HAL
open science

Caractérisations multi-physiques des mortiers bio-sourcés isolants et modélisation de leurs impacts sur les transferts hygrothermiques à l'échelle des parois : application aux bétons de moelles végétales

Mohamed Said Abbas

To cite this version:

Mohamed Said Abbas. Caractérisations multi-physiques des mortiers bio-sourcés isolants et modélisation de leurs impacts sur les transferts hygrothermiques à l'échelle des parois : application aux bétons de moelles végétales. Construction durable. Université de Lyon, 2021. Français. NNT : 2021LYSET003 . tel-03560841

HAL Id: tel-03560841

https://theses.hal.science/tel-03560841v1

Submitted on 7 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N°d'ordre NNT : 2021LYSET003

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

opérée au sein de

École Nationale des Travaux Publics de l'État

École Doctorale n° 162
MEGA (Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique)

Spécialité / discipline de doctorat : Génie Civil

Soutenue publiquement le 12/03/2021, par :

Mohamed Said ABBAS

Caractérisations multi-physiques des mortiers biosourcés isolants et modélisation de leurs impacts sur les transferts hygrothermiques à l'échelle des parois. Application aux bétons de moelles végétales

---

Devant le jury composé de :

Woloszyn, Monika	Professeure	Univ. Savoie Mont Blanc	Rapportrice
Belarbi, Rafik	Professeur	Univ. de La Rochelle	Rapporteur
Laborel-Préneron, Aurélie	MCF	Univ. Toulouse III	Examinatrice
Amziane, Sofiane	Professeur	Univ. Clermont Auvergne	Examinateur
Perlot-Bascoulès, Céline	MCF HDR	Univ. Pau et des Pays de l'Adour	Examinatrice
Fabbri, Antonin	DR HDR	ENTPE	Directeur de thèse
McGregor, Fionn	CR	ENTPE	Co-encadrant
Ferroukhi, Yacine	MCF	Ecole Centrale de Lyon	Co-encadrant

"*One thing I have learned in a long life: that all our science, measured against reality, is primitive and childlike – and yet it is the most precious thing we have.*"

Albert Einstein

Table des matières

Résumé VII

Abstract VIII

Remerciements IX

Nomenclature XI

Valorisation de la thèse XVIII

Liste de Figures XIX

Liste de Tableaux XXVI

Chapitre 0 : Introduction générale et problématique générale de la thèse 1

0.1. Utilisation des matériaux biosourcés dans le bâtiment 2

0.1.1. Impact environnemental du bâtiment 2

0.1.2. Le patrimoine bâti vernaculaire 3

0.1.3. Bétons biosourcés pour la construction 5

0.2. Problématique de la thèse 21

0.2.1. Contexte 21

0.2.2. Objectifs 22

0.3. Organisation du document 22

Partie I : Propriétés du béton de moelle et de chanvre à l'échelle du matériau 24

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les caractéristiques principales des bétons biosourcés et les interactions liant-granulat 25

1.1. Propriétés des matériaux biosourcés et méthodes de caractérisation 26

1.1.1. Propriétés physiques 26

1.1.2. Propriétés mécaniques 33

1.1.3. Propriétés thermiques 40

1.1.4. Propriétés hygroscopiques 44

1.2. Les interactions liant-granulat dans la littérature 56

1.2.1. Echelle microscopique 57

1.2.2. Echelle macroscopique 62

Chapitre 2 : Caractérisation mécanique et hygrothermique des bétons biosourcés – Analyse comparative entre béton de chanvre et béton de moelle 65

2.1. Introduction 66

2.2. Impact de l'origine des granulats 67

2.2.1. Matériaux et méthodes 67

2.2.2. Résultats et discussion 73
2.2.3. Conclusion 81
2.3. Impact du liant et de la formulation 81
2.3.1. Matériaux et méthodes 81
2.3.2. Etude de la microstructure 84
2.3.3. Etude des propriétés macroscopiques 91
2.3.4. Discussion sur le potentiel hygroscopique des bétons à base de moelle 106
2.3.5. Conclusion 109
2.4. Conclusion générale du chapitre 111
Chapitre 3 : Lien entre la morphologie du réseau poreux et le comportement hygrothermique 112
Nomenclature du chapitre 113
3.1. Introduction 116
3.2. Paramètres géométriques et propriétés acoustiques des matériaux poreux 117
3.2.1. Paramètres géométriques 117
3.2.2. Propriétés acoustiques 121
3.3. Modèles acoustiques 123
3.4. Etude de la morphologie poreuse par les méthodes acoustiques 124
3.4.1. Matériaux 124
3.4.2. Méthode de caractérisation acoustique (tube de Kundt) 127
3.4.3. Résultats 132
3.4.4. Discussion 137
3.5. Lien avec les propriétés hygrothermiques 137
3.5.1. Matériaux 137
3.5.2. Méthodes 137
3.5.3. Résultats 138
3.5.4. Discussion 140
3.6. Conclusion 148
Chapitre 4 : Impact de la teneur en eau sur les propriétés hygrothermiques 150
4.1. Introduction 151
4.2. Matériaux et méthodes 153
4.2.1. Matériaux 153

4.2.2. Méthodes 154
4.3. Résultats 157
4.3.1. Impact de la teneur en eau sur la conductivité thermique 157
4.3.2. Impact de la teneur en eau sur l'effusivité thermique 159
4.3.3. Impact de la teneur en eau sur la chaleur spécifique 160
4.3.4. Impact de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur 161
4.4. Discussion 161
4.4.1. Impact de la teneur en eau sur la conductivité thermique 161
4.4.2. Impact de la teneur en eau sur l'effusivité thermique 165
4.4.3. Impact de la teneur en eau sur la chaleur spécifique 166
4.4.4. Impact de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur 168
4.5. Conclusion 175
Partie II : Propriétés du béton de moelle et de chanvre à l'échelle de la paroi 176
Chapitre 5 : Etude numérique des transferts hygrothermiques 177
5.1. Introduction 178
5.2. Modélisation des transferts hygrothermiques 178
5.2.1. Définition des modèles mathématiques existants 178
5.2.2. Définition du modèle utilisé 181
5.2.3. Définition des conditions aux limites 183
5.2.4. Code de calcul 194
5.3. Validation du modèle 196
5.3.1. Validation numérique 196
5.3.2. Validation expérimentale 201
5.4. Analyse critique et mise en œuvre de la simulation 206
5.4.1. Définition des études de cas 206
5.4.2. Implémentation numérique 211
5.4.3. Résultats et discussion 214
5.5. Conclusion 226
Chapitre 6 : Étude de la perturbation induite par les appareils de mesure sur les mesures hygrothermiques à travers une paroi – Application pratique de la simulation numérique 228
6.1. Introduction 229
6.2. Matériaux 230

6.3. Mise au point de l'étude expérimentale 230
6.4. Mise au point de l'étude numérique 232
6.5. Résultats 234
6.5.1. Résultats expérimentaux 234
6.5.2. Résultats de la simulation 234
6.6. Conclusion 238
Conclusion générale et perspectives 239
Bibliographie 242
Annexe A - Comparaison de matériaux isolants 276
Annexe B - Méthodes de mesure de la conductivité thermique 277
Annexe C - Classification des courbes de sorption et d'hystérésis 279
Annexe D - Méthodes de mesure 281
D.1. Aire de la surface spécifique 281
D.2. Distribution de la taille des pores : Modèle Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 283
Annexe E - Autres modèles acoustiques 285
E.1. Modèles semi-phénoménologiques 287
E.2. Modèles empiriques 290
Annexe F - Modèles mathématiques existants 292
Annexe G - Etude des causes et influences des transports de masse et de chaleur 300
Annexe H - Modèle mathématique des transferts couplés de masse et de chaleur 302
H.1. Hypothèses du modèle choisi 302
H.2. Equations 303
Conservation de la masse 303
Conservation de la chaleur 307
Annexe I - Détails des benchmarks hygrothermiques 311
Annexe J - Définition des climats pour la modélisation 318
Annexe K - Différence entre les climats de Bourg Saint Maurice et Nice sur un an 321
Annexe L - Définition de P_v selon HR et T°C et de la formulation de la $P_{v,sat}$ .322
Annexe M - Courbes complémentaires obtenues à partir de la simulation 325

Résumé

En France, la réglementation thermique pour les bâtiments évolue pour faire face aux enjeux climatiques. La loi Grenelle 2 et le Plan de Rénovation Energétique de l'Habitat établissent des exigences qui motivent la recherche de solutions novatrices pour l'isolation de bâtiments à fortes déperditions thermiques. C'est le cas du patrimoine vernaculaire, dont la bio-rénovation énergétique est au cœur de ce projet de thèse. Dans ce contexte, la filière des agro-bétons connaît actuellement un essor poussé par les avantages économiques et environnementaux de l'exploitation de déchets agricoles et de la production locale de ressources.

Ce travail cherche à caractériser des bétons à base de chaux et de moelle de tournesol et de maïs, deux sous-produits agricoles disponibles en grande quantité et dont les propriétés ont été peu étudiées. A cette fin, une étude des caractéristiques mécaniques, hygrothermiques et acoustiques, comparées aux propriétés du béton de chanvre, est menée, en mettant l'accent sur l'impact des couples liant-granulat. Cette campagne expérimentale a le double objectif d'explorer de nouvelles méthodes de caractérisation des propriétés macroscopiques. En outre, un modèle mathématique, qui prend en considération le couplage des effets thermiques et hygroscopiques, est proposé afin de décrire la réponse hygrothermique des bétons étudiés à l'échelle paroi.

L'étude expérimentale a permis de constater que les bétons de moelle à faible densité présentent des caractéristiques mécaniques relativement faibles, les classant à la limite du seuil pour les applications de type « mur » des Règles Professionnelles Construire en Chanvre. Toutefois, ses propriétés hygrothermiques intéressantes, dont la variation avec l'humidité a été déterminée, le rendent apte à l'utilisation en tant qu'isolant intérieur, qui est l'application principale envisagée par le projet. La campagne a également mis en évidence l'ampleur de l'impact des interactions entre la moelle et le liant sur les propriétés et l'importance d'étudier la compatibilité entre agrégats et liants lors du développement de nouveaux bétons. Lors de cette campagne, un nouveau dispositif de mesure de la conductivité thermique des parois a été mis en place. L'étude croisée des propriétés a débouché en une contribution à la détermination de la conductivité thermique et de la perméabilité à la vapeur à partir de mesures acoustiques.

D'autre part, les résultats de l'étude numérique soulignent l'influence du climat sur la réponse de la paroi, qui détermine le choix du matériau isolant, et ont révélé que la présence de moelle ne garantit pas un degré d'hygroscopicité du béton plus important que la présence de chènevotte. Cette hygroscopicité a été prouvée avoir un impact non négligeable sur les flux thermiques en surface. Enfin, le modèle numérique proposé est utilisé pour quantifier l'impact de la présence de différents types de fluxmètres sur le flux thermique traversant une paroi lors d'un essai au laboratoire sous des sollicitations hygrothermiques maîtrisées.

Mots-clés

Moelle de tournesol, moelle de maïs, bétons biosourcés, béton de chanvre, matériaux isolants, interactions liant-granulat, couplage hygrothermique, milieux poreux

Abstract

In France, thermal regulations for buildings are changing to face the climatic challenges. The “Grenelle 2” law and the “Plan de Rénovation Energétique de l'Habitat” strategy establish requirements that motivate the search for innovative solutions for the insulation of buildings with high thermal losses. This is the case of national heritage, whose bio-energy retrofit is at the heart of this thesis project. In this context, the agro-concrete industry is currently experiencing an upturn driven by the economic and environmental benefits of the exploitation of agricultural waste and of the local production of resources.

This work seeks to characterize lime-based concretes made from sunflower pith and maize pith, two agricultural by-products available in large quantities and whose properties have been scarcely studied. To this end, a study of the mechanical, hygrothermal and acoustical characteristics, compared to the properties of hemp concrete, is carried out, focusing on the impact of the binder-aggregate couples. This experimental campaign has the double objective of exploring new methods of characterization of macroscopic properties. In addition, a mathematical model, which considers the coupling of thermal and hygroscopic effects, is proposed in order to describe the hygrothermal response of the concretes studied at the wall scale.

The experimental study has corroborated that lightweight pith concretes show relatively low mechanic characteristics, which place them in the limit of the threshold for “wall”-type applications according to the “Règles Professionnelles Construire en Chanvre” guideline. However, its interesting hygrothermal properties, whose variation with humidity was determined, make it suitable for use as interior insulation, which is the main application envisioned by the project. The campaign also highlighted the extent of the impact of the interactions between the pith and the binder on the properties and the importance of studying the compatibility between aggregates and binders when developing new concretes. During this campaign, a new device for measuring the thermal conductivity of walls was conceived. The cross study of the properties resulted in a contribution to the determination of thermal conductivity and water vapour permeability from acoustic measurements.

On the other hand, the results of the numerical study underline the influence of climate on the response of the wall, which determines the choice of the insulating material, and revealed that the presence of pith does not guarantee a greater degree of hygroscopicity of the concrete than the presence of hemp shiv. This hygroscopicity has been proven to have a significant impact on surface heat flows. Lastly, the proposed numerical model is used to quantify the impact of the presence of several kinds of thermal flowmeters on the heat flow passing through a wall during a laboratory test under controlled hygrothermal solicitations.

Keywords

Sunflower pith, maize pith, bio-based concretes, hemp concrete, insulating materials, binder-aggregate interactions, hygrothermal coupling, porous media

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance aux personnalités qui ont accepté de constituer mon jury de thèse. Plus précisément, j'adresse mes vifs remerciements aux rapporteurs Pr. Monika Woloszyn et Pr. Rafik Belarbi pour le temps consacré à ce projet et pour leurs suggestions, qui ont contribué à l'amélioration de ce travail. Je remercie vivement le Pr. Sofiane Amziane, qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à mon travail en acceptant de présider le jury de thèse, ainsi qu'aux examinatrices Mmes Aurélie Laborel-Préneron et Céline Perlot Bascoulès.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet DIVA, financé par l'ADEME, appartenant au programme Démonstrateur de la Transition Ecologique et Energétique des Investissements d'Avenir (PIA), et coordonné par Parex Group, partenaire industriel représenté par Mmes Anne Daubresse et Cécile Bousquet, qui je remercie également pour leur accompagnement tout le long de ma thèse. Ce projet n'aurait pas pu avoir lieu sans la collaboration des partenaires du projet. Ces partenaires sont : les coopératives agricoles Ovalie, GDA de Loches-Montrésor et Groupe Dauphinoise, que je remercie pour avoir fourni les matières premières, à savoir la moelle de tournesol et de maïs ; le Groupe F.L.D.I., qui a développé un processus de séparation de la moelle et l'écorce ; et finalement, UniLaSalle, qui se sont occupés de la caractérisation des matières végétales aux différentes étapes de production.

Les travaux présentés dans ce manuscrit se sont déroulés au sein du laboratoire commun LTDS entre l'ENTPE et l'ENISE sous la tutelle de mon directeur de thèse M. Antonin Fabbri, qui m'a tant guidé et scientifiquement conseillé et qui a toujours été là pour moi, et de mes co-encadrants M. Fionn McGregor, qui a toujours été à l'écoute, et M. Yacine Ferroukhi, qui n'a jamais manqué de conseils. Je souhaite exprimer ma très grande gratitude envers tous les trois, qui m'ont donné la chance de me développer dans le plan académique et personnel et dont l'aide précieuse m'a permis de mener à terme ce projet de thèse. Je leur adresse ma profonde reconnaissance car ils n'ont jamais laissé mes questions sans une réponse pertinente. Je les remercie pour leurs vastes connaissances dans le domaine des transferts dans les milieux poreux et la caractérisation des éco-matériaux, pour leurs conseils scientifiques et pour le plaisir que j'ai eu à travailler avec eux.

J'adresse également de sincères remerciements à Emmanuel Gourdon et Philippe Glé, avec qui j'ai eu l'opportunité de collaborer et d'élargir mes horizons scientifiques, à Nadia Bekkouche, pour son soutien constant et son savoir-faire, à Stéphane Cointet, Joachim Blanc-Gonnet et Tristan Cambonie, pour leurs contributions à ma thèse.

Je réserve un mot de gratitude au personnel de l'ENTPE (M. le directeur Jean-Baptiste Lesort, Mme la secrétaire générale Martine Michel, Joseph Mermet, Fanny Blancon et tant d'autres) et de l'ENISE, avec une mention spéciale à Mariem Kacem, à Florent Missemer et à Isabelle Pletto.

J'adresse tous mes remerciements à Teddy Fen-Chong pour son aide avec les essais de porosimétrie au mercure, à Jean Sulem car, sans lui, je n'aurais jamais pris connaissance de ce projet de thèse, à Siavash Ghabezloo, qui m'a donné goût à la recherche, et à Jean-Michel Pereira, Yu-Jun Cui, Jean Canou et Anh-Minh Tang, pour leurs recommandations auprès de mes encadrants de thèse.

Je ne veux pas finir cette page sans remercier mes très chers parents, pour leur amour, leur patience, pour leur foi en moi et de m'avoir accompagné tout le long de cette route. Papa, aujourd'hui tu peux être fier de ton fils, qui est enfin docteur. J'adresse également toute ma gratitude au reste de ma famille et à tous mes proches pour leur soutien.

