


Figure A C-1 Depicting Sound absorption of different materials as a function of frequency





## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alexander E.R. (1993). Density measures: A review and analysis. *Journal of Architectural and Planning Research*, 10(3), 181-202. Repéré à <https://www.jstor.org/stable/43028746>
- Alliance™ RF Materials Test Systems (2004) MTS Systems Corporation. 100-093-592 C. 41 pages.
- Aly, A.H., Debbab, A. & Proksch, P. Fifty years of drug discovery from fungi. *Fungal Diversity* 50, 3 (2011). <https://doi.org/10.1007/s13225-011-0116-y>
- Ammara I. (2011). Cours 7 : Notions de résistance des matériaux [Notes de cours]. Repéré à <https://cours.etsmtl.ca/seg/GCLEcuyer/tch006/Notes%20de%20cours/TCH006-C7-A2012-print.pdf> (consulté le 2023/01/19)
- Anton Paar (2023). Pycnomètre à gaz pour la densité des semi-solides et des solides : Ultrapyc. Repéré à <https://www.anton-paar.com/ca-fr/produits/details/ultrapyc/?sku=228551> (consulté le 2023/02/21)
- APCHQ (2023). Qu'est-ce que l'indice ITS?. Repéré à <https://www.apchq.com/entrepreneurs/technique/chroniques-techniques/questions-et-reponses-techniques/quest-ce-que-lindice-its> (consulté le 2023/02/08)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>
- ASTM International. (2021). ASTM C518-21: Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. Repéré à <https://www.astm.org/c0518-21.html> (consulté le 2023/05/18)
- ASTM International. (2019). ASTM E1050-19: Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system. Repéré à <https://www.astm.org/e1050-19.html> (consulté le 2023/05/18)
- ASTM International. (2019). ASTM E2611-19: Standard test method for normal incidence determination of porous material acoustical properties based on the transfer matrix method. Repéré à <https://www.astm.org/e2611-19.html> (consulté le 2023/05/18)
- ASTM International. (2022). ASTM E413-22: Classification for Rating Sound Insulation. Repéré à [compass \(astm.org\)](https://www.astm.org/e413-22.html) (consulté le 2023/05/18)

- Biohm (2016). Repéré à <https://www.biohm.co.uk/> (consulté le 2022/10/15)
- Biopterre (2023). Repéré à <https://www.biopterre.com/> (consulté le 2022/09/05)
- Blais A., Lecavalier C., Langlois P. (2021, 20 mars). Les défis de quatre secteurs très polluants. *Journal de Montréal*. Repéré à <https://www.journaldemontreal.com/2021/03/20/les-defis-de-quatre-secteurs-tres-polluants> (consulté le 2022/07/22)
- Blanc de Gris (2022). Les meilleurs champignons cultivés à Montréal!. Repéré à <https://blancdegris.com/> (consulté le 2022/06/02)
- Bonnefin, I. (2017). *Emerging Materials: Mycelium Brick*. Repéré à <https://www.certifiedenergy.com.au/emerging-materials/emerging-materials-mycelium-brick> (consulté le 2022/06/18)
- Bruyant P.P. (2022). Analytic and iterative reconstruction algorithms in SPECT. *Journal of Nuclear Medicine*, 43 (10), 1343-1358. PMID: 12368373
- Castro N. (2019). Hitachi S-3600N Scanning Electron Microscope: User instruction. Naturhistorisk museum. Repéré à [https://www.nhm.uio.no/english/research/resources/geo-lab/other-equipment/instruction-manuals/u562\\_user-instructions\\_sem.pdf](https://www.nhm.uio.no/english/research/resources/geo-lab/other-equipment/instruction-manuals/u562_user-instructions_sem.pdf) (consulté le 2023/03/23)
- Chamont S. (2019). *Ephytia: Basidiomycota* [Version HYPP]. Repéré à <http://ephytia.inra.fr/fr/C/11284/Hypp-encyclopedie-en-protection-des-plantes-Les-rouilles#:~:text=Ces%20parasites%20sont%20tr%C3%AAs%20sp%C3%A9cialis%C3%A9s,genres%20ou%20esp%C3%A8ces%20d'h%C3%B4tes.&text=Ces%20champignons%20s'attaquent%20aux,o%C3%B9%20sont%20produites%20les%20spores>. (consulté le 2022/07/04)
- Chevallier C. (2016, 11 mai). Dans la capitale, il poussait dans les catacombes jusqu'à l'arrivée du métro. *Le Parisien*. Repéré à <https://www.leparisien.fr/seine-et-marne-77/dans-la-capitale-il-poussait-dans-les-catacombes-jusqu-a-l-arrivee-du-metro-11-05-2016-5784329.php> (consulté le 2022/07/04)
- Commission de la construction du Québec (2022). L'industrie de la construction. Repéré à <https://www.ccq.org/fr-CA/En-tete/qui-sommes-nous/industrie-de-la-construction#:~:text=L'industrie%20de%20la%20construction%20est%20un%20secteur%20d'activit%C3%A9,de%2067%20milliards%20%24%20en%202021>. (consulté le 2022/05/25)