Nomenclature

Caractères latins

Désignation	Description	Unité
A	Surface de l'échantillon exposée	[m^2]
b	Largeur du bord masqué	[m]
b_m	Effusivité hydrique	[kg/(m^2·Pa·s$^{1/2}$)]
c_i	Chaleur spécifique / Capacité thermique d'une phase	$[J/(kg{\cdot}K)]$
C_p	Chaleur spécifique / Capacité thermique du matériau	$[J/(kg{\cdot}K)]$
d	Epaisseur de l'échantillon	$[m]$
d_a	Epaisseur de la couche d'air	$[m]$
d_{HT}	Epaisseur hygrothermique ou active	$[m]$
d_{therm}	Epaisseur thermique ou du mur biosourcé	$[m]$
D_w	Diffusivité de la vapeur	$[m^2/s]$
E	Module global de déformation	[MPa]
e	Effusivité thermique	[W·s$^{1/2}$/(K·m^2)] ou [J/(m^2·K·s$^{1/2}$)]
F	Facteur de forme (rayonnement thermique)	[–]
G	Variation de la masse en fonction du temps	$[kg/s]$
g	Débit de transmission de la vapeur sans prendre en compte le bord masqué	[kg/(m^2· s)]
g_{me}	Débit de transmission de la vapeur y compris la vapeur qui traverse le bord masqué	[kg/(m^2· s)]
H	Enthalpie totale par unité de volume	[J/m^3]
h	Enthalpie massique	[J/kg]
h_c	Coefficients d'échange superficiel de chaleur	$[W/m^2 \cdot K]$
h_m	Coefficients de transfert superficiel de masse	[kg/(m^2 · s · Pa)]
HR	Humidité relative	[-] ou [%]
$J_{interface}$	Densité de flux hydrique à l'interface entre deux couches	$[kg/(m^2{\cdot}s)]$
J_l	Densité de flux massique de l'eau liquide	$[kg/(m^2{\cdot}s)]$
J_v	Densité du flux massique de vapeur d'eau	$[kg/(m^2{\cdot}s)]$
k_l	Conductivité hydraulique	$[kg/(m{\cdot}s{\cdot}Pa)]$

k_l^*	Conductivité hydraulique due à un gradient de pression partielle de vapeur à température constante	$[kg/(m{\cdot}s{\cdot}Pa)]$
k_m	Perméabilité totale en humidité	$[kg/(m{\cdot}s{\cdot}Pa)]$
k_T	Conductivité hydraulique due à un gradient de température	$[kg/(m{\cdot}s{\cdot}K)]$
L	Epaisseur du mur	$[m]$
L_v	Chaleur latente de changement de phase	$[J/kg]$
M	Masse molaire	$[kg/mol]$
m	Masse	$[kg]$
MBV	Moisture Buffering Value / ou VCTH Valeur Caractéristique du Tampon hydrique	$[g/\mathrm{m}^2{\cdot}\%\mathrm{HR}]$
$MBV_{idéal}$	Moisture Buffering Value idéal	$[g/\mathrm{m}^2{\cdot}\%\mathrm{HR}]$
$MBV_{pratique}$	Moisture Buffering Value pratique	$[g/\mathrm{m}^2{\cdot}\%\mathrm{HR}]$
m_h	Masse de l'échantillon juste après le mélange	$[kg]$
P	Pression totale	$[Pa]$
$p_{\text{agrégat}}$	Proportion massique de l'agrégat dans le mélange	[kg/kg]
P_c	Pression capillaire	$[Pa]$
P_v	Pression de vapeur d'eau	$[Pa]$
$P_{v,sat}$	Pression de vapeur d'eau saturante	$[Pa]$
P_0	Pression ambiante	$[Pa]$
Q	Flux de chaleur	$[W]$
q	Densité de flux de chaleur	$[W/m^2]$
R	Constante des gaz parfaits	$[\mathrm{J}/(\mathrm{mol}\cdot K)]$
r	Taux de pluie tombée	[mm/h]
$\dot{r}$	Taux de désorption des molécules d'eau par unité de volume	$[\mathrm{kg}/(\mathrm{m}^3{\cdot}\mathrm{s})]$
Rc	Résistance à la compression	[MPa]
$R_{hydrique}$	Résistance hydrique	$[m^2s/kg]$
R_{pluie}	Précipitation d'eau à la surface de la paroi due à la pluie	$[\mathrm{kg}/(\mathrm{m}^2\mathrm{s})]$
$R_{thermique}$	Résistance thermique	$[m^2\mathrm{K/W}]$
R_{vent}	Pluie transportée par la composante horizontale de la vitesse du vent	$[\mathrm{kg}/(\mathrm{m}^2\mathrm{s})]$
S	Diamètre hydraulique	[m]
S'	Surface de l'échantillon	$[m^2]$
S_{dif}	Echange de chaleur par radiation diffuse	$[\mathrm{W}/m^2]$

S_{dir}	Echange de chaleur par radiation directe	[W/m^2]
S_{ext}	Echange de chaleur par radiation externe	[W/m^2]
Sr	Taux de saturation	[%]
T	Température	[K]
t	Temps	[s]
t_p	Période	[s]
U	Vitesse de référence du vent	[m/s]
u	Teneur en eau massique	[%] ou [kg/kg]
U_{therm}	Coefficient de transfert thermique	[W/(m^2·K)]
V	Volume	[m ^{3}]
v	Vitesse de l'air	[m/s]
$v_{air,int}$	Vitesse de l'air intérieur	[m/s]
V_{pores}	Volume des pores accessibles	[m^3]
$V_{squelette}$	Volume du squelette	[m^3]
V_t	Volume total du matériau	[m^3]
$V_{tassé}$	Volume total du matériau granulaire tassé	[m^3]
V_w	Volume d'eau	[m^3]
V_0	Volume représentatif	[m ^{3}]
w	Teneur en humidité	[kg/m^3]
Z	Résistance de surface	[m^2·s·Pa/kg]

Caractères grecs

Désignation	Description	Unité
α	Coefficient traduisant le transport de la pluie par le vent	[s/m]
β	Coefficient de transfert surfacique de la vapeur d'eau	[kg/(m^2·s·Pa)]
β_h	Angle d'inclinaison de la paroi par rapport au plan horizontal	[°]
γ	Coefficient de variation de la teneur en eau avec la température à pression de vapeur constante	[kg/(m^3·.K)]
δ_a	Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air	[kg/(m·s·Pa)]
δ_p	Perméabilité à la vapeur d'eau du matériau	[kg/(m·s·Pa)]
$\delta_{p,1}$	Perméabilité à la vapeur d'eau après première correction	[kg/(m·s·Pa)]

$\delta_{p,2}$	Perméabilité à la vapeur d'eau après deuxième correction	[kg/(m·s·Pa)]
$\delta_{p,3}$	Perméabilité à la vapeur d'eau après troisième correction	[kg/(m·s·Pa)]
ε	Déformation mécanique	[–]
ε'	Emissivité du matériau	[–]
η	Nombre adimensionnel des effets hygrothermiques	[–]
θ	Teneur en eau volumique	$[m^3/m^3]$
θ_{angle}	Direction du vent par rapport au nord	[°]
κ	Coefficient d'absorption solaire	[–]
λ	Conductivité thermique	[W/(m·K)]
$\lambda_{fil\ chaud}$	Conductivité thermique mesurée avec fil chaud	[W/(m·K)]
$\lambda_{nouveau\ dispositif}$	Conductivité thermique mesurée avec nouveau dispositif	[W/(m·K)]
μ	Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	[–]
ξ	Capacité de stockage d'humidité	[–] ou $[kg/m^3]$
$\xi_{adsorption}$	Capacité de stockage d'humidité en adsorption	[–] ou $[kg/m^3]$
$\xi_{désorption}$	Capacité de stockage d'humidité en désorption	[–] ou $[kg/m^3]$
$\xi^*_{\text{agrégat}}$	Contribution de l'agrégat à la capacité de stockage d'humidité du béton	[–] ou $[kg/m^3]$
$\xi_{idéal}$	Capacité de stockage d'humidité idéale	[–] ou $[kg/m^3]$
$\xi^{\text{idéal}}_{\text{agrégat}}$	Capacité de stockage d'humidité idéale de l'agrégat	[–] ou $[kg/m^3]$
ρ	Masse volumique	$[kg/m^3]$
$\rho^*_{\text{agrégat}}$	Masse de l'agrégat par unité de volume de l'échantillon	$[kg/m^3]$
ρ_{app}	Masse volumique apparente du matériau granulaire ou du solide	$[kg/m^3]$
ρ_{grain}	Masse volumique du grain du matériau granulaire	$[kg/m^3]$
ρ_{sec}	Masse volumique sèche	$[kg/m^3]$
$\rho_{squelette}$	Masse volumique du squelette	$[kg/m^3]$
$\rho_{tassé}$	Masse volumique tassée du matériau granulaire	$[kg/m^3]$
ρ_w	Masse volumique de l'eau	$[kg/m^3]$
σ	Contrainte mécanique	[MPa]
σ'	Constante de Stefan-Boltzmann	$[W/m^2K^4]$

τ	Chaleur spécifique relative à l'eau dans le matériau	[J/(kg·K)]
Φ	Flux convectif	[W] ou [kg/m^2·s]
ϕ	Porosité totale	[–]
ϕ_{inter}	Porosité intergranulaire	[–]
ϕ_{intra}	Porosité intragranulaire	[–]
φ_{angle}	Orientation du bâtiment par rapport au nord	[°]

Indices

Désignation	Description
ads	Adsorption
air	Air
exp	Expérimental
ext	Extérieur
f	Fluide
h	Humide
HT	Hygrothermique
int	Intérieur
l	Liquide
v	Vapeur d'eau
ref	Référence
s	Matrice solide
sat	Saturé
$surf$	Surface
th	Théorique
$therm$	Thermique
w	Eau

Abréviations

Désignation	Description
AAC	« Autoclaved Aerated Concrete » ou Béton Aéré Autoclavé
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ANR	Agence Nationale de la Recherche
AQC	Agence Qualité Construction

BES	« Building Energy Simulation » ou Simulation de l'énergie au bâtiment
BePos	Bâtiment à énergie Positive
BESTEST	« Building Energy Simulation Test » ou Test de simulation de l'énergie au bâtiment
BET	Brunauer-Emmett-Teller
BJH	Barrett-Joyner-Halenda
C2P	Commission Prévention Produit
CFD	« Computational Fluid Dynamics » ou Mécanique des fluides numérique
CLO	Rayonnement de courte longueur d'onde
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COP	« Conference of the Parties »
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DIVA	Démonstrateurs Industriels Valorisant des Agro-résidus en écoconstruction et bio-rénovation
DREAL	Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DSC	« Differential Scanning Calorimetry » ou Calorimétrie différentielle à balayage
DVS	Dynamic Vapor Sorption
ECBS	« Energy Conservation in Buildings and Community Systems » ou Conservation de l'énergie dans les bâtiments et les systèmes communautaires
FFB	Fédération Française du Bâtiment
GAB	Guggenheim-Andersen-de Boer
GES	Gaz à Effet de Serre
GLO	Rayonnement de grande longueur d'onde
HAM	« Heat Air and Moisture » ou Chaleur, air et humidité
HAMSTAD	« Heat, Air and Moisture StanDardization » ou Standardisation de chaleur, air et humidité
HAMTIE	« Heat Air Moisture Transport in highly Insulated new and retrofitted Envelope Parts » ou Transport de chaleur, air et humidité dans des parties de l'enveloppe fortement isolées, nouvelles et rénovées
IBIS	Isolants Bio-Sourcés
IEA	« International Energy Agency » ou Agence Internationale de l'Energie

ISO	« International Organization for Standardization » ou Organisation international de normalisation
IUPAC	« International Union of Pure and Applied Chemistry »
MPC	« Magnesium Phosphate Cement » ou Ciment de Phosphate de Magnésium
NHL	« Natural Hydraulic Lime » ou Chaux Hydraulique Naturelle
ODD	Objectifs de Développement Durable
OPC	« Ordinary Portland Cement » ou Ciment de Portland Ordinaire
PID	Proportionnel, Intégral, Dérivé
RGE	Entreprises Reconnues Garantes de l'Environnement
RT	Réglementation Thermique française
VER	Volume Elémentaire Représentatif
WDR	« Wind Driven Rain » ou Pluie transportée par le vent
WUFI	« Wärme Und Feuchte Instationär » ou Chaleur et humidité transitoires

Valorisation de la thèse

Publications dans des revues scientifiques

2021	*Building and Environment* Abbas, M.S., Gourdon, E., Glé, P., McGregor, F., Ferroukhi, M.Y., Fabbri, A. Relationship between hygrothermal and acoustical behavior of hemp and sunflower composites.
2020	*Construction and Building Materials* Abbas, M.S., McGregor, F., Fabbri, A., Ferroukhi, M.Y. The use of pith in the formulation of lightweight bio-based composites: Impact on mechanical and hygrothermal properties.

Conférences internationales avec actes et évaluation par les pairs

Soumis	*4th International Conference on Bio-Based Building Materials 2021, Barcelona, Spain* Abbas, M.S., Fabbri, A., Ferroukhi, M.Y., Glé, P., Gourdon, E., McGregor, F. Link between acoustic and hygrothermal behaviour of hemp shiv and pith composites.
2019	*3rd International Conference on Bio-Based Building Materials 2019, Belfast, Northern Ireland* Abbas, M.S., McGregor, F., Fabbri, A., Ferroukhi, M.Y. Influence of origin and year of harvest on the performance of pith mortars.

Participation à des symposiums internationaux

2019	*1st Symposium on the infrastructure development - shaping the future using biobased solutions for structures and buildings 2019, Liverpool, United Kingdom* Abbas, M.S., McGregor, F., Fabbri, A., Ferroukhi, M.Y. Poster : « Influence of origin and year of harvest on the performance of pith mortars. »

Participation à des ateliers nationaux

2018	*Simurex 2018: From buildings to city through Simulation and Experimentation, Le Bourget du Lac and Aussois, France* Energy signature characterisation by linear regression Calibration of RC models and Kalman filtering Measurement uncertainty assessment for building energy simulation Methods for uncertainty and sensitivity analysis

Liste de Figures

Figure 0.1 - Consommation énergétique et émissions mondiales par secteur (International Energy Agency & UN Environment Programme, 2019)..... 2
Figure 0.2 - Exemple de construction en pisé dans les environs de Marsac-en-Livradois, Puy-de-Dôme (*Parc Naturel Régional Livradois-Forez*, 2015)..... 4
Figure 0.3 - Cycle de la chaux (T. T. Nguyen, 2010). 8
Figure 0.4 - Chanvre cultivé (Guicheteau et al., 2015). 10
Figure 0.5 - Section transversale d'une tige de lin (Guyon et al., 2010)..... 10
Figure 0.6 - Plante de tournesol (gauche) et tige de tournesol sèche (droite)..... 12
Figure 0.7 - Section d'une tige de tournesol (Gupta, 2012)..... 13
Figure 0.8 - Les parties de la plante du maïs (Boivin, 2014). 14
Figure 0.9 - Composition de la tige de maïs (Medic et al., 2012)..... 14
Figure 0.10 - Echantillons de béton de chènevotte (Jami et al., 2019)..... 17
Figure 0.11 - Moelle de tournesol (Magniont, 2010). 18
Figure 0.12 - Aperçu des formulations utilisées par (Ahmad & Chen, 2020) avec du ciment de phosphate de magnésium (MPC) et du ciment de Portland ordinaire (OPC) comme liants et des tiges de maïs broyées de grande taille (L), de petite taille (S) et en poudre fine (G)..... 19
Figure 0.13 - Béton de fibres de bois (M. Li et al., 2017). 20
Figure 1.1 - Les 3 échelles des milieux poreux inspiré de (Ben Mabrouk, 1999)..... 27
Figure 1.2 - Les 3 phases des milieux poreux – illustration inspirée de (Ben Mabrouk, 1999)..... 27
Figure 1.3 - Granulométrie des particules de chènevotte (T.-T. Nguyen et al., 2009).. 29
Figure 1.4 - Représentation de la porosité fermée et ouverte..... 29
Figure 1.5 - Représentation de la porosité inter et intragranulaire. 30
Figure 1.6 - Courbe contrainte – déformation en compression typique du béton de chanvre (Arnaud & Gourlay, 2012)..... 35
Figure 1.7 - Courbe contrainte – déformation en compression alternative pour le béton de chanvre (Elfordy et al., 2008)..... 35
Figure 1.8 - Résultats de résistance à la compression de (Arnaud & Gourlay, 2012). .. 37
Figure 1.9 - Evolution du module de déformation avec le temps pour différentes concentrations volumiques en liant (Cérézo, 2005)..... 40
Figure 1.10 - Représentation comparative des phénomènes d'adsorption et d'absorption. 46
Figure 1.11 - Isothermes de sorption jusqu'à 97 %HR (a) et jusqu'à 85 %HR (b) (McGregor et al., 2017)..... 47
Figure 1.12 - Représentation schématique de l'adsorption d'un pore en parallèle de la courbe de sorption. Inspiré de (Collet, 2004; Ferroukhi, 2015; Rebaia Remache, 2011).48
Figure 1.13 - Classification des isothermes de sorption (A) et des cycles d'hystérésis (B) selon la IUPAC (K. S. W. Sing et al., 1985). 49
Figure 1.14 - Représentation de l'essai de la coupelle et de l'effet du "bord masqué" sur le flux d'humidité..... 53

Figure 1.15 - Plages de classification des matériaux selon leur valeur MBV pratique (Rode et al., 2007). 56
Figure 1.16 - Phénomène de minéralisation de la chènevotte observé par (Magniont et al., 2012). 61
Figure 2.1 - Echantillons (de gauche à droite) de moelle D2016, M, O, D2017 et G. ... 67
Figure 2.2 - Courbe granulométrique des agrégats étudiés. 68
Figure 2.3 - Histogramme de fréquence du retenu de la granulométrie des agrégats étudiés. 68
Figure 2.4 - Aperçu des échantillons de béton de moelle fabriqués. 69
Figure 2.5 - Test de compression simple 71
Figure 2.6 - Aperçu du système DVS. 72
Figure 2.7 - Essai coupelle humide. 72
Figure 2.8 - Essai MBV. 73
Figure 2.9 - Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche des 5 bétons. 75
Figure 2.10 - Courbes d'adsorption (lignes pleines) et de désorption (lignes pointillées) pour les 5 bétons. 75
Figure 2.11 - Dérivée des courbes d'adsorption (lignes pleines) et de désorption (lignes pointillées) pour les bétons. 76
Figure 2.12 - Variation de masse des coupelles humides pour les échantillons de maïs. 77
Figure 2.13 - Evolution de la masse des échantillons pendant le cycle MBV. 78
Figure 2.14 - Valeur moyenne de MBV pour différents bétons à base de moelle. 78
Figure 2.15 - Granulats utilisé dans cette campagne expérimentale (A) chènevotte, (B) moelle de tournesol avec des traces d'écorce et (C) moelle de maïs avec des traces d'écorce. 82
Figure 2.16 - Un spécimen de HB-S de dimensions 16x32 cm (A) et un spécimen de C1-H de dimensions 16x32 cm (B) 84
Figure 2.17 - Isothermes de sorption d'azote obtenues par la méthode BJH – agrégats S, M, H. 86
Figure 2.18 - Volume cumulé (bleu) et dérivée du volume (orange) en fonction du rayon de pore, obtenu par la méthode BJH – agrégats S, M, H. 86
Figure 2.19 - Isothermes de sorption d'azote obtenues par la méthode BJH – liants HB, C1, C2. 87
Figure 2.20 - Volume cumulé (bleu) et dérivée du volume (orange) en fonction du rayon de pore, obtenu par la méthode BJH – liants HB, C1, C2. 87
Figure 2.21 - Isothermes de sorption d'azote obtenues par la méthode BJH – bétons HB-S, HB-M, C1-H, C2-H*, C2-S, C2-H+S. 88
Figure 2.22 - Volume cumulé (bleu) et dérivée du volume (orange) en fonction du rayon de pore, obtenu par la méthode BJH – bétons HB-S, HB-M, C1-H, C2-H*, C2-S, C2-H+S. 88
Figure 2.23 - Isothermes de sorption d'azote obtenues par la méthode BJH – bétons H98-G, H98-UK, H98-F, CLIN-UK, CLIN-G, C1-F. 89
Figure 2.24 - Volume cumulé (bleu) et dérivée du volume (orange) en fonction du rayon de pore, obtenu par la méthode BJH – bétons H98-G, H98-UK, H98-F, CLIN-UK, CLIN-G, C1-F. 90

Figure 2.25 - Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et la masse volumique sèche des formulations testées dans cette étude et dans plusieurs études dans la littérature..... 93
Figure 2.26 - Aperçu de la méthode du fil chaud pour mesurer la conductivité thermique des agrégats 94
Figure 2.27 - Nouvel appareil de mesure de la conductivité thermique. 95
Figure 2.28 - Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche des formulations..... 97
Figure 2.29 - Aperçu de la méthode dessiccateur. 99
Figure 2.30 - Isothermes d'adsorption/désorption des trois agrégats végétaux avec la teneur en eau exprimée en (A) : kg/m^3, et (B) : kg/kg. 100
Figure 2.31 - Isothermes d'adsorption/désorption pour les huit bétons. Formulations à base de chènevotte (A) et formulations à base de moelle et de moelle et chènevotte (B). 101
Figure 2.32 - Isothermes de sorption pour HB-S (A) et HB-M (B) : comparaison des méthodes DVS et dessiccateur.....101
Figure 2.33 - Photographies de la surface d'une formulation à base de chènevotte (A) et à base de moelle (B).....106
Figure 2.34 - Suivi de la masse de HB-S et HB-M lors du test MBV.....106
Figure 2.35 - ξ calculé à partir de la courbe de désorption en fonction du $\xi idéal$ estimé à partir de $MBVpratique$. 108
Figure 3.1 - Description des différentes échelles de porosité.....118
Figure 3.2 - Représentation approximative de la tortuosité. Inspiré de *(O'Connell et al., 2010)*.....119
Figure 3.3 - Représentation du dispositif pour mesurer expérimentalement la tortuosité. Inspiré de *(Glé, 2013)*. 120
Figure 3.4 - Représentation des longueurs caractéristiques visqueuse et thermique du réseau poreux.....121
Figure 3.5 - Comportement des ondes acoustiques planes face à un obstacle. Inspiré de *(Glé, 2013)*.....122
Figure 3.6 - Aperçu des bétons biosourcés. 127
Figure 3.7 - Tube de Kundt avec configuration trois microphones et sans cavité. Inspiré de *(Glé, 2013)*. 127
Figure 3.8 - Représentation de la méthode acoustique. 131
Figure 3.9 - Coefficient d'absorption acoustique (gauche) et pertes par transmission (droite) des agrégats S et H. 133
Figure 3.10 - Coefficient d'absorption acoustique et pertes par transmission des bétons C2-H*, C2-S et C2-H+S. 134
Figure 3.11 - Coefficient d'absorption acoustique et pertes par transmission des bétons CLIN-G, H98-G, CLIN-UK, H98-UK, H98-F et C1-F. 134
Figure 3.12 - Résultats du tube de Kundt qui montrent des effets élastiques. 136
Figure 3.13 - Résultants du tube de Kundt qui montrent l'effet d'une fuite périmétrale sur les pertes par transmission. 136
Figure 3.14 - Dispositif de mesure de perméabilité à la vapeur pour les agrégats.....138

Figure 3.15 - Comparaison de la conductivité thermique et la porosité totale des bétons. 141
Figure 3.16 - Comparaison de la conductivité thermique et la porosité intergranulaire des bétons. 141
Figure 3.17 - Relation empirique entre la perméabilité à l'air et à la vapeur. 144
Figure 3.18 - Comparaison de la capacité de stockage d'humidité idéale et la porosité totale des matériaux étudiés. 145
Figure 3.19 - Comparaison de la capacité de stockage d'humidité idéale et la porosité intergranulaire des matériaux étudiés. 146
Figure 3.20 - Comparaison de la capacité de stockage d'humidité idéale et la porosité intragranulaire des matériaux étudiés. 146
Figure 3.21 - Image de la microstructure du béton HB-S capturée à l'aide d'un MEB. 147
Figure 3.22 - Image de la microstructure de la moelle de tournesol capturée à l'aide d'un MEB. 147
Figure 4.1 - Aperçu des coupelles sèches avec silica gel (gauche) et coupelles humides avec solution saline (droite) 157
Figure 4.2 - Evolution de la conductivité thermique avec le taux de saturation pour C1-H et HB-S. 158
Figure 4.3 - Relation entre la teneur en eau et l'humidité relative (gauche) et relation entre la saturation et l'humidité relative (droite) trouvées pour C1-H et HB-S lors des essais de conductivité et d'effusivité thermique. 158
Figure 4.4 - Evolution de l'effusivité thermique avec le taux de saturation pour C1-H et HB-S. 159
Figure 4.5 - Evolution de la chaleur spécifique avec le taux de saturation pour C1-H et HB-S. 160
Figure 4.6 - Evolution de la perméabilité à la vapeur avec la saturation. 161
Figure 4.7 - Evolution de la conductivité thermique avec le taux de saturation pour plusieurs matériaux provenant de la littérature et de la présente étude. 163
Figure 4.8 - Evolution de la conductivité thermique rapportée à la conductivité thermique sèche avec le taux de saturation pour plusieurs matériaux provenant de la littérature et de la présente étude. 163
Figure 4.9 - Evolution de l'effusivité thermique avec le taux de saturation pour plusieurs matériaux provenant de la littérature et de la présente étude. 165
Figure 4.10 - Evolution de l'augmentation de l'effusivité thermique en relation à l'effusivité à l'état sec avec le taux de saturation pour plusieurs matériaux provenant de la littérature et de la présente étude. 166
Figure 4.11 - Evolution de la chaleur spécifique avec la teneur en eau massique pour plusieurs matériaux provenant de la littérature et de la présente étude. 167
Figure 4.12 - Evolution de la perméabilité à la vapeur apparente avec la teneur en eau massique des bétons de cette étude et de matériaux de la littérature. 169
Figure 4.13 - Comparaison de la teneur en eau expérimentale avec la teneur en eau correspondante à la courbe d'adsorption, de désorption et à la moyenne entre les deux. 171
Figure 4.14 - Représentation de la coupelle humide. 172

Figure 4.15 - Comparaison de la teneur en eau expérimentale avec la teneur en eau (calculée à partir de la moyenne entre les humidités relatives de surface) correspondante à la courbe d'adsorption, de désorption et à la moyenne entre les deux.....173
Figure 4.16 - Représentation du dispositif de mesure de la variation verticale de l'humidité relative.....174
Figure 4.17 - Variation de l'humidité relative selon l'épaisseur des coupelles humides (A) et des coupelles sèches (B). 174
Figure 5.1 - Interactions hygrothermiques inspiré de (Janssens et al., 2008; Tariku et al., 2010).....181
Figure 5.2 - Caractérisation des paramètres entrant en jeu et des transferts au sein d'une paroi, figure inspirée de (Ferroukhi, 2015; Lelièvre, 2015; Qin et al., 2006). 184
Figure 5.3 - Composantes de l'équilibre thermique sur une paroi. 184
Figure 5.4 - Contact à l'interface entre deux couches. Illustration inspirée de (De Freitas et al., 1996; Ferroukhi, 2015). 191
Figure 5.5 - Comparaison du benchmark et du modèle proposé à ξ non constant.....200
Figure 5.6 - Aperçu de la cellule bi-climatique DUO. 202
Figure 5.7 - Diagramme d'instrumentation de la cellule bi-climatique DUO.....203
Figure 5.8 - Comparaison de la température (A) et de l'humidité relative (B) au milieu du matériau simulée et mesurée expérimentalement – Chanvre compacté. 204
Figure 5.9 - Comparaison de la température sur la surface gauche du mur simulée et mesurée expérimentalement - Chanvre compacté. 204
Figure 5.10 - Comparaison du flux à travers la surface gauche (A) et à travers la surface droite (B) simulé et mesuré expérimentalement – Chanvre compacté.....204
Figure 5.11 - Comparaison de la température (A) et de l'humidité relative (B) au milieu du matériau simulée et mesurée expérimentalement – C1-H.....205
Figure 5.12 - Comparaison de la température sur la surface gauche (A) et sur la surface droite (B) du mur simulée et mesurée expérimentalement – C1-H.....205
Figure 5.13 - Comparaison du flux à travers la surface gauche (A) et à travers la surface droite (B) simulé et mesuré expérimentalement – C1-H. 205
Figure 5.14 - Plan du studio dans lequel a été réalisée l'acquisition de données pour les conditions intérieures de la simulation.....207
Figure 5.15 - Définition des villes représentative des climats en France.....208
Figure 5.16 - Etude de la température selon la zone climatique.....209
Figure 5.17 - Etude de l'humidité relative selon la zone climatique. 209
Figure 5.18 - Etude du ratio de pluie tombée selon la zone climatique. 209
Figure 5.19 - Etude de la vitesse du vent selon la zone climatique. 209
Figure 5.20 - Comparaison de la réponse en termes de T° et de P_v d'une paroi en fonction des différents climats.....210
Figure 5.21 - Schéma de la paroi modélisée. 213
Figure 5.22 - Moyenne mensuelle de la densité de flux thermique - Bourg Saint Maurice. 214
Figure 5.23 - Densité de flux thermique semaine du 24/06 au 30/06 (A) et du 25/12 au 31/12 (B) – Bourg Saint Maurice.....215
Figure 5.24 - Evolution de l'humidité relative au sein du matériau biosourcé – Bourg Saint Maurice.....216

Figure 5.25 - Humidité relative au milieu du matériau biosourcé semaine du 24/06 au 30/06 (A) et du 25/12 au 31/12 (B) – Bourg Saint Maurice. 217
Figure 5.26 - Moyenne mensuelle de la densité de flux hygrique à travers la surface intérieure des trois murs bicouche – Bourg Saint Maurice. 217
Figure 5.27 - Différence absolue de densité de flux thermique entre la simulation thermique (C1) et hygrothermique salle de bains (C2) pour la semaine du 25/12 au 31/12 - Bourg Saint Maurice. 218
Figure 5.28 - Rapport entre la différence absolue de densité de flux thermique entre la simulation thermique (C1) et hygrothermique salle de bains (C2) et la densité de flux thermique (C1) pour la semaine du 25/12 au 31/12 - Bourg Saint Maurice. 219
Figure 5.29 - Valeur moyenne de η par saison - Bourg Saint Maurice. 220
Figure 5.30 - Densité de flux thermique (moyenne mensuelle) – béton + C2-H*. 221
Figure 5.31 - Densité de flux thermique (moyenne mensuelle) - béton + C2-S. 221
Figure 5.32 - Densité de flux thermique (moyenne mensuelle) – béton + HB-S. 222
Figure 5.33 - Moyenne mensuelle de la densité de flux hygrique à travers la surface intérieure du mur bicouche béton + HB-S – Bourg Saint Maurice et Nice. 222
Figure 5.34 - Densité de flux thermique du 25/12 au 31/12 pour le mur béton + HB-S à Bourg Saint Maurice pour les trois conditions hygrothermiques. 223
Figure 5.35 - Différence de densité de flux thermique pour le mur béton + HB-S à Bourg Saint Maurice entre la simulation thermique et MBV et entre la simulation thermique et salle de bains. 223
Figure 5.36 - Moyenne mensuelle de l'écart absolu entre la densité de flux thermique MBV et salle de bains pour HB-S - Bourg Saint Maurice. 224
Figure 5.37 - Comparaison de la densité de flux hygrique MBV et salle de bains pour HB-S - Bourg Saint Maurice. 225
Figure 5.38 - Evolution annuelle de l'humidité relative à l'interface entre le béton classique et le béton biosourcé – Bourg Saint Maurice. 226
Figure 5.39 - Evolution annuelle de l'humidité relative à l'interface entre le béton classique et le béton biosourcé – Nice. 226
Figure 6.1 - Instrumentation pour le test du fluxmètre plein. 231
Figure 6.2 - Instrumentation pour le test du fluxmètre perforé en cuivre. 232
Figure 6.3 - Température (A) et pression de vapeur (B) dans l'échantillon sans fluxmètre. 235
Figure 6.4 - Température (A) et pression de vapeur (B) dans l'échantillon avec fluxmètre Hukseflux de type disque. 235
Figure 6.5 - Température (A) et pression de vapeur (B) dans l'échantillon avec fluxmètre Captec de type plaque en cuivre perforée. 235
Figure 6.6 - Densité de flux thermique [W/m²] à travers la surface de l'échantillon sans fluxmètre (A), de l'échantillon avec le fluxmètre Hukseflux de type disque (B) et de l'échantillon avec fluxmètre Captec de type plaque en cuivre perforée (C) à la fin du dernier cycle HR. 236
Figure 6.7 - Evolution temporelle du ratio entre la moyenne de la densité de flux thermique sur la surface couverte par le fluxmètre et la moyenne de la densité de flux thermique sur toute la surface supérieure de l'échantillon sans fluxmètre. 237

Figure 6.8 - Evolution temporelle de moyenne de la densité de flux thermique sur la surface couverte par le fluxmètre.....237

Figure D. 1 - Dispositif de mesure NOVAtouch pour la détermination de la surface spécifique et de la distribution de la taille des pores.....283
Figure E. 1 - Différentes structures de réseau poreux 285
Figure J. 1 - Températures de 2004.....318
Figure J. 2 - Humidité relative de 2004.....319
Figure J. 3 - Vitesse du vent en 2004.....320
Figure K. 1 - Différence entre les climats de Nice et de Bourg Saint Maurice.....321
Figure L. 1 - Analyse des courbes de Pression de vapeur saturante.....324

Liste de Tableaux

Tableau 1.1 - Composition chimique des agrégats. Extrait de *(Nozahic et al., 2012)* .. 57
Tableau 2.1 - Récapitulatif des appellations des agrégats. 67
Tableau 2.2 - Récapitulatif des caractéristiques physiques des bétons 69
Tableau 2.3 - Récapitulatif de la résistance à la compression moyenne..... 74
Tableau 2.4 - Récapitulatif des valeurs moyennes du module global de déformation ... 74
Tableau 2.5 - Conductivité thermique des matériaux étudiés 74
Tableau 2.6 - Capacité de stockage d'humidité moyenne entre 20 %HR et 60 %HR ... 76
Tableau 2.7 - Valeurs pour le coefficient de résistivité au passage de la vapeur μ..... 77
Tableau 2.8 - MBV mesuré et calculé pour les 5 formulations étudiées 79
Tableau 2.9 - Appellation des liants. 82
Tableau 2.10 - Récapitulatif de la formulation et du ratio massique..... 83
Tableau 2.11 - Récapitulatif des caractéristiques physiques des bétons étudiés..... 83
Tableau 2.12 - Résultats de surface spécifique. 84
Tableau 2.13 - Valeurs moyennes de la résistance à la compression et du module global de déformation 91
Tableau 2.14 - Récapitulatif de la conductivité thermique des formulations testées..... 96
Tableau 2.15 - Récapitulatif des propriétés hygroscopiques 104
Tableau 3.1 - Masse volumique et taille moyenne des granulats. 125
Tableau 3.2 - Récapitulatif de la formulation des bétons. 126
Tableau 3.3 - Récapitulatif des paramètres principaux des bétons et des agrégats étudiés. 126
Tableau 3.4 - Dimensions des éléments du tube de Kundt. 128
Tableau 3.5 - Caractéristiques du réseau poreux. 132
Tableau 3.6 : Récapitulatif de la conductivité thermique. 138
Tableau 3.7 - Récapitulatif des paramètres hygroscopiques 139
Tableau 4.1 - Récapitulatif de la composition et masse volumique des bétons. 153
Tableau 4.2 - Récapitulatif des couples d'humidité testés pour chaque formulation....156
Tableau 5.1 - Récapitulatif des modèles mathématiques. 180
Tableau 5.2 - Les trois types de logiciels pour la modélisation hygrothermique. 195
Tableau 5.3 - Tableau récapitulatif des benchmarks hygrothermique. 197
Tableau 5.4 - Détails HAMSTAD 2 - Cas analytique. 199
Tableau 5.5 - Caractéristiques matériaux benchmark HAMSTAD 2. 199
Tableau 5.6 - Ecart en pourcentage entre le modèle proposé et celui du benchmark...200
Tableau 5.7 - Récapitulatif des paramètres des matériaux utilisés pour la validation expérimentale du modèle. 203
Tableau 5.8 - Critères des études de cas - version 1. 206
Tableau 5.9 - Caractéristiques des bétons étudiés. 207
Tableau 5.10 - Etude de l'écart type des facteurs extérieurs influant selon la zone climatique. 210
Tableau 5.11 - Résumé de la définition des études de cas – version 2. 211
Tableau 5.12 - Détails des cas étudiés - Tableau récapitulatif. 212
Tableau 5.13 – Coefficient de transfert thermique moyen de chaque matériau. 215

Tableau 5.14 : Moyenne annuelle de η - Bourg Saint Maurice. 220
Tableau 6.1 - Paramètres des matériaux dans la simulation. 230

Tableau A. 1 - Récapitulatif des performances des matériaux. 276
Tableau B. 1 - Caractérisation des méthodes de conductivité thermique (Aghahadi, 2019). 277
Tableau C. 1 - Classification des courbes de sorption (K. S. W. Sing et al., 1985). 279
Tableau C. 2 - Classification des courbes hystérésis (K. S. W. Sing et al., 1985). 279
Tableau G. 1 - Tableau récapitulatif des phénomènes hygrothermiques. 300
Tableau I. 1 - Détails HAMSTAD 2001 (Adan et al., 2004). 311
Tableau I. 2 - Détails EN15026. 312
Tableau I. 3 - Détails Annex 41. 313
Tableau I. 4 - Détails ANR Hygrobat. 316
Tableau I. 5 - Détails Gdr MBS. 316
Tableau L. 1 - Définition de P_v en fonction de l'humidité relative et la température. .322
Tableau M. 1 - Courbes de température relatives à la modélisation. 325
Tableau M. 2 - Courbes d'humidité relative liées à la modélisation. 327
Tableau M. 3 - Courbes de densité de flux thermique liées à la modélisation. 329
Tableau M. 4 - Courbes de densité de flux massique liées à la modélisation. 331

Chapitre 0 : Introduction générale et problématique générale de la thèse

Table des matières

0.1 Utilisation des matériaux biosourcés dans le bâtiment 2
0.1.1 Impact environnemental du bâtiment 2
0.1.2 Le patrimoine bâti vernaculaire 3
0.1.3 Bétons biosourcés pour la construction 5
0.2 Problématique de la thèse 21
0.2.1 Contexte 21
0.2.2 Objectifs 22
0.3 Organisation du document 22

0.1. Utilisation des matériaux biosourcés dans le bâtiment

0.1.1. Impact environnemental du bâtiment

Les premiers soupçons de l'existence d'un changement climatique d'origine anthropique sont apparus à la fin du XIXe siècle avec Svante Arrhenius, qui a été le premier scientifique à énoncer une possible relation entre l'augmentation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère issue des activités humaines et l'altération du climat. Les premières évidences tangibles de ce phénomène ne sont arrivées que dans les années 50, quand la technologie a atteint la puissance de calcul nécessaire pour composer des modèles suffisamment complexes pour inclure des facteurs comme le changement de concentration de vapeur dû au cycle naturel de l'eau (Weart, 2008).

Depuis, le réchauffement climatique est devenu un véritable sujet d'actualité et l'un des principaux défis de la science moderne. Les gouvernements de nombreuses nations tout autour de la planète se sont engagés sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) à la suite d'événements historiques comme la COP3, qui a donné naissance au Protocole de Kyoto en 1997, ou la COP21 de Paris en 2015.

L'un des grands axes d'amélioration est le domaine de la construction, puisque les bâtiments représentent presque 36 % de la consommation d'énergie finale au monde et 39 % des émissions de GES, mesurés en CO2équivalent (International Energy Agency & UN Environment Programme, 2019), comme on peut l'apprécier dans la **Figure 0.1**. Dans le cas particulier de la France, les pourcentages sont 44 et 24, respectivement, selon l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME, 2018).

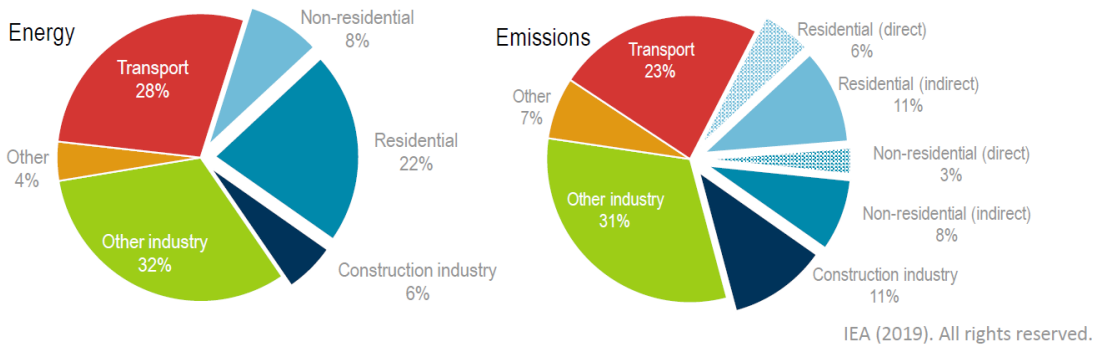


Figure 0.1 - Consommation énergétique et émissions mondiales par secteur (International Energy Agency & UN Environment Programme, 2019).

Les émissions de $CO_{2\text{équivalent}}$ ont lieu pendant les trois phases de la vie du bâtiment : construction, exploitation et démolition, mais la grande majorité se produit pendant la phase d'exploitation (environ 80 %), suivie par la phase de construction et finalement, la démolition (Peng, 2016). Pour réduire ces émissions, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments s'avère incontournable car elle est en lien direct avec l'énergie consommée en phase d'exploitation. Aussi, la fabrication et transport des matériaux de

construction dits « classiques » a un impact environnemental très important qui peut être caractérisé par l'énergie « grise » de chaque matériau. Le béton classique représente le matériau le plus utilisé dans le secteur du bâtiment. Ce matériau a deux inconvénients principaux. D'un côté, il a un grand impact environnemental car il utilise le ciment comme liant, une matière dont la fabrication est très énergivore et donc hautement polluante. Aussi, ces matières doivent être transportées sur des longues distances, fait qui contribue aussi à l'émission de GES. Le deuxième problème est l'épuisement dans les carrières des matériaux qui le conforment, tels que le sable et les graviers.