- Commission de la construction du Québec (2022). Perspectives (décembre 2021). Repéré à [https://www.ccq.org/-/media/Project/Ccq/Ccq-Website/PDF/Recherche/Perspectives/Perspectives\\_2022.pdf?la=fr-CA&rev=61f5fd0afac84247870804b08fc09ef4&hash=2CF52C09855F19B30A004F448D081CED](https://www.ccq.org/-/media/Project/Ccq/Ccq-Website/PDF/Recherche/Perspectives/Perspectives_2022.pdf?la=fr-CA&rev=61f5fd0afac84247870804b08fc09ef4&hash=2CF52C09855F19B30A004F448D081CED) (consulté le 2022/05/12)
- Corriou, J. P. (1984). *Thermodynamique chimique*. Ed. Techniques Ingénieur. Repéré à <https://books.google.fr/books?id=SIQEilUn97sC> (consulté le 2023/09/27)
- C-Therm (2022). Trident. Repéré à <https://ctherm.com/thermal-conductivity-instruments/trident/> (consulté le 2022/09/27)
- C-Therm technologies<sup>Ltd</sup> (2008). C-Therm TCi Operator Manuel. Repéré à [Download C-THERM TCi Operator's Manual | ManualsLib](#) (consulté le 2023/09/27)
- Després J., Lamoureux Y., Boyer R., Archambault R. et Jean A. (2002). *Mille et un champignons du Québec*. Montréal (Québec). Cercle des mycologues de Montréal (consulté le 2022/06/21)
- Diouf, B. (2021). *La face cachée du grand monde des microbes et pourquoi nous leur devons tant*. Anjou (Québec). Les éditions La Presse. (consulté le 2022/06/22)
- Dobrowolska K. (2021). Comment la construction affecte-t-elle l'environnement? Repéré à <https://archdesk.com/fr/blog/comment-la-construction-affecte-t-elle-lenvironnement/#:~:text=En%20r%C3%A9alit%C3%A9%2C%20le%20secteur%20de,peu%20plus%20dans%20les%20d%C3%A9tails> (consulté le 2022/06/21)
- Dubé, I. (2022). Industrie de la construction : « On jette de bons matériaux aux ordures ». *La Presse*. <https://www.lapresse.ca/affaires/2022-09-06/industrie-de-la-construction/on-jette-de-bons-materiaux-aux-ordures.php> (consulté le 2022/06/21)
- Dubé J-S., Duhaime F. (2022). MGC-861 : Hydrogéologie appliquée. École de technologie supérieure (consulté le 2023/07/06)
- Ecovative (2023). Ecovative. Repéré à <https://ecovative.com> (consulté le 2023/05/12)
- Ecovative (2022). Food. Repéré à <https://www.ecovative.com/pages/food> (consulté le 2022/06/07)
- Ecovative (2022). Packaging. Repéré à <https://www.ecovative.com/pages/packaging> (consulté le 2022/06/07)
- Ecovative (2023). Spawn and Substrate. Repéré à <https://www.ecovative.com/pages/spawn#our-strains> (consulté le 2023/05/12)