L'urgence des gouvernements à ce sujet s'exprime sous la forme de lois et de plans d'action, comme les ODD ou Objectifs de Développement Durable établis par l'ONU (Nations Unies, 2019). Plus concrètement, l'ODD numéro onze stipule entre autres que les villes et les bâtiments doivent réduire leur impact environnemental. Dans le cas français, face à ces enjeux environnementaux et sociétaux dérivés du bâtiment, un ensemble d'objectifs ont été véhiculés depuis les années 1974 et l'apparition de la première réglementation thermique (Pouget Consultants, 2020), par les projets suivants :

- La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (1996) ;
- Les lois Grenelle I et II (2009-2010) ;
- RT 2012 ;
- Label réglementaire pour la construction neuve « Bâtiment Biosourcé » (2012) ;
- DREAL engagées dans le développement et le soutien de la filière verte (2013) ;
- La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (2015) (Karibati & Ville et Aménagement Durable, 2017);
- COP 21 (2015) – dispositifs de qualifications RGE ;
- Le plan de rénovation énergétique des bâtiments (2018) (PACTE, 2020);
- RT 2020 : détermination de la limite maximale de consommation énergétique pour les constructions neuves et Bâtiment à énergie positive (BePos).

Avec 4 millions d'emplois en France dans la construction et l'immobilier, le secteur du bâtiment peut être considéré comme un pilier de l'économie. Ses enjeux sont donc multiples : environnementaux, mais aussi sociétaux. Parmi les enjeux environnementaux, il y a : la maîtrise énergétique, la gestion des ressources naturelles, ou encore la lutte contre les différentes pollutions. En ce qui concerne les enjeux sociétaux ils sont centrés sur l'augmentation de la population spécialement aux alentours des noyaux urbains, et donc de la demande en termes de construction. L'aménagement du territoire doit alors pouvoir répondre à ces problématiques en restreignant l'étalement urbain, en prenant en compte la diminution des ressources et limitant la pollution (Deshayes, 2012; Karibati & Ville et Aménagement Durable, 2017).

0.1.2. Le patrimoine bâti vernaculaire

Les pays développés possèdent aujourd'hui un large parc immobilier existant et doivent s'attacher à le rendre plus performant, pour limiter les déchets de la

déconstruction. Le taux de renouvellement de ce parc est d'environ 1 % et ne représente donc qu'une petite part (PACTE, 2017). C'est pourquoi les travaux de rénovation/réhabilitation sont primordiaux pour atteindre les objectifs d'optimisation de l'énergie.

Plus particulièrement, le patrimoine bâti dit « vernaculaire » est celui qui fait partie de la culture locale, qui est construit avec des matériaux issus des ressources naturelles peu transformées propres de la région où le patrimoine se trouve et qui n'est, par conséquent, pas construit avec des matériaux industriels. Le patrimoine vernaculaire représente un potentiel atout pour la construction éco-responsable car il est durable par définition, dans le sens écologique puisqu'il utilise les ressources disponibles, et dans le sens de la longévité car il est arrivé jusqu'à nos jours.

L'intérêt surgit autour du patrimoine vernaculaire dans les années 1960 du fait de sa valeur historique, culturelle et sociétale, face au risque de sa disparition. En 1964, la Charte de Venise (IIe Congrès international des architectes et des techniciens des monuments historiques, 1964) fut signée dans l'esprit de mieux préserver le patrimoine architectural rural comme le patrimoine monumental à l'échelle internationale, mais un effort supplémentaire pour la protection du petit patrimoine est encore nécessaire.

Les types les plus célèbres de construction vernaculaire sont la construction en terre crue (torchis, pisé, adobe, bauge, hourdage, bousillage), la construction en balles de paille (toit de chaume), la construction en bois et la construction en pierre.

Figure 0.2 - Exemple de construction en pisé dans les environs de Marsac-en-Livradois, Puy-de-Dôme (*Parc Naturel Régional Livradois-Forez*, 2015).

Plusieurs projets se sont intéressés à la rénovation énergétique de bâtiments anciens construits en matériaux naturels dans les dernières années, comme par exemple (Rosanne Walker & Pavía, 2015), qui testent plusieurs solutions d'isolation sur un mur historique en brique parmi lesquelles un composite de chanvre et chaux et un autre de liège et chaux. (Claude, 2018) se concentre sur le développement d'un mortier chaux-chanvre pour la

rénovation et l'isolation d'immeubles anciens en milieu urbain, lorsque (Brouard, 2018) étudie des composites à base d'argile, de tige de tournesol et de paille de colza pour la rénovation du bâti ancien. Avec le même but, (Vinceslas, 2019) étudie des matériaux à base de terre et de chanvre.

0.1.3. Bétons biosourcés pour la construction

Pour faire face à cet enjeu, on s'intéresse à la construction à base de matériaux biosourcés, qui sont définis comme des produits non alimentaires, partiellement ou totalement issus de la biodiversité. Ces matériaux d'origine végétale ou animale visent à remplacer les matériaux de construction classiques et peuvent être utilisés pour la rénovation des bâtiments dans le but de respecter les nouvelles exigences en matière énergétique, tout en réduisant le $CO_{2\text{équivalent}}$ généré dans la phase de construction et à prix réduit.

Les matériaux biosourcés sont très nombreux : le bois, le liège, la paille, le chanvre, la ouate de cellulose, le textile recyclé, la laine de mouton, le lin, la balle de céréales, le miscanthus, le coton, le colza, la moelle de maïs et de tournesol, etc.

Ils peuvent prendre la forme de mousse ou de laine, mais ils peuvent également être des granulats intégrés dans ce que l'on appelle des « bétons biosourcés » ou « agro-bétons ». Ces bétons, définis comme « un mélange de granulats à base d'une plante lignocellulosique provenant directe ou indirectement de l'agriculture ou de l'exploitation forestière, qui forment le gros du volume, et un liant minéral » (Amziane & Arnaud, 2013), n'ont pas la même tenue mécanique que le béton classique, mais ils peuvent remplacer certaines parties de la structure, plus concrètement, ils peuvent être utilisés dans les murs, dans le toit et dans le sol ou ils peuvent être utilisés en tant que revêtement extérieur ou intérieur des parois des constructions.

Comme mentionné auparavant, outre leur intérêt écologique, ces matériaux sont souvent associés à un haut degré de confort du fait de leur habilité à réguler l'humidité, ils sont généralement de bons isolants thermiques (ce qui entraîne une réduction de la consommation énergétique) et phoniques et ils offrent la possibilité de revaloriser des déchets agricoles (Lagouin et al., 2019; Sabapathy & Gedupudi, 2019).

Les principaux liants et agrégats végétaux utilisés pour formuler les bétons biosourcés sont présentés ci-après.

0.1.3.1. Liants

Ciment de Portland

Le ciment de Portland est le liant classiquement utilisé dans la formulation des bétons. La pâte, formée de ciment et d'eau, crée des liaisons avec le sable et le gravier lors du processus de prise. Cette prise a lieu à travers un processus d'hydratation et, une fois le processus fini, le mélange garde ses propriétés mécaniques même en présence d'eau. Ce

ciment minéral est un mélange d'un oxyde basique (CaO) et d'oxydes acides (notamment SiO_2 et Fe_2O_3) qui peut être produit avec 80 % de calcaire, qui génère de l'oxyde de calcium, et 20 % d'argile, qui génère de la silice et des oxydes de fer.

Dans la méthode de production dite « sèche », les ingrédients primaires (le calcaire et l'argile, principalement) sont extraits, puis écrasés une première fois jusqu'à une taille maximale de 15 cm et une deuxième fois jusqu'à une taille maximale de 7 cm. Ces matériaux sont introduits dans un four de cimenterie, où ils sont chauffés à une température d'environ 1450 °C. Le four est alimenté avec du charbon, du pétrole ou du gaz, typiquement. Le résultat est le clinker, qui se présente sous la forme de petites billes grises. Une fois que le clinker a refroidi, il est très finement broyé et mélangé avec des petites quantités de gypse et d'autres produits d'addition.

Une analyse de cycle de vie du ciment de Portland menée par (Huntzinger & Eatmon, 2009) détermina que la production du clinker représente entre 80 et 85 % de l'impact environnemental du ciment et que le GES généré en plus grande quantité est le CO_2. Une autre étude estime les émissions associées à la production d'une tonne de ciment de Portland en environ 1,09 t CO_2 équivalent (Flower & Sanjayan, 2007).

Dans le cas du ciment de Portland, la prise (processus à travers lequel le liant passe d'être une pâte malléable à être une structure rigide) se produit par hydratation des silicates et des aluminates. Ce processus donne lieu à des composés insolubles. Dans un premier temps, dès que le ciment rentre en contact avec l'eau, le C_3A et le C_3S réagissent avec l'eau pour donner de l'ettringite et des C-S-H. Ensuite, les ions silicates, calcium, sulfates et hydroxydes forment une solution avec l'eau et, une fois celle-ci est saturée, la prise proprement dite commence. Quand la concentration en Ca^{2+} et en OH^- devient critique, il se produit une précipitation de la portlandite et les hydrates commencent à se former, dégageant une grande quantité de chaleur. Ces hydrates forment un réseau et, par conséquent, une matrice solide. Dans une dernière étape, certains grains auxquels l'eau n'est pas arrivée se voient isolés par les hydrates les entourant. Il est donc nécessaire que l'eau circule à travers les pores, autrement, une partie du ciment restera sans s'hydrater.

On peut distinguer différents types de ciment de Portland en fonction de la finesse et le contenu d'autres matériaux comme par exemple les additifs de calcaire, des cendres volantes ou de laitier du haut-fourneau.

Le ciment de Portland est classifié en cinq types selon son contenu :

- CEM l: ciment de Portland avec 95 % de clinker au minimum.

- CEM ll: ciment de Portland qui peut contenir entre 6 % et 35 % d'autres ingrédients autres que le clinker (laitier de haut-fourneau, fumée de silice, cendres volantes et calcaire).

- CEM lll: ciment avec 36 % - 95 % de laitier de haut-fourneau.

- CEM lV: ciment pouzzolanique qui peut contenir entre 11 % et 55 % de composants pouzzolaniques.

- CEM V: laitier de haut-fourneau (18 % - 50 %), composants pouzzolaniques (18 % - 50 % principalement de cendres volantes)

Le ciment de Portland offre de très bonnes propriétés mécaniques, principalement une bonne résistance à la compression. La résistance varie fortement avec le temps, avec 40 % de la résistance finale obtenue au bout de 2 jours, 70 % au bout de 7 jours.

Chaux

La chaux est le produit de la calcination et décarbonatation du calcaire à une température d'environ 900 °C **(0.1)**. Il s'agit d'un mélange d'oxyde de calcium (CaO) ou chaux vive et d'oxyde de magnésium (MgO), la chaux vive représentant la majorité de la composition. Le type de chaux est déterminé par le pourcentage de CaO et de MgO, par la granulométrie et par sa réactivité.

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \qquad (0.1)$$

Le mélange de chaux vive et d'eau donne lieu à la chaux éteinte ou hydroxyde de calcium, $Ca(OH)_2$ **(0.2)**. Quand la chaux vive est mélangée avec la quantité d'eau stœchiométrique, le produit est une poudre, lorsqu'en excès d'eau, le résultat est une pâte. La chaux éteinte est appelée également chaux aérienne car sa prise se réalise en présence du CO_2 de l'air, c'est-à-dire, qu'elle durcit au contact de l'air à travers un mécanisme appelé *carbonatation* **(0.3)**, la prise étant assez lente.

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \qquad (0.2)$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (0.3)$$

La carbonatation donne lieu à du calcaire et à de l'eau, ce qui donne lieu au cycle de la chaux présenté dans la Figure 0.3.

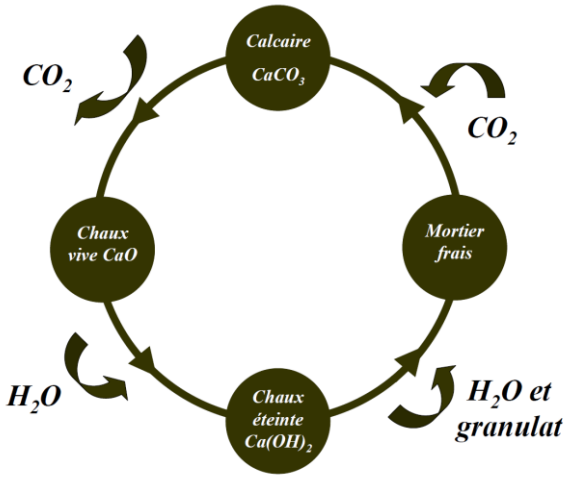


Figure 0.3 - Cycle de la chaux (T. T. Nguyen, 2010).

Quant à elle, la chaux hydraulique provient du calcaire qui contient des impuretés d'oxyde de fer, elle contient des aluminates, des silicates et un pourcentage non négligeable d'argile (environ 30 %) et, contrairement à la chaux aérienne, elle fait sa prise principalement en présence d'eau. Plus précisément, la chaux hydraulique subit une double prise, avec une première étape décrite dans **(0.4)** où les silicates (principalement de silicate dicalcique) subissent une hydratation et donnent lieu à des hydrates insolubles (appelés C-S-H) et de la chaux éteinte. Dans une deuxième étape, la prise se fait par carbonatation au contact de l'air, de la même façon que pour la chaux aérienne **(0.3)**.

$$2CaO(SiO_2) + H_2O \rightarrow CaO.SiO_2.nH_2O + Ca(OH)_2 \qquad (0.4)$$

Certains travaux affirment que la chaux est le liant le plus indiqué car celle-ci absorbe de l'eau et empêche le durcissement complet de la zone interne du béton (Jami et al., 2019), mais aussi grâce à son impact environnemental réduit en comparaison au ciment. En effet, (Pretot et al., 2014) estiment les émissions liées à la fabrication de chaux en 778 kg de $CO_{2\ \text{équivalent}}$ par tonne de chaux produite. De plus, la chaux absorbe du CO_2 lors de son durcissement, mais aussi lors de sa vie utile selon un phénomène appelé « recarbonatation », ce qui rend son bilan carbone négatif selon (Coia, 2020) lorsqu'elle n'est pas utilisée avec du ciment de Portland.

Pouzzolane

Les matériaux pouzzolaniques sont des matériaux siliceux ou siliceux et alumineux qui, en soi, ne sont pas cimentaires mais, quand ils se présentent sous forme granulaire et qu'ils sont en présence d'eau, réagissent avec l'hydroxyde de calcium à température ambiante et donnent lieu à des composés avec des propriétés cimentaires. Ils sont généralement ajoutés au ciment pour augmenter sa résistance mécanique du fait du développement augmenté de matrices gel de C-S-H lors de l'hydratation.

Liants industriels

Dans la pratique, les liants sont souvent des mélanges des liants purs cités ci-dessus. Quelques exemples sont :

- Tradical PF70 : il est composé de 75 % de chaux aérienne, de 15 % de chaux hydraulique et de 10 % de pouzzolane.
- Tradichanvre : il contient 22 % de chaux hydraulique, 58 % de chaux aérienne et 20 % de sable.
- Calco : il est un liant à base de chaux hydraulique naturelle, charge calcaire, adjuvant hydrofuge, adjuvant rhéologique et sable, fabriqué par le partenaire industriel ParexLanko.
- Hydraulic Binder : il s'agit d'un liant développé par ParexLanko dont la formulation exacte n'est pas connue. Cependant, il contient approximativement 80 % de chaux hydraulique, 10 % de ciment, 5 % de chaux aérienne et 5 % d'autres composants.
- NHL : commercialement, la chaux hydraulique est appelée NHL (Natural Hydraulic Lime). Selon sa résistance à la compression, on peut trouver NHL 2, NHL 3.5 et NHL 5, où le chiffre représente les MPa supportés à 28 jours selon la norme britannique.

0.1.3.2. Agrégats

0.1.3.2.1. Sous-produits agricoles

Le chanvre aussi appelé *Cannabis sativa*, est une plante de la famille des Cannabinées, dicotylédone et de culture annuelle. Elle est cultivée dans les régions légèrement tempérées car elle a besoin d'une grande incidence solaire, d'un sol réchauffé et de chaleur ambiante. Le chanvre présente des caractéristiques agricoles très avantageuses, car il nécessite très peu de fertilisant et une quantité modérée d'eau, il pousse très rapidement et il est résistant aux infestations parasitaires (Billy Seng et al., 2019). De plus, sa culture permet de régénérer et nettoyer le sol et son prix est relativement bas.

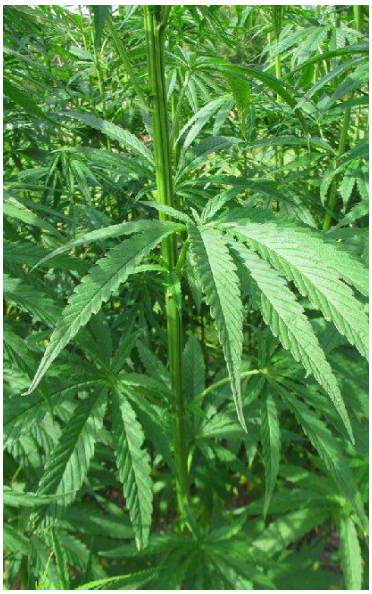


Figure 0.4 - Chanvre cultivé (Guicheteau et al., 2015).

Le chanvre est généralement cultivé à des fins industrielles et commerciales, principalement pour ses fibres. Il a de multiples applications dans l'industrie pharmaceutique, cosmétique et thérapeutique, entre autres. Il contient des composés appelés « terpènes », qui ont des propriétés anti-inflammatoires, calmantes, antibactériennes et antivirales, raison pour laquelle le chanvre est très utilisé dans l'industrie pharmaceutique. Dans l'industrie cosmétique, on peut trouver des baumes pour les lèvres, des crèmes et des shampooings entre autres. Il est aussi présent dans l'industrie agricole sous forme d'engrais, et ses feuilles et fleurs pourront bientôt être utilisées de façon généralisée dans l'industrie alimentaire. De façon plus répandue, on trouve l'huile produite à partir de ses graines, qui ont une teneur en huile de 35 %. Cette huile est très nutritive, riche en oméga 3, 6 et 9, mais elle peut aussi être utilisée en tant que biocombustible.

La tige du chanvre, dont le diamètre varie entre 1 et 3 cm approximativement, peut atteindre 4 m de hauteur. Elle a une morphologie très semblable à la tige de lin : elle est composée de plusieurs couches et est creuse au milieu.

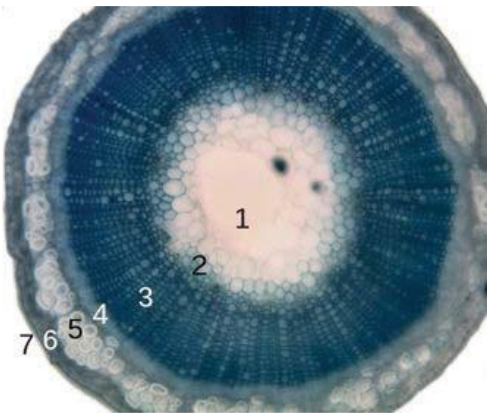


Figure 0.5 - Section transversale d'une tige de lin (Guyon et al., 2010).

Les couches sont les suivantes (cf. Figure 0.5 ci-dessus) :

1. Espace creux
2. Moelle
3. Xyleme primaire
4. Phloeme primaire
5. Fibres corticales
6. Ecorce
7. Epiderme

Le xylème primaire et le phloème primaire constituent la partie ligneuse, lorsque les fibres corticales et l'écorce constituent le cortex.

Les fibres du chanvre, aussi appelées « filasse », ont été utilisées dans l'industrie textile depuis des siècles. Elles sont extraites de la tige après l'avoir laissé pendant 2 ou 3 semaines au champ, où le soleil et la pluie vont décomposer le polymère organique qui maintient les fibres liées entre elles (T. T. Nguyen, 2010). Elles sont utilisées pour fabriquer des cordes, des chaussures, du papier, des moules ou des vêtements. Elles sont également utilisées comme isolant thermique, souvent sous forme de panneaux.

Le résidu de la tige une fois la fibre retirée est appelé chènevotte et trouve de nombreuses applications dans le domaine de la construction. Elle est par exemple broyée et incorporée au béton en tant qu'agrégat. Cet agrégat est très poreux et facilement déformable, caractéristiques qui auront un impact important sur les propriétés du béton.

En Europe, 33 300 hectares de chanvre ont été cultivés en 2016, parmi lesquelles, 15 000 étaient en France (InterChanvre, 2018), ce qui constitue un gisement important de chanvre dans la région.

Paille

Un autre déchet agricole en attente d'être exploité à grande échelle est la paille, que ce soit de riz, de blé, d'orge, de seigle ou autre. La paille est la tige de certaines céréales, et elle est généralement coupée et séparée lors de la récolte, comme litière, pour protéger le sol des champs agricoles ou même comme combustible. La paille est une ressource abondante qui a également été utilisée dans la construction pendant des siècles. Elle peut être utilisée seule sous forme de balle ou dans les toits de chaume, ou intégrée dans un autre matériau, typiquement la terre (adobe, bauge, torchis). Suite à l'essor de la construction en paille, des règles professionnelles ont été élaborées (RFCP (ouvrage collectif), 2011).

En France, ce sont les régions centrales et du nord-est qui produisent la plus grande quantité de céréales et donc, de paille. De plus, 60 % des terres arables françaises sont utilisées pour la culture des céréales, selon l'Observatoire National de Ressources en Biomasse (Mhiri et al., 2016). Dans le rapport, ils estimaient le volume de paille de céréales disponible en 2013/2014 dans le territoire français (hors DOM/TOM) en 24,5

millions de tonnes. Au niveau mondial, les céréales représentent 49 % des terres arables, ce qui équivaut à 700 millions d'hectares en 2018.

Balle de riz

La balle de riz est également un déchet agricole généré par le décorticage du riz (la balle étant l'enveloppe qui protège les graines) et, par conséquent, disponible à très grande échelle. Elle est typiquement utilisée en tant qu'isolant (Ze-Zu, 1982), comme source d'énergie (Nuamah et al., 2015) ou comme engrais. La balle de riz peut également être intégrée comme agrégat au béton, sa haute teneur en silice (Khan, 2015), son presqu'imputrescibilité, sa basse masse volumique et sa résistance mécanique faisant d'elle un agrégat très prometteur.

Tige de tournesol

Le tournesol ou *Helianthus annuus* est une plante de culture annuelle de la famille des astéracées d'environ trois mètres de hauteur, originaire du continent américain mais cultivée actuellement dans 5 des 6 continents. Le tournesol est principalement cultivé pour ses graines dont l'huile est riche en oméga 6 et oméga 9 avec des fins alimentaires, mais son huile peut également être utilisée en tant que biodiesel après estérification ou on peut aussi fabriquer de la glycérine avec des multiples applications (pharmaceutique, cosmétique, fabrication de peintures, etc.).

Figure 0.6 - Plante de tournesol (gauche) et tige de tournesol sèche (droite).

Le résidu issu de l'extraction de l'huile des graines est parfois valorisé pour la fabrication du tourteau de tournesol pour l'alimentation du bétail. La tige et la couronne de cette plante sont généralement considérées comme des déchets agricoles. Cependant, elles peuvent être valorisées en tant qu'agrégat végétal pour la construction, ainsi que le tourteau. La tige est composée, comme indiqué dans la **Figure 0.7**, d'un épiderme, d'une

écorce, de faisceaux vasculaires et de la moelle, la structure étant semblable à celle du chanvre. Tout comme le chanvre, la tige du tournesol peut être exploitée intégralement ou il est aussi possible d'extraire uniquement la moelle, qui est la partie la plus légère et qui est très prometteuse pour la fabrication de bétons légers.

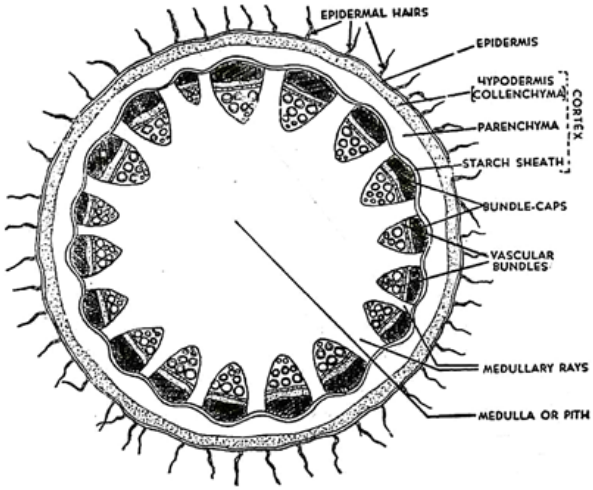


Figure 0.7 - Section d'une tige de tournesol (Gupta, 2012).

La culture de tournesol est peu exigeante vis-à-vis du type de sol, mais des sols argileux-sableux sont préférables. Il s'agit d'une plante avec une très bonne capacité d'adaptation, qui a besoin d'être exposée au soleil, mais qui ne nécessite pas une grande quantité d'eau, d'engrais ou de pesticides et qui a par conséquent un impact modéré sur l'environnement. Le prix de la matière première est très bas car la tige du tournesol est majoritairement considérée comme un déchet agricole et laissée en plein champ. En France, il est principalement cultivé dans la zone sud-ouest. En 2015, 615 000 hectares de tournesol ont été cultivés dans le pays, ce qui représente une production beaucoup plus fortement implantée que celle du chanvre. Le chiffre mondial d'hectares cultivés en 2018 s'élève jusqu'à 28 millions.

Maïs

Le maïs est une autre culture largement répandue et essentielle pour l'alimentation humaine et animale. Dénommé *Zea mays* en latin, cette plante est une herbacée cultivée pour ses grains riches en amidon qui peuvent être mangées directement ou sous forme de farine, d'huile ou de semoule. Originaire d'Amérique, il est un aliment de base dans ce continent, lorsqu'il est plutôt destiné au bétail en Europe. Il peut être également utilisé dans l'industrie non alimentaire, concrètement, l'amidon a des applications dans l'industrie textile, chimique et pharmaceutique, entre autres. Dans le cas de l'alimentation animale, la plante peut être utilisée en sa totalité, mais de façon générale, la seule partie exploitable sont les graines. Cependant, une certaine quantité de cannes (composées des tiges et des feuilles) de maïs doit rester sur le champ après récolte pour protéger le sol. La **Figure 0.8** montre les différentes parties de la plante du maïs.

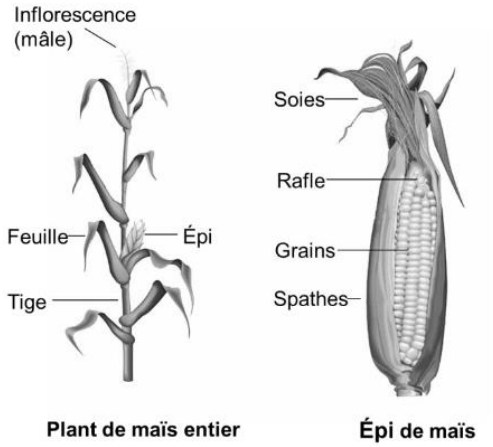


Figure 0.8 - Les parties de la plante du maïs (Boivin, 2014).

Les déchets du maïs (cannes, spathes, soies et rafles) peuvent être valorisés dans la construction durable, notamment les épis ou rafles une fois le grain a été extrait, ainsi que la tige, pouvant être, comme le tournesol, utilisée en entier ou uniquement la partie interne ou moelle (cf. **Figure 0.9**).

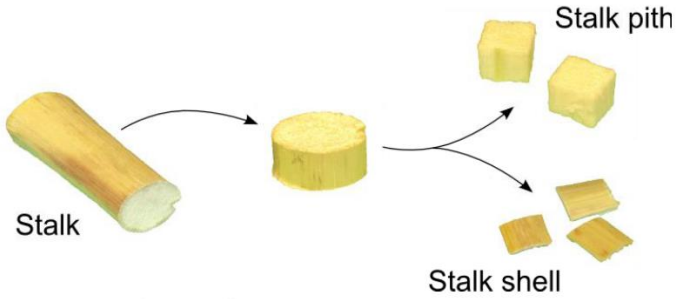


Figure 0.9 - Composition de la tige de maïs (Medic et al., 2012).

Avec 192 millions d'hectares cultivés au monde en 2019, il représente la troisième culture de céréale la plus répandue, après le blé et le riz. La culture du maïs est propre aux climats tempérés voire tropicaux. En France, il est particulièrement cultivé dans le Sud-Ouest, avec une surface totale de 2,9 millions d'hectares en 2016 et 1 milliard de tonnes récoltées chaque année. Le premier producteur de maïs au monde sont les Etats-Unis, mais il est présent dans pratiquement tous les pays, ce qui fait de lui une ressource largement disponible.

0.1.3.2.2. Productions forestières

Déchets du bois

Le bois est le matériau qui constitue majoritairement le tronc des arbres et il est composé de fibres de cellulose liées par un polymère organique, la lignine. Il s'agit de l'une des matières premières végétales les plus exploitées par l'être humain, car c'est une ressource renouvelable, économique et abondante, ainsi que biodégradable et recyclable. Il est utilisé dans la construction, pour laquelle il existe des règles professionnelles

(AFCOBOIS, n.d.; IRABOIS, 1999; SCIBO, 2016; SNCCBLC, 2000), dans la fabrication de meubles, en tant que combustible et pour la fabrication de papier entre autres. Etant donné qu'il y a une multitude de types de bois (de chêne, de pin, de châtaignier, de cèdre, etc.), ses propriétés sont très variables. De façon générale, le bois est un bon isolant thermique et électrique, ce qui fait de lui un matériau très intéressant pour la construction écoresponsable. Dans ce domaine, il peut être utilisé sous forme de planche, de poutre, de panneau ou même de copeaux qui peuvent être utilisés dans des bétons. Ces derniers présentent l'avantage de valoriser potentiellement les déchets d'autres filières du bois. Selon (Guinard et al., 2015), 6,2 millions de tonnes de déchets de bois sont disponibles chaque année en France.

0.1.3.3. Couples liant-agrégats

Une multitude de bétons biosourcés peuvent être fabriqués, principalement à partir des liants et des agrégats présentés, mais pas seulement. L'intérêt pour l'écoconstruction ne cesse d'augmenter, stimulé par une conscience environnementale croissante et une législation de plus en plus exigeante. Cela fait que de nombreuses études soient menées aujourd'hui sur des matériaux innovants, certains desquels seront présentés ci-dessous.

Le liant le plus courant est la chaux, grâce à ses avantages environnementaux. Souvent, les bétons biosourcés contiennent un mélange de chaux hydraulique et aérienne, avec des éventuels rajouts de ciment, de pouzzolane et d'adjuvants comme le laitier de haut fourneau. Il est important de remarquer que les différents types de granulats n'interagissent pas tous de la même façon avec le liant. En effet, de nombreuses études permettent de conclure qu'il n'y a pas de bon ou mauvais agrégat ou liant, mais de bonnes ou mauvaises combinaisons de ceux-ci (Murphy et al., 2010). L'association Construire en Chanvre présente dans son site internet la liste de couples liant-granulat pouvant être utilisés dans chaque application (enduit, sol, mur ou toit) (Association construire en chanvre & Fédération Française du Bâtiment, 2009). Ces couples ont été validés par des laboratoires accrédités et l'utilisation d'autres combinaisons n'a aucune garantie de sécurité.

De façon générale, les matériaux biosourcés sont de bons isolants thermiques et acoustiques (Karolina et al., 2020). Parmi les bétons développés ci-après, deux sont régis par des règles professionnelles : le béton de chanvre et le béton de paille de riz.

Béton de chanvre

Le béton de chanvre est présent en France depuis les années 80, mais il a vécu son essor à partir des années 90. C'est un mélange de broyat de tige de chanvre (chènevotte), d'eau et d'un liant (classiquement ciment de Portland (Sedan et al., 2008) ou chaux (Kinnane et al., 2016)), dont le rôle est de maintenir l'agrégat (le broyat) collé (cf. **Figure 0.10**).

C'est de loin le béton à base d'agrégats végétaux le plus populaire et le plus étudié en Europe (Amziane & Sonebi, 2016). Toutefois avec environ 100 constructions neuves par an seulement en France, son utilisation reste minoritaire en comparaison à d'autres matériaux, en dépit des nombreux travaux de recherche menés dans le but d'optimiser sa composition et de déterminer ses caractéristiques. Etant donné que ce matériau est relativement nouveau, il existe toujours des problèmes pour prédire sa durabilité au cours du temps (Castel et al., 2017).

En France, il existe des règles professionnelles pour la construction en béton de chènevotte depuis 2007 (Association construire en chanvre & Fédération Française du Bâtiment, 2009). Ces règles constituent la principale référence pour la construction avec bétons biosourcés et sont en cours d'actualisation. Elles visent à assurer la qualité et la durabilité des constructions en béton de chanvre, ayant été rédigées par un groupe d'experts à partir de leur expérience dans le domaine. Elles ont été validées par l'APAVE, le Conseil des professions de la Fédération Française du Bâtiment (FFB) et la Commission Prévention Produit (C2P) de l'Agence Qualité Construction (AQC).

Ce béton à basse densité peut être utilisé en tant qu'isolant à l'intérieur des murs ou pour l'isolation de toits et sols, mais il ne peut pas être un élément structurel en vue de sa faible résistance mécanique (Hustache & Arnaud, 2008). Il peut être mis en place par banchage, projeté spray (Elfordy et al., 2008) ou il peut venir sous forme de blocs préfabriqués (Billy Seng et al., 2019). Parmi ces techniques, seuls les blocs préfabriqués permettent de contrôler le niveau de compacité et les conditions de fabrication (Youssef et al., 2015). Le béton de chanvre est fabriqué à partir de la chènevotte, appelée « hemp shiv » ou « hemp hurd » en anglais (Abdellatef & Kavgic, 2020; Arehart et al., 2020; Benmahiddine et al., 2020; Bennai et al., 2018; Delannoy et al., 2018; A. Fabbri & McGregor, 2017), mais le chanvre peut également être utilisé avec ses fibres dans les cas où la technologie de séparation n'est pas disponible (P. De Bruijn, 2008). D'une autre part, il peut également être utilisé dans le bâtiment sous forme de laine en tant qu'isolant (El Sawalhi, 2015; Latif, Ciupala, et al., 2015).

Le béton de chanvre a une très grande effusivité et une inertie thermique importante, ce qui fait qu'il met moins longtemps à se tempérer que les matériaux classiques et une fois réchauffé, il dégage lentement de la chaleur quand la température autour descend (Arnaud Evrard, 2008).

Figure 0.10 - Echantillons de béton de chènevotte (Jami et al., 2019).

Béton de paille de riz

La paille de riz fait l'objet de nombreux travaux ces dernières années du fait de sa grande disponibilité, de son bas coût et des techniques polluantes utilisées pour s'en défaire (Garas et al., 2009).

Par exemple, elle peut faire partie d'un composite avec un adhésif de ciment de magnésium (J. Wang et al., 2019). Ce composite est léger et résistant en plus de son catactère retardateur de flamme, raisons par lesquelles il est indiqué pour la construction de murs. (Ahmed et al., 2020) utilisent la paille de riz pour renforcer un béton utilisé en tant que sol et ainsi prévenir l'apparition de fissures. En revanche, la résistance mécanique du béton est réduite (Karolina et al., 2020; G. Wang & Han, 2018). (Abdul Mulok et al., 2018) arrivent à améliorer la résistance en flexion, à la traction et la résistance aux impacts du béton en mélangeant des fibres de paille de riz et des fibres de kénaf, une variété du chanvre aussi appelée « chanvre du Deccan ». (Morsy, 2011) développe plusieurs matériaux à base de ciment de Portland, cendres volantes, plâtre, hydroxyde de calcium et paille de riz avec des résultats satisfaisants.

Béton de moelle de tournesol

Le béton de moelle de tournesol utilise la partie interne de la tige du tournesol, appelée moelle, qui est spongieuse, extrêmement légère et poreuse (cf. **Figure 0.11**). Cette tige n'est qu'un déchet du point de vue de la production d'huile, ce qui rend ce type de béton une solution soutenable, car il ne nécessite pas de champs agricoles dédiés pour les matériaux de construction (Niez, 2015). De plus, la moelle de tournesol est un isolant thermique particulièrement bon, plus que d'autres agrégats comme le chanvre, et a une très grande capacité de stockage de la vapeur.

Figure 0.11 - Moelle de tournesol (Magniont, 2010).

Les liants utilisés dans le béton de moelle sont nombreux : l'argile (Brouard et al., 2018), des polysaccharides (Mati-Baouche, 2015), de la chaux parfois mélangée avec du sable (Niez, 2015) ou même le ciment (Nozahic & Amziane, 2012). Comme le béton de chènevotte, le béton de tournesol peut être projeté ou préfabriqué dans des blocs. Il est également un béton à basse densité qui ne peut pas être un élément porteur du fait de sa faible tenue mécanique.

Béton de maïs

Etant donné le volume important de production de déchets de maïs, plusieurs auteurs se sont intéressés à la valorisation de ce coproduit comme agrégat végétal pour le béton. (Pinto et al., 2012) utilisent la rafle du maïs une fois que les graines de maïs ont été extraites, puisqu'il s'agit d'un résidu sans applications actuelles. En le mélangeant avec du ciment de Portland, ils obtiennent un béton léger non-apte pour des applications structurelles, mais qui peut être employé dans la couche de régularisation du sol.

Plusieurs études proposent l'utilisation de la tige de maïs broyée (Ahmad et al., 2018; Ahmad & Chen, 2020; Jarabo et al., 2013; Wei et al., 2019). (Ahmad et al., 2018; Ahmad & Chen, 2020) mélangent cet agrégat avec de la ceindre volante et du ciment de phosphate de magnésium pour être utilisé comme matériau d'isolation ou comme un élément structurel. Les différents mélanges développés dans ce travail sont présentés dans la **Figure 0.12**. Selon cette étude, quand la tige de maïs est utilisée avec certains types de ciment, le béton obtenu présente de meilleures propriétés mécaniques que, par exemple, le béton à base de chènevotte et de chaux hydraulique, et il respecte les demandes des lois de construction.

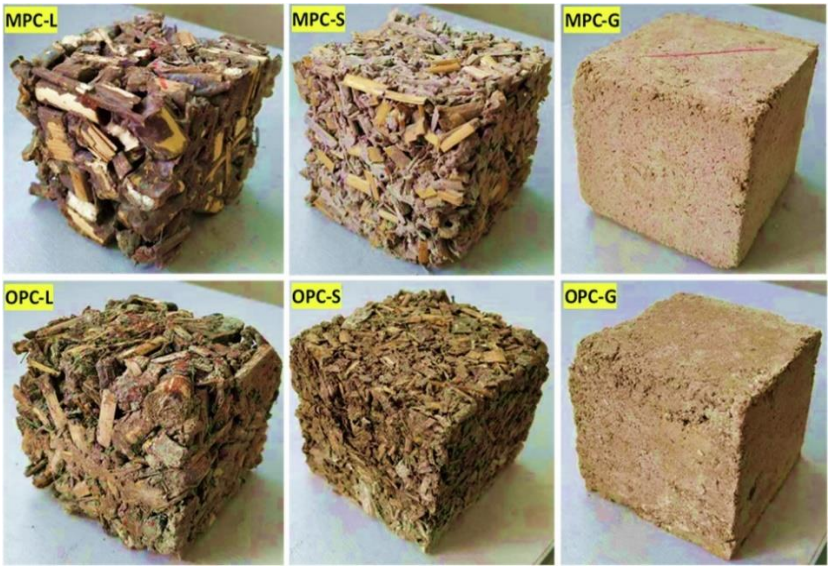


Figure 0.12 - Aperçu des formulations utilisées par (Ahmad & Chen, 2020) avec du ciment de phosphate de magnésium (MPC) et du ciment de Portland ordinaire (OPC) comme liants et des tiges de maïs broyées de grande taille (L), de petite taille (S) et en poudre fine (G).