- El-Bondkly, A. M. A. (2014). Chapter 28—Sequence Analysis of Industrially Important Genes from Trichoderma. Dans V. K. Gupta, M. Schmoll, A. Herrera-Estrella, R. S. Upadhyay, I. Druzhinina, & M. G. Tuohy (Éds.), *Biotechnology and Biology of Trichoderma* (p. 377-392). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59576-8.00028-X>
- Elsacker, E., Vandeloock, S., Brancart, J., Peeters, E., & De Laet, L. (2019). Mechanical, physical and chemical characterization of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLOS ONE*, *14*(7), e0213954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>
- FAO (2023). L'état de la sécurité alimentaire dans le monde 2022. Repéré à <https://www.fao.org/publications/sofi/2022/fr/> (consulté le 2023/03/16)
- Gchem (2023). Heat Capacities for Some Select Substances. University of Texas. Repéré à <https://gchem.cm.utexas.edu/data/section2.php?target=heat-capacities.php> (consulté le 2023/06/07)
- Geng, Y., Zhu, S., Lu, Z., Xu, H., Shi, J.-S., & Xu, Z.-H. (2014). Anti-inflammatory activity of mycelial extracts from medicinal mushrooms. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, *16*(4), 319-325. <https://doi.org/10.1615/intjmedmushrooms.v16.i4.20>
- Girometta C, Picco A, Baiguera R, Dondi D, Babbini S, Cartabia M, *et al.* (2019). Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review. *Sustainability*. *11*(1): 281. <https://doi.org/10/gfwn9n>
- Gouvernement du Canada (2023). *Agrile du frêne*. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/forets/feux-insectes-perturbations/principaux-insectes-et-maladies-des-forets-au-canada/agrile-du-frene/13378> (consulté le 2023/04/18)
- Gouvernement du Canada (2023). *Sommaire du brevet 2834095*. Base de données sur les brevets canadiens. Repéré à <https://brevets-patents.ic.gc.ca/opic-cipo/cpd/fra/brevet/2834095/sommaire.html> (consulté le 2023/06/27)
- Gouvernement du Canada (2022). *Économie circulaire*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/services/environnement/conservation/durabilite/economie-circulaire.html> (consulté le 2022/05/27)
- Gouvernement du Canada (2022). *ePATHogène – la base de données sur les groupes de risque*. Repéré à <https://health.canada.ca/fr/epathogene> (consulté le 2022/07/03)
- Gouvernement du Canada (2014). *Fiche technique santé-sécurité : Agents pathogènes – Candida albicans*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/biosecurite-biosurete-laboratoire/fiches-techniques-sante-securite->

[agents-pathogenes-evaluation-risques/candida-albicans-fiches-technique-sante-securite-agents-pathogenes.html](https://agents-pathogenes-evaluation-risques/candida-albicans-fiches-technique-sante-securite-agents-pathogenes.html) (consulté le 2022/07/03)

Gouvernement du Canada (2013). *Principaux contaminants atmosphériques : oxydes d'azote*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/pollution-atmospherique/polluants/principaux-contaminants/oxydes-azote.html> (consulté le 2022/07/03)

Hagedoorn P-L. (2022). Isothermal titration calorimetry in biocatalysis. *Sec. Biocatalysis*, 2(1). doi: <https://doi.org/10.3389/fctls.2022.906668>

Hare R. (1982). Nez light on the history of penicillin. *Edical History* **26 (1)**, 1-24. doi: [doi.org/10.1017/S0025727300040758](https://doi.org/10.1017/S0025727300040758)

Hilleman M.R. (1987). Yeast recombinant hepatitis B vaccine. *Infection* **15 (1)**, 3-7. Doi: [doi.org/10.1007/BF01646107](https://doi.org/10.1007/BF01646107)

JGI (2022). *Revealing Aspergillus diversity for industrial applications*. Repéré à <https://jgi.doe.gov/revealing-aspergillus-diversity-industrial-applications/#:~:text=Aspergillus%20niger%2C%20for%20example%2C%20has,and%20plant%20and%20human%20health>. (consulté le 2022/08/16)

ISO (2015). ISO 10534-2 :1998 : Acoustique – Détermination du facteur d'absorption acoustique et de l'impédance des tubes d'impédance – Partie 2 : Méthode de la fonction de transfert. Repéré à <https://www.iso.org/fr/standard/22851.html> (consulté le 2023/04/22)

Isolofoam (2023). Convertisseur valeur R et RSI. Repéré à <https://isolofoam.com/fr/convertisseur-r-rsi/> (consulté le 2023/04/11)

Jones, M., Bhat, T., Kandare, E., Thomas, A., Joseph, P., Dekiwadia, C., Yuen, R., John, S., Ma, J., & Wang, C.-H. (2018). Thermal Degradation and Fire Properties of Fungal Mycelium and Mycelium—Biomass Composite Materials. *Scientific Reports*, 8(1), 17583. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36032-9>

Knaebel R. (2014, 11 septembre). La Première Guerre mondiale, passé refoulé de l'industrie chimique européenne. *Observatoire des multinationales*. Repéré à <https://multinationales.org/fr/actualites/la-premiere-guerre-mondiale-passe-refoule-de-l-industrie-chimique-europeenne> (consulté le 2022/05/18)