De leur côté, (Wei et al., 2019) étudient deux matériaux, un premier composé de tiges broyées et de béton de ciment de phosphate de magnésium et un deuxième fabriqué à partir de la tige broyée et de ciment de Portland, trouvant une meilleure résistance à la compression pour le ciment de magnésium, qui est de plus mieux adapté à la préparation de bétons végétaux. D'un autre côté, (Jarabo et al., 2013) utilisent uniquement les fibres extérieures de la tige et obtiennent un béton, mélangées majoritairement avec du ciment de Portland. Ils arrivent à la conclusion que le béton doit être mélangé avec d'autres fibres, par exemple, de pin, pour atteindre la résistance mécanique désirée.

D'autres auteurs se sont focalisés sur l'utilisation de l'écorce de la tige, qui a des caractéristiques semblables à la chènevotte. Cependant, (Bourdot et al., 2019; Lagouin et al., 2019) trouvent que la mise en œuvre du béton composé de métakaolin et d'écorce de maïs n'est pas possible à cause de difficultés lors de la prise. À la suite de ces résultats, et à l'importance de la valorisation d'un résidu aussi abondant, la nouvelle direction est de déterminer si l'utilisation de la moelle de tournesol donne de meilleurs résultats et de trouver le liant adéquat.

Béton de fibres de bois

Les matériaux à partir de fibres ou de particules de bois sont utilisés depuis plus d'un demi-siècle dans la construction comme isolant thermique et phonique sous forme de panneaux de composite ciment-bois. Ils offrent également un haut degré de confort du fait qu'ils ont la capacité de réguler l'humidité dans l'ambiance.

En général, les matériaux avec un haut contenu en bois ne sont pas mécaniquement résistants, mais ils sont peu chers et ils ont un intérêt écologique (M. Li et al., 2017;

Souza et al., 2018). La **Figure 0.13** montre un béton à base de particules de bois étudié par Li et al., 2017.

Figure 0.13 - Béton de fibres de bois (M. Li et al., 2017).

Cependant, certains matériaux avec un plus faible taux de fibres de bois ont des propriétés mécaniques intéressantes, comme c'est le cas du matériau étudié par (He et al., 2019). Il s'agit d'un mélange à partir du béton aéré autoclavé (AAC d'après ses sigles en anglais), de fibres de bois et de particules de caoutchouc. Le AAC est un mélange de quartz, ciment, chaux, plâtre, de quelques particules d'aluminium et d'eau, et il s'utilise pour construire des bâtiments à haute performance énergétique. Dans le nouveau mélange, les ajouts améliorent les propriétés mécaniques et thermiques de l'ACC, qui est relativement fragile quand il se trouve seul. (Aigbomian & Fan, 2013) ont testé des blocs de béton à base de sciure, déchets de papier et chaux Tradical et ont trouvé de très bonnes propriétés isolantes mais une très faible résistance mécanique.

Composites à base de terre compactée

Un autre type de matériau de construction éco-responsable est la terre compactée et les composites à base de terre et d'agrégats végétaux, dénommés géo-composites du fait de l'origine géologique de la terre. Malgré le fait qu'ils ne soient pas dans la catégorie de matériaux biosourcés, ils constituent une autre forme de valorisation de déchets agricoles dans le bâtiment et font l'objet d'un intérêt renouvelé de la part de la communauté scientifique.

La terre compactée a été utilisée dans la construction depuis plusieurs milliers d'années. Les plus anciennes traces de cette technique de construction datent de 814 AC à Carthage (Soudani, 2016). Pourtant, il s'agit d'un matériau encore à jour et avec un énorme potentiel pour la construction de bâtiments énergétiquement performants.

Comme mentionné auparavant, il est aussi possible de fabriquer des composites à partir de la terre et d'agrégats issus de l'agriculture. Un exemple est (Vinceslas, 2019), qui étudie un matériau à base de terre crue et de chanvre, trouvant un comportement mécanique semblable à celui des composites chaux-chanvre. D'autres composites plus classiques sont la bauge, constituée de terre crue et de fibres végétales ou éventuellement

animales, et l'adobe, qui est composé d'argile, d'eau et une petite part de paille ou d'une autre fibre façonné sous forme de briques (Babé et al., 2020). Ce matériau peut atteindre de très grandes valeurs de résistance mécanique, étant généralement apte pour la construction d'éléments porteurs de charge, mais c'est un mauvais isolant thermique.

0.2. Problématique de la thèse

0.2.1. Contexte

Ce projet de thèse a été mené dans le cadre du projet DIVA, un projet démarré en 2016, qui vise le développement de mortiers isolants d'origine biosourcée. Financé par l'ADEME et coordonné par Parex Group, ce projet fait partie du programme « Energies décarbonnées » de l'ADEME sur la thématique de la rénovation de l'habitat. Il s'adresse aux bâtiments affectés par la loi Grenelle 2, qui durcit les exigences en matière de performance énergétique, et par le Plan de Rénovation Energétique de l'Habitat. Il porte un intérêt particulier sur le dénommé « patrimoine vernaculaire », qui est l'ensemble de bâtiments construits avec des matériaux non-industriels, c'est-à-dire, les constructions en torchis, en adobe, en bauge, en pisé, etc. Cette recherche s'oriente vers les matériaux légers à faible impact environnemental pour la rénovation du patrimoine vernaculaire, à partir de matières à coût potentiellement réduit pour rendre ces rénovations plus accessibles. Elle s'oriente également vers la valorisation locale de déchets agricoles et vers l'utilisation de matériaux qui ne perturbent pas les échanges hygrothermiques des parois, dont la stabilité nécessite de conserver l'échange hydrique.

A cette fin, deux agrégats végétaux ont été sélectionnés par les entités participant au projet : la moelle de maïs et la moelle de tournesol. L'utilisation de ces deux agrégats dans des matériaux de construction permet de mettre en valeur des déchets agricoles produits en très grand volume en France sans nécessiter de terrains de culture dédiés. De plus, la moelle a un grand pouvoir isolant et elle est très légère. Par conséquent, ils représentent de potentielles alternatives énergétiquement performantes et respectueuses de l'environnement. Les bétons de moelle ont aussi la propriété d'être de caractère perméant, la perméance étant l'aptitude d'un matériau à laisser diffuser la vapeur d'eau au sein de son réseau poreux. Cette propriété a un impact très positif sur le confort habitable d'un bâtiment.

Le but du projet est également d'élargir le champ des matériaux biosourcés pour la construction, qui est fortement dominé par le béton de chènevotte. Même si la France est le premier producteur européen de chanvre, la culture de cette plante est minoritaire, lorsque le maïs et le tournesol sont des cultures largement répandues et qui génèrent un volume de déchets qu'il serait intéressant d'exploiter. La diversification des sources de matières premières végétales pour la construction permet d'élargir les zones de production de ressources pour garantir leur utilisation locale et de prendre en considération la saisonnalité et les propriétés de chaque culture, qui peuvent être adéquates pour un type

déterminé de construction. Dans le cadre de la transition écologique, il est essentiel d'adapter la consommation aux opportunités offertes par son environnement.

Avec l'ADEME et Parex Group, le projet DIVA rassemble six autres intervenants dont trois coopératives agricoles (Ovalie, Groupe Dauphinoise et GDA de Loches-Montrésor), le groupe industriel F.L.D.I. et deux établissements d'enseignement supérieur (UniLaSalle et l'ENTPE). Lorsque le groupe Parex s'occupe de la fourniture du liant, les coopératives fournissent les matières premières végétales, qui sont par la suite séparées en moelle et en écorce par le groupe F.L.D.I. L'UniLaSalle se charge de la caractérisation des granulats végétaux et, enfin, l'ENTPE étudie les couples granulat-liant.

0.2.2. Objectifs

Les bétons à base de tournesol et de maïs ont déjà été étudiés par plusieurs auteurs (Bourdot et al., 2019; Brouard, Belayachi, Ranganathan, et al., 2017; Laborel-Préneron et al., 2018; Lagouin et al., 2019; Mathias et al., 2015; Nozahic & Amziane, 2012; Palumbo, 2015). Cependant, les bétons fabriqués à partir de la moelle de ces deux plantes ont été très peu étudiés jusqu'à présent. Etant donné que les deux bétons sont de nature similaire, ils ont été étudiés en parallèle en établissant une comparaison constante avec le matériau de référence, le béton de chènevotte.

Les grands apports visés avec cette thèse sont, en premier lieu, la caractérisation fine des bétons de moelle de tournesol et de maïs à l'échelle du matériau : leurs caractéristiques mécaniques, hygroscopiques, thermiques et acoustiques. Cette étude est menée en portant une attention particulière à l'impact des couples granulat-liant sur les propriétés macroscopiques. En deuxième lieu, le projet vise à développer de nouvelles méthodes de caractérisation, directes ou indirectes, des propriétés hygrothermiques des matériaux biosourcés. Enfin, le troisième objectif est de développer un modèle mathématique et son implémentation numérique pour prédire la réponse hygrothermique des bétons étudiés à l'échelle du mur à partir de leurs propriétés à l'échelle matériau. L'ambition de cette modélisation est de contribuer au développement du domaine en proposant une méthode de quantification des apports de la mise en place d'isolants de type béton biosourcé en termes de gain énergétique et qualité de l'air intérieur d'une habitation.

0.3. Organisation du document

Ce document est séparé en deux parties : une première partie qui porte sur les propriétés du béton de moelle et de chanvre à l'échelle du matériau et une deuxième partie qui traite des propriétés de ces deux types de béton à l'échelle du mur.

La première partie est composée des Chapitres 1 à 4. En premier lieu, un état de l'art sur les propriétés physiques, mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre et de moelle est présenté dans le Chapitre 1, ainsi qu'un état de l'art sur les interactions physiques et chimiques les plus communes entre liants et granulats.

Pour parvenir à caractériser les bétons de moelle de tournesol et de maïs, le Chapitre 2 de ce travail consiste d'une part à étudier l'influence de la variabilité de la moelle de maïs et de tournesol en termes géographiques et d'année de récolte. De la même manière, une étude est menée pour déterminer l'impact du granulat et du liant sur les propriétés macroscopiques mécaniques, thermiques et hygroscopiques, ainsi que l'interaction entre granulat et liant.

Ensuite, le troisième chapitre vient complémenter cette étude en caractérisant les propriétés acoustiques des bétons de moelle, comparées à celles du béton de chanvre, et les paramètres géométriques microstructuraux des bétons, déterminés par le biais de mesures acoustiques. D'abord, les propriétés acoustiques et paramètres géométriques seront définis, ainsi que la méthode suivie pour leur détermination et les modèles utilisés pour cela. Une étude expérimentale sur la corrélation entre les propriétés hygrothermiques et les paramètres géométriques déterminés par la voie acoustique sera présentée.

Le quatrième chapitre se concentre sur le comportement hygrothermique des bétons de moelle et de chanvre, plus concrètement sur l'évolution de plusieurs propriétés thermiques et hygroscopiques avec la teneur en eau.

La deuxième partie de ce projet englobe deux chapitres. Dans le Chapitre 5, un modèle mathématique est proposé pour caractériser les échanges de masse et de chaleur à travers une paroi monocouche ou bicouche dont l'impact du couplage hygrothermique peut ne pas être négligeable. Ce modèle est ensuite utilisé pour simuler à l'aide du code de calcul COMSOL Multiphysics la réponse de plusieurs murs bicouche où un matériau biosourcé est utilisé en tant qu'isolant intérieur d'un mur en béton classique, en présence de différentes sollicitations provenant des ambiances intérieure et extérieure.

Enfin, un sixième chapitre vise à quantifier l'impact de l'imperméabilisation et l'isolation provoquées par l'appareil de mesure sur la surface des matériaux dans le cadre des mesures hygrothermiques en utilisant la méthode de simulation développée dans le Chapitre 5, accompagnée de mesures expérimentales.

Partie I : Propriétés du béton de moelle et de chanvre à l'échelle du matériau

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les caractéristiques principales des bétons biosourcés et les interactions liant-granulat

Table des matières

1.1 Propriétés des matériaux biosourcés et méthodes de caractérisation 26
- 1.1.1 Propriétés physiques 26
- 1.1.2 Propriétés mécaniques 33
- 1.1.3 Propriétés thermiques 40
- 1.1.4 Propriétés hygroscopiques 44

1.2 Les interactions liant-granulat dans la littérature 56
- 1.2.1 Echelle microscopique 57
- 1.2.2 Echelle macroscopique 62

1.1. Propriétés des matériaux biosourcés et méthodes de caractérisation

Pour établir une comparaison objective entre les matériaux étudiés lors de ce travail, une présentation des propriétés physiques, mécaniques, thermiques et hygroscopiques s'avère nécessaire, ainsi qu'une présentation des méthodes utilisées pour les déterminer. De la même manière, telles propriétés seront détaillées dans le cas du béton de chanvre et éventuellement des bétons de moelle de tournesol et de maïs, pour lesquelles le nombre de publications est beaucoup plus restreint.

1.1.1. Propriétés physiques

Généralement, les matériaux biosourcés font partie des matériaux hygroscopiques. C'est-à-dire, qu'ils ont une affinité particulière avec les phénomènes de transferts massiques. Ils ont une grande capacité d'adsorption, de désorption et une condensation capillaire importante. Ces caractéristiques sont dues à la spécificité de la matrice poreuse.

Dans sa thèse, (Ben Mabrouk, 1999) explique que le milieu poreux est défini selon 3 échelles (cf. **Figure 1.1**) :

- *L'échelle macroscopique*, où le matériau est considéré continu. La résolution des problèmes est le plus souvent à cette échelle où s'appliquent les lois de la thermodynamique ;
- Le *Volume élémentaire représentatif (VER)*, qui est le volume minimum à prendre en considération pour que les principes de la thermodynamique s'appliquent. La taille des pores doit alors être plus grande que l'échelle des interactions moléculaires. (Whitaker, 1977) pose les bases et conditions nécessaires pour la définition du VER (Anh Dung Tran Le, 2010). Différents auteurs ont ensuite cherché à estimer la taille du VER, qui dépend de chaque matériau, dont (Q. Wu, 2015) ;
- *L'échelle microscopique*, plus représentative des milieux poreux où la réalité est spécifiquement discrète et à l'échelle moléculaire.

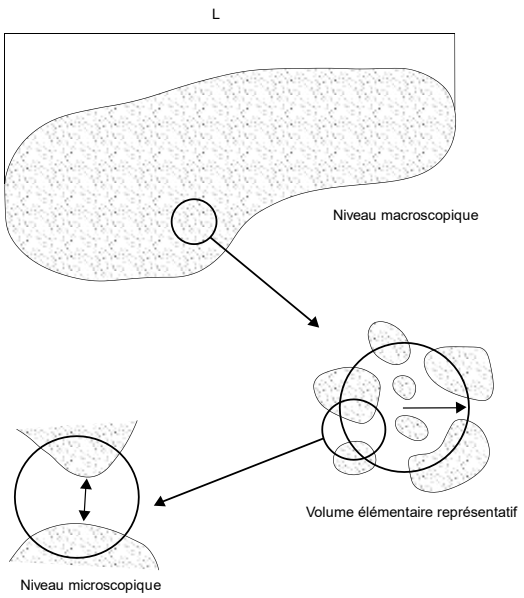


Figure 1.1 - Les 3 échelles des milieux poreux inspiré de (Ben Mabrouk, 1999).

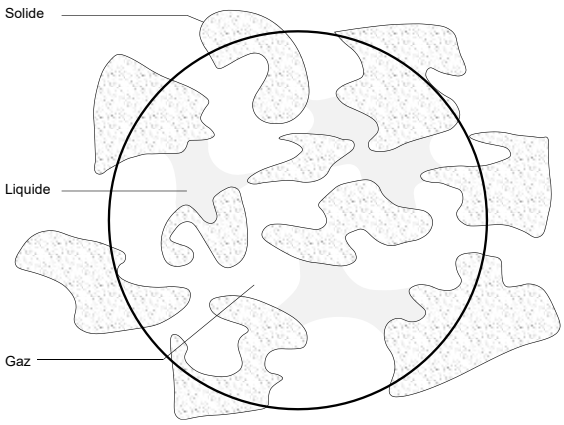


Figure 1.2 - Les 3 phases des milieux poreux – illustration inspirée de (Ben Mabrouk, 1999).

Le milieu poreux peut aussi être caractérisé par les trois phases qui le composent (Daïan, 2013; Trabelsi, 2010) : les phases solide, liquide et gazeuse. Les phases liquide et gazeuse sont contenues dans les pores (c'est-à-dire les espaces vides ou les cavités) du matériau. La phase solide forme quant à elle la matrice solide.

1.1.1.1. Granulométrie

La granulométrie est l'étude de la distribution statistique de la taille d'un solide fractionné, ce qui est le cas des granulats, ou d'un liquide multiphasique. Pour les agrégats végétaux, elle peut être effectuée par tamisage ou par la technique d'analyse d'image selon les recommandations de la RILEM (Amziane et al., 2017). Ces recommandations s'adressent à la chènevotte mais elles peuvent être utilisées pour d'autres agrégats végétaux qui manquent de réglementation et de standardisation des procédés.

Méthodes

Le tamisage consiste en la séparation du matériau en plusieurs fractions en fonction de la taille des particules, par taille décroissante et à l'aide d'un ensemble de tamis. Le matériau granulaire est d'abord séché dans une étuve à 60 ± 5 °C, puis pesé. Ensuite, il faut le faire passer à travers les différents tamis et peser chaque tamis à vide et avec la matière retenue pour déterminer la masse correspondant à chaque diamètre de particule. Le tamis avec la plus petite taille d'ouverture doit faire 0,5 mm pour déterminer le contenu de poussière.

La technique d'analyse d'images ne demande pas de tamis, mais elle nécessite d'un ordinateur avec un logiciel d'analyse d'image et d'un scanner. La matière est étalée sans superpositions et optionnellement collée sur un fond foncé pour assurer le contraste, puis scannée. Ensuite, le logiciel détermine la répartition statistique de la taille des particules, que ce soit le diamètre ou la longueur et largeur, selon le type de particule.

Les résultats de la granulométrie s'expriment le plus souvent au moyen d'une courbe qui montre le pourcentage cumulé de grains qui passent par chaque tamis, confronté à la taille des particules.

Valeurs dans la littérature

La granulométrie des agrégats dépend fortement du degré de broyage. Il existe des cahiers de charges, notamment pour le chanvre, qui déterminent la taille de particules appropriée pour le béton, comme par exemple le cahier des charges du label « chanvre bâtiment ».

Pour le chanvre, (T.-T. Nguyen et al., 2009) utilisent les deux méthodes de détermination de la granulométrie et trouvent les résultats montrés dans la **Figure 1.3**, où « FH » correspond au chanvre fibré et « HH » à la chènevotte. Selon l'analyse d'image, les particules ont une taille maximale d'environ 20 mm, avec 60 % de celles-ci en dessous de 10 mm. Cette méthode se révèle plus adéquate pour l'étude de la chènevotte du fait de la géométrie élancée des particules, tandis qu'aucune des deux méthodes n'est appropriée pour l'étude d'agrégats fibrés. (Williams et al., 2016) étudient la granulométrie de la chènevotte par analyse d'image et trouvent une largeur et une longueur moyennes de 1,55 mm et 5,56 mm, respectivement.

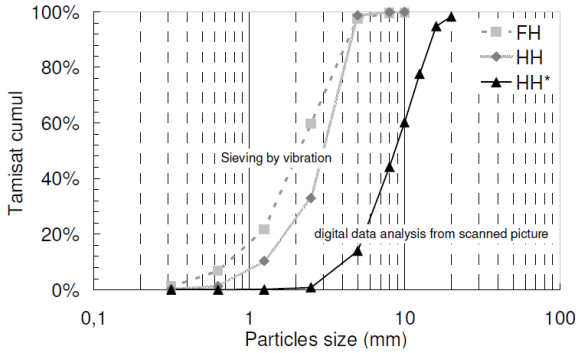


Figure 1.3 - Granulométrie des particules de chènevotte (T.-T. Nguyen et al., 2009).

(Lenormand et al., 2017) déterminent une taille très homogène pour les particules de moelle de tournesol. Ils séparent les résultats en longueur et largeur des particules, mais les deux résultats sont très proches. Lorsque la largeur oscille entre 1,5 et 7,5 mm, la longueur le fait entre 3,5 et 10,5 mm. (Ahmad et al., 2018) étudient un composite à base de tige de maïs broyée, c'est-à-dire, un mélange de moelle et écorce, et trouvent un diamètre moyen de particule de 12 mm par tamisage et 12,5 mm par analyse d'image.

1.1.1.2. Porosité et masse volumique

La porosité est la fraction volumique de pores dans le matériau, indépendamment des fluides les remplissant. Elle est par conséquent comprise entre 0 et 1 (ou entre 0 et 100 si elle est exprimée en pourcentage). Elle est calculée selon **(1.1)** :

$$\phi = \frac{V_{pores}}{V_t} \tag{1.1}$$

Où ϕ [-] représente la porosité, V_{pores} représente le volume des pores et V_t est le volume total du matériau, y compris le volume des pores. La porosité peut être ouverte ou fermée, en fonction de si le pore est accessible depuis l'extérieur du matériau à travers un réseau connecté ou pas, comme l'explique la **Figure 1.4**. La somme de la porosité ouverte et fermée est la porosité totale.

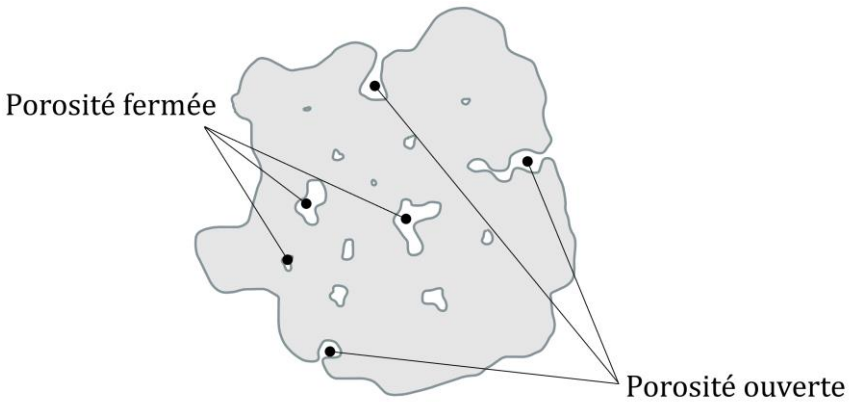


Figure 1.4 - Représentation de la porosité fermée et ouverte.

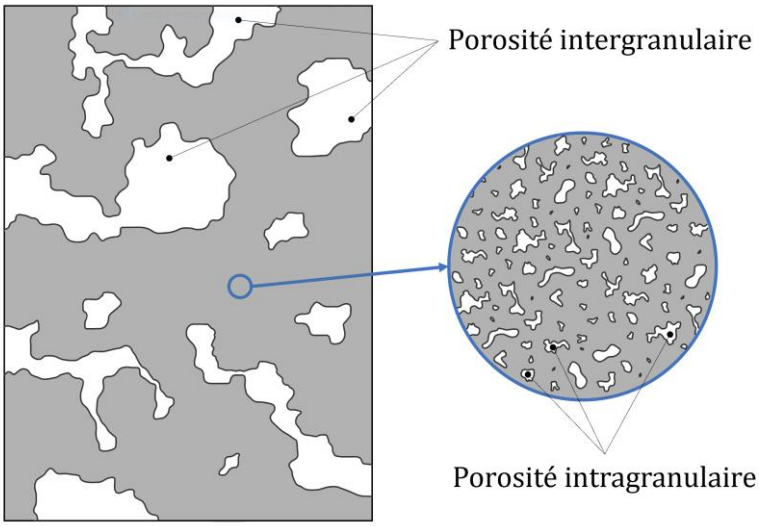


Figure 1.5 - Représentation de la porosité inter et intragranulaire.

Lorsqu'on étudie les particules végétales, on peut distinguer plusieurs types de porosité : la porosité intergranulaire et la porosité intragranulaire (**Figure 1.5**). La première correspond aux vides laissés entre particules végétales. La deuxième représente la porosité à l'intérieur des particules. Dans le concept, la somme des deux représente la porosité totale. Cependant, la porosité intragranulaire s'exprime comme le ratio entre le volume des pores à l'intérieur d'une particule et le volume total de la particule. Par conséquent, la formule que relie ces deux types de porosité avec la porosité totale est la suivante :

$$\phi = \phi_{inter} + (1 - \phi_{inter}) \cdot \phi_{intra} \qquad (1.2)$$

Avec ϕ [-] la porosité totale, ϕ_{inter} [-] la porosité intergranulaire et ϕ_{intra} [-] la porosité intragranulaire.

La masse volumique est définie comme le rapport entre la masse d'un échantillon de matière et son volume. Dans le cas des particules végétales, compte tenu de ces différentes échelles de porosité, une des difficultés est de quantifier ledit volume.

Une première approche consiste à considérer le volume occupé par l'empilement de particules non tassées, prenant en compte le volume entre les particules. Dans ce cas, le ratio masse sur volume donne la masse volumique apparente (ou foisonnée), notée ρ_{app} [kg/m^3] :

$$\rho_{app} = \frac{m_{sec}}{V_t} \qquad (1.3)$$

Où V_t [m^3] est le volume total occupé par les particules et les espaces interstitiels lorsqu'ils ne sont pas tassés et m_{sec} [kg] est la masse sèche de l'ensemble. Pour obtenir cette masse sèche, (Amziane et al., 2017) recommande de sécher les particules à 60°C jusqu'à ce que leur masse varie moins de 0,1 % entre deux mesures réalisées avec un écart de 24 h.

D'autre part, la « masse volumique du grain » (ρ_{grain}) se concentre sur le volume et la masse des particules sans compter le volume qu'il y a entre elles. Ainsi, en utilisant la relation **(1.3)**, cette dernière est égale à :

$$\rho_{grain} = \frac{m_{sec}}{V_{grain}} = \frac{\rho_{app}}{1 - \phi_{inter}} \qquad (1.4)$$

Finalement, la « masse volumique du squelette » ($\rho_{squelette}$) fait référence uniquement à la masse et au volume occupés par la partie solide, sans compter l'ensemble des pores, que ce soit entre les grains ou à l'intérieur de ceux-ci. Ainsi, en utilisant la relation **(1.2)** nous obtenons :

$$\rho_{squelette} = \frac{\rho_{app}}{1 - \phi} \qquad (1.5)$$

Quant aux solides continus comme les bétons biosourcés, on y distingue uniquement la masse volumique apparente sèche, notée (ρ_{sec}), qui prend en compte le volume avec l'ensemble de la porosité, et la masse volumique du squelette ($\rho_{squelette}$), qui ne prend pas en compte celle-ci :

$$\rho_{sec} = \frac{m_{sec}}{V_t} \quad ; \quad \rho_{squelette} = \frac{\rho_{sec}}{1 - \phi} \qquad (1.6)$$

Méthodes

La mesure de la porosité peut être effectuée par deux méthodes : via une mesure à l'eau ou via le pycnomètre à azote. La première technique consiste à saturer l'échantillon avec de l'eau et le peser pour obtenir la masse saturée m_{sat}, pour ensuite le sécher à 60 °C et le peser pour obtenir la masse sèche m_{sec}. La porosité est alors :

$$\phi = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{\rho_w V} \qquad (1.7)$$

Avec ρ_w la masse volumique de l'eau et V le volume de l'échantillon.

La deuxième méthode, la pycnométrie à azote, permet d'avoir la masse volumique de la matrice solide du matériau, notée $\rho_{squelette}$. Pour cela, on introduit un échantillon poreux sec de masse m_{sec} dans une cellule de volume V_{cel} connu. On injecte de l'azote dans la cellule contenant l'échantillon. En utilisant la loi de Boyle-Mariotte, on peut en déduire le volume occupé par l'azote dans la cellule, et donc, par soustraction, le volume occupé par la matrice solide de l'échantillon, nommé $V_{squelette}$. On a donc alors :

$$\rho_{squelette} = \frac{m_{sec}}{V_{cel} - V_{N_2}} = \frac{m_{sec}}{V_{squelette}} \qquad (1.8)$$

Plusieurs méthodes permettent de mesurer le volume de l'échantillon V, comme par exemple, le pied à coulisse ou la méthode de la poussée d'Archimède. La porosité est alors déduite de la relation **(1.6)** :

$$\phi = 1 - \frac{\rho_{sec}}{\rho_{squelette}} \qquad (1.9)$$

Pour la masse volumique apparente des béton biosourcés, nous avons procédé par simple pesée de la masse sèche d'un échantillon de géométrie cubique, dont le volume apparent a été mesuré par pesée hydrostatique. L'échantillon est d'abord recouvert avec de la paraffine pour sceller les pores, puis immergé dans un récipient gradué. Le pycnomètre à azote a été utilisé pour mesurer le volume du squelette, qui par la suite nous permet de déterminer la porosité totale des échantillons. La mesure de la porosité intergranulaire et intragranulaire sera détaillée dans le **Chapitre 3**.

D'autres techniques permettent de déterminer d'autres caractéristiques du milieu poreux, comme la distribution de la taille de pores, qui est mesurée par le biais de la porosimétrie par intrusion de mercure. Pour cette technique, on vide l'échantillon de tout gaz ou liquide en le chauffant ou en introduisant un gaz inerte (Espinal, 2012), puis on impose une augmentation progressive de la pression, ce qui permet au mercure de pénétrer dans les pores. En même temps, on mesure le volume de mercure qui s'introduit dans l'échantillon. La distribution de la taille des pores est déduite de cette mesure, puisque chaque rayon de pore pénétré correspond à une pression concrète. De cette manière, les pores de grande taille se remplissent à plus basse pression que les petits pores.

Quant à la mesure de la masse volumique apparente des granulats, la méthode est décrite par (Amziane et al., 2017) et consiste à peser l'agrégat et à mesurer le volume correspondant avec de l'eau. Il faut d'abord sécher l'agrégat pour obtenir la masse volumique sèche, puis le peser et le verser dans un seau ou moule cylindrique de façon à obtenir une surface supérieure horizontale, puis marquer le niveau à l'aide d'un disque en carton. Ensuite, le seau doit être vidé de l'agrégat et rempli à la place avec de l'eau jusqu'au niveau marqué. En mesurant la masse du seau rempli d'eau et vide, il est possible de remonter jusqu'au volume d'eau, que l'on utilise comme volume total. Avec la mesure de la masse, on obtient la masse volumique.

Valeurs dans la littérature

(Cérézo, 2005) étudie la chènevotte et détermine une porosité intragranulaire de 78 % et une porosité totale de 92 %. (Collet et al., 2008) rapportent une valeur de porosité totale de 76,5 % pour un mortier de chènevotte dont 70,6 % est ouverte.

Pour la moelle de tournesol, (Brouard, 2018) trouve une porosité ouverte de 98,87 % et (Niez, 2015), de 97,1 %, ce qui est une valeur extrêmement élevée et qui met en relief l'exceptionnalité de ce matériau. Pour la porosité intergranulaire et intragranulaire de la moelle, Niez trouve 28,8 % et 69,2 % respectivement (la porosité intragranulaire est exprimée en termes absolus). Face à l'absence d'études de composites à base de chaux et de moelle de tournesol, la porosité des composites de chaux et de d'écorce de tournesol a été déterminée par (Lagouin et al., 2019), qui ont trouvé une porosité ouverte de 68,6 %.

(Wei et al., 2019) étudient deux composites à base de tige broyée de maïs et ciment de Portland ou béton de phosphate de magnésium avec une porosité totale 65 et 61 % chacun.

Il s'agit donc de matériaux fortement poreux, caractéristique qui jouera un rôle fondamental dans leur comportement hygrothermique.

La masse volumique apparente dépend fortement de la façon dont la mesure est faite, puisque l'arrangement des particules peut changer facilement. Pour la chènevotte, (Delhomme et al., 2020) trouve des masses volumiques sèches entre 97 et 118,8 kg/m^3 pour plusieurs types d'agrégat. De son côté, (Tronet, 2013) trouve une masse volumique apparente de 112 kg/m^3, une masse volumique du grain de 256 kg/m^3 et une masse de squelette de 1448 kg/m^3 pour la chènevotte. (Del Valle-Zermeño et al., 2016) trouvent une masse volumique apparente de 600 kg/m^3 pour un béton de chènevotte et ciment de magnésium de phosphate, lorsque (E. Gourlay et al., 2011) trouvent des valeurs entre 386 et 447 kg/m^3.

En ce qui concerne la moelle de tournesol, (Brouard, 2018) trouve 15,9 kg/m^3 pour la masse volumique apparente, lorsque (Magniont et al., 2012) obtiennent une valeur de 20 kg/m^3 et (Niez, 2015), 18,99 kg/m^3 et 26,7 kg/m^3 pour la masse volumique du grain. Ces valeurs donnent une idée d'à quel point la moelle de tournesol est légère, environ 6 fois plus que la chènevotte. Cependant, la tige de tournesol avec écorce et moelle présente des valeurs de masse volumique du grain beaucoup plus proches de celles de la chènevotte, comme par exemple, 241 kg/m^3 pour un agrégat contenant peu de moelle et 215,1 kg/m^3 pour un autre avec plus de moelle. Pour le béton de tige de tournesol, (Niez, 2015) rapporte une masse volumique sèche autour de 450 kg/m^3, ce qui est assez proche du béton de chènevotte, la masse volumique des bétons étant principalement influencée par le liant. (Medic et al., 2012) mesurent la masse volumique apparente de la moelle de maïs et obtiennent 40 kg/m^3, lorsque la tige broyée de grande taille (celle qui contient un plus grand ratio moelle-écorce) présente une masse volumique apparente de 84,5 kg/m^3 selon (Ahmad & Chen, 2020). Pour le béton fabriqué à partir de ciment de Portland et de ce même agrégat, la masse volumique sèche est de 546,13 kg/m^3.

1.1.2. Propriétés mécaniques

Dans ce sous-chapitre, les propriétés mécaniques des bétons biosourcés, ainsi que leurs méthodes de caractérisation, seront présentées. Les propriétés qui seront abordées seront la résistance à la compression et le module de rigidité ou module global de déformation, du fait de leur importance pour déterminer si le béton est un matériau approprié pour la construction et, dans le cas affirmatif, pour quels types d'éléments du bâtiment.

1.1.2.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression (Rc) est la propriété mécanique la plus étudiée dans les matériaux de construction. Les bétons végétaux sont par nature moins résistants que le béton ordinaire (Gross & Walker, 2014; Hanley & Pavía, 2008; T. T. Nguyen, 2010; R. Walker et al., 2014). C'est pour cela que l'étude de ces matériaux a généralement un objectif : l'amélioration de la résistance du béton. Cette propriété est définie comme la contrainte maximale que le matériau peut supporter en compression simple et elle est exprimée en MPa.

Méthodes

Les Règles Professionnelles de Construction en Chanvre (Association construire en chanvre & Fédération Française du Bâtiment, 2009) décrivent la méthode pour mesurer la résistance à la compression du béton de chanvre. Elle s'appuie sur la norme EN 12390-4 et elle consiste à charger les éprouvettes, sans choc, jusqu'à rupture à l'aide d'une presse mécanique de 50 kN à déplacement contrôlé à une vitesse de 5 mm/min. La valeur de Rc retenue sera la charge maximale atteinte. Les éprouvettes cylindriques doivent avoir des dimensions 16x32 cm et elles doivent être conservées à 20 °C et 50 %HR.

Dans le cadre de ce projet de thèse, ce protocole a été appliqué pour la mesure de la résistance à la compression à l'aide d'une presse INSTRON.

Valeurs dans la littérature

Les bétons biosourcés ont un comportement en compression très caractéristique, issu de la contribution entre liant et agrégat. En effet, le mélange entre le liant, une matrice rigide à résistance mécanique moyenne (d'environ 5-8 MPa à 28 jours (Cannabric, 2011)), et les agrégats, des particules à faible résistance mais très élastiques, donne lieu à un matériau de construction qui se différencie des autres grâce à son comportement élastoplastique non fragile (Amziane & Sonebi, 2016). Enfin, le béton de chanvre ne peut être à ce jour un élément porteur puisqu'il présente une résistance à la compression d'à peine 0,2-1,3 MPa (Cérézo, 2005), mais sa capacité de déformation élastique est intéressante, principalement en tant qu'isolant de remplissage et dans des applications sismiques. Pour optimiser les propriétés de ce matériau, il est important d'avoir une homogénéité dans la structure, donc une attention spéciale doit être accordée au mélange lors du processus de fabrication.

Ce comportement élastoplastique peut être apprécié dans la **Figure 1.6**, où l'on observe une première pente caractérisée par le comportement élastique des agrégats, suivie par un régime plastique. La résistance à la compression peut être mesurée comme le maximum de la courbe, la contrainte maximale.

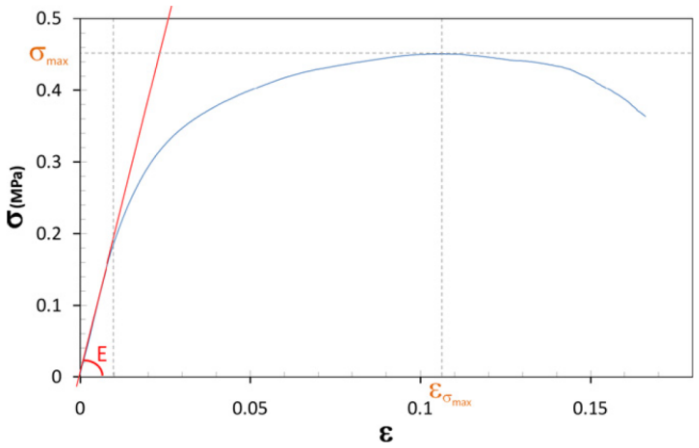


Figure 1.6 - Courbe contrainte – déformation en compression typique du béton de chanvre (Arnaud & Gourlay, 2012).

Cependant, (Arnaud & Gourlay, 2012) expliquent que pour certaines formulations, on voit apparaître un plateau plastique après le pic qui peut être lié à une prise partielle du liant et qui est caractéristique des formulations à faible dosage de liant. Dans ces cas, (Elfordy et al., 2008) considèrent que la résistance à la compression se situe dans la limite entre le comportement élastique et inélastique (**Figure 1.7**) car, au-delà de ce point, le matériau ne se fracture pas mais l'effort de compression ne fait qu'augmenter car le matériau a été compacté de forme irréversible.