Koruk H. (2014). An assessment of the performance of impedance tube method. *Noise Control Engineering Journal*. Institute of Noise Control Engineering, 62(4). 264-274. <https://doi.org/10.3397/1/376226>

- Krapez J-C. (2006). Mesure de l'effusivité thermique. Techniques de l'ingénieur. Repéré à <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/methodes-thermiques-d-analyse-42384210/mesure-de-l-effusivite-thermique-r2957/definition-de-l-effusivite-thermique-r2957niv10001.html> (consulté le 2023/06/15)
- Ledru, Y., Piquet, R., Michel, L., Schmidt, F., & Bernhart, G. (2009). Quantification 2-D et 3-D de la porosité par analyse d'images dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques. In P. O. et J. LAMON (Éd.), *JNC 16* (p. 11 p.). AMAC. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00386035>
- Lee Allen S. (2004). *Jardins et cuisines du diable*. Paris (France). AUTREMENT. (consulté le 2022/06/12)
- Levasseur-Thériault, G. (2018). 210-160-AH: Spectrométrie moléculaire. Collège Ahuntsic. (consulté le 2023/07/06)
- Liu, P.R., Raftery, A.E. (2021). Country-based rate of emissions reductions should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet the 2 °C target. *Commun Earth Environ* **2** (1), 29. doi : [10.1038/s43247-021-00097-8](https://doi.org/10.1038/s43247-021-00097-8)
- Lowell S., Schields J.E., Thomas M.A., Thommes M. (2004). Density Measurement. In: Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density. Particle Technology Series, vol 16. Springer, Dordrecht. DOI : [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2303-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2303-3_19)
- Material Properties. (2021). *Glass Wool | Density, Heat Capacity, Thermal Conductivity*. Repéré à <https://material-properties.org/glass-wool-density-heat-capacity-thermal-conductivity/> (consulté le 2023/05/18)
- McNeil, R. (2006). *Le grand livre des champignons du Québec et de l'est du Canada*. Waterloo (CA), Éditions Michel Quintin (consulté le 2022/06/13)
- Mecanum (2023). Mesure de l'absorption acoustique (alpha) en tube d'impédance. Repéré à <https://mecanum.com/fr/learning-center/acoustic-materials/absorption-coefficient-in-impedance-tube/#:~:text=Un%20tube%20d'imp%C3%A9dance%2C%20aussi,du%20mat%C3%A9riau%20acoustique%20%C3%A0%20tester.> (consulté le 2023/02/04)
- Mettler Toledo. (s.d.). Analyse thermogravimétrique. Repéré à [https://www.mt.com/ca/fr/home/library/on-demand-webinars/lab-analytical-instruments/Thermogravimetric\\_Analysis.html](https://www.mt.com/ca/fr/home/library/on-demand-webinars/lab-analytical-instruments/Thermogravimetric_Analysis.html) (consulté le 2023/06/29)

- Millipore Sigma. (2023). Absorbance to Transmittance Converter. Repéré à <https://www.sigmaaldrich.com/CA/en/support/calculators-and-apps/absorbance-transmittance-conversion> (consulté le 2023/06/29)
- Millipore Sigma. (2023). What is FTIR Spectroscopy? Repéré à <https://www.sigmaaldrich.com/CA/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ftir-spectroscopy> (consulté le 2023/06/29)
- Millipore Sigma. (2023). IR Spectrum Table & Chart. Repéré à <https://www.sigmaaldrich.com/CA/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ir-spectrum-table> (consulté le 2023/06/29)
- Mokhena, T. C., Mochane, M. J., Sefadi, J. S., Motloung, S. V., & Andala, D. M. (2018). Thermal Conductivity of Graphite-Based Polymer Composites. *Impact of Thermal Conductivity on Energy Technologies*. doi:10.5772/intechopen.75676
- Molle, D., & Patry, P.-M. (2011). *RT 2012 et RT Existant : Réglementation thermique et efficacité énergétique*. Eyrolles. Repéré à [https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/rt-2012-et-rt-existant-9782212142860/#:~:text=Les%20r%C3%A9glementations%20thermiques%20\(RT%202012,gaz%20%C3%A0%20effet%20de%20serre](https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/rt-2012-et-rt-existant-9782212142860/#:~:text=Les%20r%C3%A9glementations%20thermiques%20(RT%202012,gaz%20%C3%A0%20effet%20de%20serre). (consulté le 2023/03/09)
- Moore D., Robson G.D., Trinci A.P.J. (2020). *21<sup>st</sup> Century Guidebook to Fungi* (2e éd). Cambridge: Cambridge University Press (consulté le 2022/06/28)
- Morrow M. (2022). A Photographic atlas for Botany. The Academic Senate for California Community Colleges Open Educational Ressources Initiative (OERI). 1(1), 376 p. Repéré à [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Botany/A\\_Photographic\\_Atlas\\_for\\_Botany\\_\(Morrow\)/03%3A\\_Fungi\\_and\\_Lichens/3.06%3A\\_Basidiomycota\\_\(Club\\_Fungi\)/3.6.03%3A\\_Life\\_Cycles\\_of\\_Basidiomycetes](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Botany/A_Photographic_Atlas_for_Botany_(Morrow)/03%3A_Fungi_and_Lichens/3.06%3A_Basidiomycota_(Club_Fungi)/3.6.03%3A_Life_Cycles_of_Basidiomycetes)
- Mycoboutique (2022). Repéré à <https://mycoboutique.com/fr> (consulté le 2022/08/17)
- Mycoworks (2023). Repéré à <https://www.mycoworks.com/> (consulté le 2023/03/22)
- Nagata Y., Usui K., Bonn M. (2015). Molecular mechanism of water evaporation. *Physical review letters*. 115(1). doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.236102>
- Naturchanvre (s.d.). Repéré à [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0538/5420/8197/files/Isofib\\_naturchanre.pdf?v=1613166486](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0538/5420/8197/files/Isofib_naturchanre.pdf?v=1613166486) (consulté le 2023/02/15)



- Nasrollahzadeh M., Atarod M., Sajjadi M., Sajadi M., Issaabadi Z. (2019). Chapter 6 : Plant-mediated green synthesis of nanostructures : mechanisms, characterization, and applications: 6.8.5.2 Thermal gravimetric analysis. Dans *Interface Science and Technology* (28, pp 199-322). doi: [https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/thermogravimetric-analysis#:~:text=Thermal%20gravimetric%20analysis%20\(TGA\)%20is,%2For%20constant%20mass%20loss](https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/thermogravimetric-analysis#:~:text=Thermal%20gravimetric%20analysis%20(TGA)%20is,%2For%20constant%20mass%20loss)).
- Office de la propriété intellectuelle du Canada (2021). La Gazette du Bureau des brevets. Gouvernement du Canada, 149(51), 174 pages. Repéré à [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2021/opic-cipo/RG42-1-149-51.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2021/opic-cipo/RG42-1-149-51.pdf) (consulté le 2023/05/18)
- Office, E. P. (2019). *Des emballages eco-friendly à base de champignons Eben Bayer et Gavin McIntyre finalistes du Prix de l'inventeur européen 2019*. Office européen des brevets. Repéré à [https://www.epo.org/news-events/press/releases/archive/2019/20190507i\\_fr.html](https://www.epo.org/news-events/press/releases/archive/2019/20190507i_fr.html) (consulté le 2022/06/11)
- Organisation mondiale de la Santé (2021). Rapport des Nations Unies : L'année de la pandémie est marquée par une hausse de la faim dans le monde. Repéré à <https://www.who.int/fr/news/item/12-07-2021-un-report-pandemic-year-marked-by-spike-in-world-hunger> (consulté le 2022/06/07)
- Owens Corning. (2021). Fiche récapitulative des critères de performance des isolants rose Next Genmc Fiberglasmd de la prochaine génération. Repéré à <https://www.owenscorning.com/fr-ca/insulation/products/quietzone-next-gen> (consulté le 2023/04/08)
- Peak D. (2005). Fourier transform infrared spectroscopy. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 80-85. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00174-0> (consulté le 2023/06/29)
- Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Lara, A. J., Tapia-Carillo, A., McIntyre, G., & Bayer, E. (2017). An evaluation study of pressure-compressed acoustic absorbers grown on agricultural by-products. *Industrial Crops and Products*, 95(1), 342-347. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.042>
- PerkinElmer (2010). Thermogravimetric analysis (TGA): A beginner's guide. Repéré à [https://resources.perkinelmer.com/corporate/cmsresources/images/44-74556gde\\_tgabeginnersguide.pdf](https://resources.perkinelmer.com/corporate/cmsresources/images/44-74556gde_tgabeginnersguide.pdf) (consulté le 2023/06/29)
- Peters, A. (2021). *Your next house could be insulated by mushrooms*. Fast Company. Repéré à <https://www.fastcompany.com/90683022/your-next-house-could-be-insulated-by-mushrooms> (consulté le 2022/06/12)



- Pomerleau R. (1980). *Flore des champignons au Québec et régions limitrophes*. Montréal, CAN : Éditions La Presse. (consulté le 2022/06/12)
- Postek M.T. (1997). *The Scanning Electron Microscope in Handbook of Charged Particale Optics*. CRC Press. Université du Maryland. (consulté le 2023/04/17)
- Sahasrabudhe, S. N., Rodriguez-Martinez, V., O'Meara, Meghan., & Farkas, B. E. (2017). Density, viscosity, and surface tension of five vegetable oils at elevated temperatures : Measurement and modeling. *International Journal of Food Properties*, 20(sup2), 1965-1981. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1360905>
- Scheuer C., Bauer R., Lutz M., Stabentheiner E., Mel'nik V., Grube M. (2008). *Bartheletia paradoxa is a living fossil on Ginkgo leaf litter with a unique septal structure in the Basidiomycota*. *Mycological research*. 112(1), 1265-79. Doi : 10.1016/j.mycres.2008.06.008
- Siemens. (2021). Sound Absorption. Repéré à <https://community.sw.siemens.com/s/article/sound-absorption> (consulté le 2023/04/17)
- TA Instruments (2023). New TAM Air. Repéré à [https://www.tainstruments.com/new-tam-air/?gclid=CjwKCAjwq-WgBhBMEiwAzKSH6GB-eQFEMGVhwGzT-vtMhaq6p5TlcfDhKe4QMcSxmsy89gwoK1fCcRoCApgQAvD\\_BwE](https://www.tainstruments.com/new-tam-air/?gclid=CjwKCAjwq-WgBhBMEiwAzKSH6GB-eQFEMGVhwGzT-vtMhaq6p5TlcfDhKe4QMcSxmsy89gwoK1fCcRoCApgQAvD_BwE) (consulté le 2022/09/29)
- TA Instruments (2020). TAM Air Isothermal Calorimetry. TA Instruments/ Waters Corporation. L20056.001. Repéré à <https://www.tainstruments.com/pdf/brochure/TAM-AIR-brochure.pdf> (consulté le 2022/09/29)
- Tenny K.M., Cooper J.S. (2022). Ideal gas behavior. National Library of Medecine. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441936/> (consulté le 2023/05/18)
- Thompson D. G. (2013). TreeAzin<sup>®</sup> - Un insecticide systémique naturel pour lutter contre l'agrile du frêne au Canada. *Frontline*, 34931. (consulté le 2022/09/29)
- Tortora G., Funka B., Case C. (2017). *Introduction à la microbiologie* (3e éd.). Montréal : ERPI sciences (consulté le 2022/07/14)
- UL Solutions (2023). Bâtiments et matériaux de construction. Repéré à <https://canada.ul.com/fr/programmesulc/buildingandconstructionmaterials/> (consulté le 2022/09/27)
- United Nations Framework Convention on Climate Change (2022). L'accord de Paris. Repéré à <https://unfccc.int/fr/processus-et-reunions/l-accord-de-paris/l-accord-de->

[paris?fbclid=IwAR19DcYXXaceOHWS3vWoUd2u\\_e4gIv4aNIGr2B9\\_-u4kH1e\\_j0SKcZ-CZEs](https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1246570) (consulté le 2022/05/16)

Wang, Z., Ma, H., Chu, B., & Hsiao, B. S. (2017). Super-hydrophobic polyurethane sponges for oil absorption. *Separation Science and Technology*, 52(2), 221-227. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1246570>

Willis, K. J. (2018). *State of the World's Fungi*. (éd 2018). Burlington: Royal Botanic Gardens, Kew. (consulté le 2022/05/16)

Wu, T. V. (2011). *Formalisme des impedances thermiques généralisées : application à la caractérisation thermique des parois de bâtiments*. (Thèse de doctorat, Université d'Artois, France). Repéré à <https://www.theses.fr/034634894> (consulté le 2023/04/19)

Xing, Y., Brewer, M., El-Gharabawy, H., Griffith, G., & Jones, P. (2018). Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 121. [doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022032](https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022032)

Zhao, RL., Li, GJ., Sánchez-Ramírez, S. *et al.* (2017) A six-gene phylogenetic overview of *Basidiomycota* and allied phyla with estimated divergence times of higher taxa and a phyloproteomics perspective. *Fungal Diversity* 84(1), 43–74. doi:10.1007/s13225-017-0381-