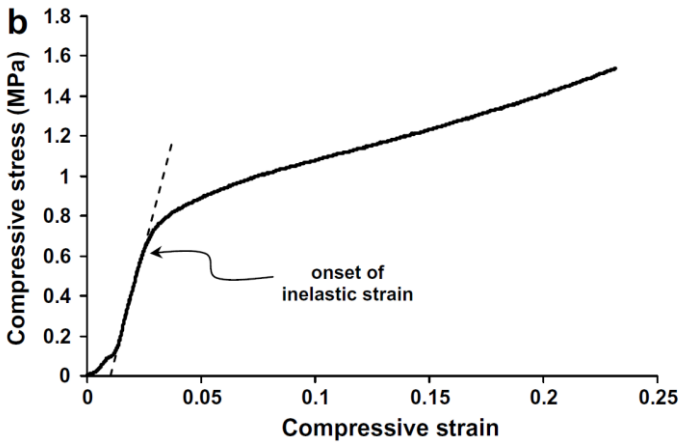


Figure 1.7 - Courbe contrainte – déformation en compression alternative pour le béton de chanvre (Elfordy et al., 2008).

Par conséquent, la formulation du béton a également un impact sur la résistance à la compression. Quand la proportion de liant est très basse, le composite acquiert des caractéristiques proches de celles des particules, c'est-à-dire, une faible résistance mécanique mais un comportement très élastique (T. T. Nguyen, 2010). Au fur à mesure que l'on augmente la proportion de liant, le composite contient plus d'hydrates qui forment un réseau qui augmente la résistance mécanique de la matrice. A faible contrainte, un comportement élastique peut être observé pour les dosages intermédiaires, puis la matrice commence à se fissurer, ensuite ce sont les particules qui reprennent la

contrainte en s'écrasant. Ce comportement ductile après rupture à cause de la présence d'agrégats a également été trouvé par (Nozahic et al., 2012). Finalement, dans les composites à forte concentration de liant, l'effet des particules est quasi-invisible et le comportement est très proche de celui du liant. De plus, (Arnaud & Gourlay, 2012) déterminent que le dosage du liant a un impact très marqué sur la prise et durcissement du composite. Cette variété de comportements mécaniques présente l'avantage de pouvoir adapter la formulation selon l'application. Par exemple, les formulations à faible dosage de liant seront intéressantes pour fabriquer des isolants thermiques et acoustiques (Amziane & Sonebi, 2016).

Logiquement, la nature du liant joue également un rôle important dans la résistance mécanique. (P. Y. Bütschi et al., 2003) étudient un composite dont le liant est à fait base de chaux, de ciment et deux autres ajouts dont la pouzzolane et atteignent une résistance de 2 MPa à 7 semaines pour une déformation de 3,5 %. Evidemment, le plus on rajoute de ciment, le plus on se rapproche des matériaux classiques, l'enjeu étant de trouver l'équilibre entre la teneur mécanique et l'impact environnemental, ainsi que le coût, qui devient plus élevé avec des plus grands dosages en liant. De plus, selon (Cérézo, 2005), le ciment n'est pas compatible avec le chanvre malgré ses bonnes caractéristiques mécaniques. La raison est, probablement, que le granulat absorbe l'eau dont le ciment a besoin pour réaliser sa prise. Cette difficulté a été contournée par (P. De Bruijn, 2008) en humidifiant des échantillons dont le liant est du ciment pur.

De façon générale, la chaux, qu'elle soit aérienne ou hydraulique, a une résistance à la compression bien plus faible que celle du ciment. Cependant, l'ajout d'adjuvants et d'autres composants aide à améliorer la résistance à la compression, ainsi qu'à accélérer la prise notamment de la chaux aérienne, qui a une prise lente due à la carbonatation naturelle (Niyigena, 2016). D'après (P. De Bruijn, 2008) la variation du contenu de chaux hydraulique de 50 % à 75 % n'a pas d'impact sur la résistance mécanique. Cependant, le contenu de ciment a un impact : en passant de 29 à 50 %, Bruijn arrive à doubler la résistance mécanique.

Des nombreux auteurs ont constaté que la résistance à la compression du béton évolue sensiblement avec le temps, de façon spécialement marquée dans les deux premiers mois, raison pour laquelle il est important de l'étudier à plusieurs instants. (R. Walker et al., 2014) étudient le comportement en compression de plusieurs bétons à base de chanvre et de différents liants à base de chaux au cours de la première année après leur fabrication. Malgré le fait que la valeur finale de résistance soit très proche pour les six bétons, entre 0,29 et 0,39 MPa, le développement de cette dernière au cours du temps est très disparate. Lorsque certains bétons ont une augmentation stable qui devient presqu'asymptotique au bout des 365 jours, d'autres subissent des pertes de résistance à la compression dues à des changements de la morphologie des hydrates.

(Arnaud & Gourlay, 2012) étudient l'évolution de la résistance à la compression entre 21 jours et 24 mois avec un liant composé principalement de chaux aérienne, mais qui contenait aussi de la chaux hydraulique et pouzzolanique. Au début, le béton se présente très ductile, avec une déformation permanente et un comportement semblable à celui des particules. Avec le temps, le réseau d'hydrates se forme et le comportement est plutôt conditionné par le liant, avec un comportement de moins en moins ductile et une résistance à la compression en hausse (elle passe de 0,35 MPa à 21 jours à 0,85 MPa à 24 mois, comme il peut être observé dans la **Figure 1.8**).

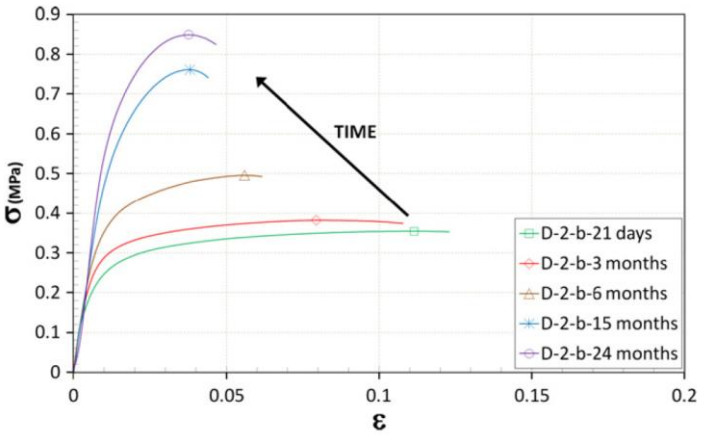


Figure 1.8 - Résultats de résistance à la compression de (Arnaud & Gourlay, 2012).

(T. T. Nguyen, 2010) compare le comportement du béton de chanvre à 21, 28, 90 et 180 jours et trouve que, en général, le comportement mécanique varie très peu au-delà de 28 jours sauf pour les bétons avec un dosage important de liant. Dans ce cas-là, la résistance à la compression augmente principalement entre 90 et 180 jours. (Del Valle-Zermeño et al., 2016) étudient la Rc du béton de chanvre contenant du phosphate de magnésium avec des proportions différentes de chanvre à 1, 7 et 28 jours de leur fabrication. Dans tous les cas, ils trouvent une augmentation de la résistance avec le temps et avec le dosage en liant. Selon (T. T. Nguyen, 2010; Samri, 2008), un processus de prise et durcissement rapide entrainerait l'amélioration de la résistance des bétons biosourcés, dont la prise est particulièrement lente à jeune âge (Chamoin, 2013).

Enfin, certaines techniques de mise en œuvre donnent lieu à des résistances à la compression plus élevées. En effet, le compactage provoque une orientation des fibres orthogonale à la direction de compactage (Nozahic et al., 2012). Ils trouvent qu'en passant d'un compactage à 2 MPa à un compactage à 5 MPa, le matériau double sa résistance à la compression à 14 jours, lorsque la masse volumique augmente seulement de 7,2 %. D'autres auteurs (Pierre Yves Bütschi et al., 2004; Cérézo, 2005; T.-T. Nguyen et al., 2009) trouvent aussi cette amélioration de la résistance à la compression. (T.-T. Nguyen et al., 2009) obtiennent une Rc de 3 MPa avec un compactage de 0,6-1 MPa pour un composite chaux-chanvre avec une majorité de chaux aérienne. Le compactage provoque aussi une anisotropie qui octroie au matériau un comportement différent en

fonction de la direction. (Youssef et al., 2015) étudient des blocs compactés et trouvent que le matériau est très ductile, observant une rupture en « accordéon » en compression en direction perpendiculaire à la direction de compactage.

En revanche, les bétons projetés présentent généralement une plus faible résistance mécanique (Elfordy et al., 2008), d'autant plus que la résistance à la compression augmente avec la densité et que celle-ci dépend de la distance de projection, qui n'est généralement pas contrôlée. Il obtient des valeurs proches de 0,2-0,4 MPa pour des masses volumiques autour de 350 kg/m^3, lorsque la valeur s'élève à 0,8 MPa pour le double de masse volumique. (Arnaud & Gourlay, 2012) ont déterminé que les conditions d'humidité ont aussi un impact sur la résistance de certains bétons. Une humidité relative trop basse ou trop élevée lors de la prise nuit aux propriétés mécaniques des liant hydrauliques, la résistance à la compression pouvant se réduire jusqu'à la moitié, lorsque la chaux aérienne est uniquement perturbée par une humidité relative trop grande. Cela est probablement dû à un retardement de la prise car l'air ne peut pas pénétrer dans les pores en présence d'une humidité élevée.

En ce qui concerne le béton de tournesol, (Magniont et al., 2012) détermine une résistance à la compression entre 1,1 et 5,5 MPa pour des composites à base de moelle et d'un liant avec chaux hydraulique et métakaolin calciné, mais avec un dosage en moelle qui ne dépasse pas 4 % de la masse totale. La pâte de liant seule présente une résistance d'environ 10,2 MPa. (Helepciuc (Gradinaru) et al., 2018) se focalise sur le béton à base de tiges broyées et ciment. Ils substituent la moitié des agrégats minéraux du béton (en volume) par trois types différents d'agrégats de tournesol : un granulat sans traitement (CUSF), un deuxième granulat traité pour limiter l'absorption d'eau de 50 % (CTSF50) et un troisième pour réduire l'absorption de 75 % (CTSF75). Ils comparent ces trois formulations à un béton classique (RC). La résistance à la compression du CTSF75 est la plus élevée des trois bétons végétaux, avec 13,61 MPa, qui ne se rapprochent pourtant pas des 42,18 MPa du RC. Le CUSF et le CTSF50 présentent des valeurs très proches entre elles, 5,52 et 5,35 MPa respectivement.

Pour le béton de tiges broyées de maïs, (Wei et al., 2019) déterminent une résistance à la compression à 28 jours de 1,50 MPa pour un béton à base de ciment de Portland et de 3,83 MPa pour un autre béton à base de ciment de phosphate de magnésium.

Ces résultats semblent indiquer, d'un côté, que les bétons de maïs et de tournesol subissent aussi des interactions entre granulat et liant qui gênent la prise du liant par manque d'hydratation et que cela a un impact négatif sur la résistance à la compression et, d'un autre côté, que le type de liant joue un rôle important sur la Rc.

1.1.2.2. Module global de déformation

Une autre propriété mécanique importante est le module global de déformation (E), qui représente la relation entre la déformation globale du matériau et la contrainte

appliquée lorsque le matériau a un comportement élastique. Bien entendu, il est important d'étudier cette propriété pour s'assurer que le matériau ne se déforme pas au-delà des limites qui garantissent la sécurité des occupants du bâtiment.

Méthodes

Le module global de déformation est mesuré grâce au même essai de compression décrit précédemment. Il est déterminé comme la pente de la partie linéaire initiale de la courbe contrainte – déformation et il diffère du module d'Young dans le fait que, pour le module global de déformation, on prend en compte la déformation globale de l'échantillon et non pas la locale. Cette méthode a été préalablement validée en comparant les résultats obtenus par ce biais à ceux obtenus via la procédure préconisée dans les Règles Professionnelles.

Valeurs dans la littérature

Tout comme la résistance à la compression, le module global de déformation est influencé par la formulation du matériau. Pour des faibles dosages en liant, (Amziane & Sonebi, 2016) constatent un module en dessous de 5 MPa. (Le et al., 2014) étudient la relation entre le module global de déformation et la proportion entre agrégat et liant pour un composite à base de chanvre et amidon, et trouvent que le module diminue presque linéairement avec le ratio.

La nature du liant a également une influence considérable sur le module global de déformation. D'après (P. B. De Bruijn et al., 2009), les formulations avec une grande proportion de ciment présentent des valeurs du module de déformation plus élevées. (T. T. Nguyen, 2010) trouve des valeurs à 28 jours autour de 120 MPa pour des bétons à base de PF70 et de chaux hydraulique NHL3,5Z, mais cette valeur diminue jusqu'à 90 MPa pour du ciment CPA CEM I et encore plus pour la chaux hydraulique NHL2, qui présente un module de déformation autour de 45 MPa. Nguyen explique que le comportement inattendu du module du béton en ciment est probablement dû à une mauvaise hydratation. (Collet et al., 2015) trouve des valeurs beaucoup moins élevées et très proches entre elles, entre 30 et 42 MPa, pour des bétons avec trois liants différents : PF70, ciment naturel et PLA.

De plus, le module de déformation évolue avec le temps, tout comme la Rc. (Cérézo, 2005) montre l'évolution de plusieurs bétons de chanvre sur 24 mois, au cours desquels le module augmente principalement les deux premiers mois. Au bout de deux mois, l'augmentation continue mais de façon de plus en plus lente (**Figure 1.9**).

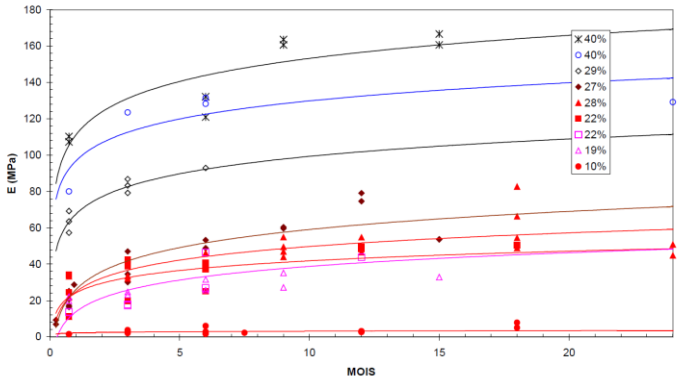


Figure 1.9 - Evolution du module de déformation avec le temps pour différentes concentrations volumiques en liant (Cérézo, 2005).

Selon (Niyigena, 2016) le module de déformation augmente avec la compression pour le béton de chanvre, ce qui n'est toutefois pas vrai pour les composites de tournesol-argile étudiés par (Brouard et al., 2018). Plus concrètement, ils trouvent un module de déformation d'environ 3,5 MPa pour le composite de moelle-argile avec une masse volumique de 235 kg/m^3. Pour les composites de tige broyée de tournesol, (Chabannes et al., 2015) développent un premier matériau avec un liant hydraulique à prise rapide et un deuxième à base de chaux aérienne, chaux hydraulique et pouzzolanne. Ils mesurent un module de déformation de 10,27 MPa pour le premier et de 7,37 pour le deuxième.

1.1.3. Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des bétons biosourcés d'intérêt seront détaillées dans ce sous-chapitre. L'importance de la performance énergétique des bâtiments et son rôle dans la transition énergétique ont déjà été mis en avant, ainsi que le potentiel des produits biosourcés en tant qu'isolants thermiques.

1.1.3.1. Conductivité thermique

Dans les matériaux de construction, la conductivité thermique (λ) est définie comme la quantité d'énergie qui traverse un mur d'un mètre d'épaisseur et d'un mètre carré de surface avec un gradient de température d'un degré Celsius entre les deux faces du mur. C'est un indicateur de la capacité du matériau à laisser passer la chaleur à son travers par conduction. Son unité est [W/(m·K)].

Dans le cadre de cette thèse, la conductivité thermique est une propriété d'une importance spéciale car elle définit si un matériau est isolant ou pas. En construction, le paramètre utilisé pour évaluer la performance d'isolation est la résistance thermique, calculée comme l'épaisseur du mur sur la conductivité thermique.

Méthodes

Il existe divers procédés expérimentaux permettant de définir la conductivité thermique dans les matériaux. Pour les biosourcés, les méthodes à prioriser seront principalement la méthode du fil chaud, la méthode de la plaque chaude, la méthode du ruban chaud et la méthode tri-couche. Certaines caractérisent le comportement en régime stationnaire, d'autres décrivent la réponse en régime transitoire ou quasi-stationnaire.

La méthode du fil chaud décrit le régime transitoire ou quasi-stationnaire et elle mesure la distribution radiale du flux de chaleur autour d'un fil chaud. La sonde est placée entre deux échantillons cylindriques d'épaisseur identique et cette dernière produit une légère perturbation thermique dont l'impact est évalué par la même sonde, qui comprend un thermocouple. Il s'agit d'une méthode simple, rapide et applicable à des solides et des liquides. La méthode de la plaque chaude est très semblable, avec la différence que, comme le nom l'indique, c'est une plaque (bidimensionnelle) et non pas un fil (unidimensionnel) qui est placé entre les deux échantillons. Elle sert à caractériser la réponse en régime quasi-stationnaire ou permanent. Le flux de chaleur est supposé uniforme sur la totalité de la surface de la plaque chaude.

La méthode du ruban chaud est intermédiaire entre le fil et la plaque chaude. Le ruban peut être considéré comme un plan avec une dimension notablement plus petite que l'autre. Il combine le flux unidirectionnel de la plaque chaude avec le flux radial du fil chaud. Finalement, la méthode tri-couche mesure la réponse en régime périodique et elle consiste en la mesure de la température moyenne de deux plaques de laiton entre lesquelles l'échantillon est coincé. L'élément chauffant est une plaque placée en dessous de la plaque de laiton inférieure. L'inconvénient de cette technique est la complexité du traitement de résultats, mais elle est très rapide et elle permet de caractériser des échantillons de taille réduite.

Dans le cadre de ce projet, la méthode du fil chaud a été privilégiée, du fait de sa capacité à mesurer la conductivité des échantillons humides. Dans le cas de la plaque chaude, les phénomènes de changement de phase ne sont pas pris en compte car il s'agit d'une mesure en régime permanent et les phénomènes de changement de phase ont déjà eu lieu. En théorie, cela serait positif pour la mesure de la conductivité d'un solide humide. Cependant, ce n'est souvent pas le cas car, lorsqu'on fait un essai à la plaque chaude, il y a un phénomène de migration d'humidité au sein du matériau. Comme la mesure dure longtemps, les pressions de vapeur s'équilibrent mais, étant donné qu'il y a un gradient de température, cela provoque de la condensation du côté froid et l'absence de condensation du côté chaud. Cette hétérogénéité de teneur en eau provoque que la mesure de conductivité à une teneur en eau donnée ne soit pas correcte.

D'un autre côte, dans la méthode du fil chaud, qui est une mesure relativement rapide et relativement locale, ces transferts d'humidité n'ont pas le temps d'avoir lieu. Par conséquent, la mesure sera plus homogène en teneur en eau et plus juste. De plus, la

méthode du fil chaud est nettement plus rapide que le plan chaud (3 minutes et 10 jours, respectivement), ce qui constitue une autre raison d'avoir choisi cette méthode.

Valeurs dans la littérature

Le béton de chanvre est un matériau avec un grand potentiel en tant qu'isolant thermique, puisque sa grande porosité lui confère une basse conductivité thermique (λ), proche de celle des isolants commerciaux. Elle a été étudiée par des nombreux auteurs, dont les résultats sont plutôt cohérents. (Dhakal et al., 2017) constatent des conductivités entre 0,074 et 0,103 W/(m·K). (R. Walker et al., 2014) ont trouvé des valeurs de conductivité thermique oscillant entre 0,117 et 0,138 W/(m·K) pour des bétons de chanvre de masses volumiques comprises entre 510 et 630 kg/m^3. La même plage de valeurs a été mesurée par (P. De Bruijn & Johansson, 2013; Dinh et al., 2015; Arnaud Evrard, 2008) pour des bétons de chanvre à base de chaux et de métakaolin. (Collet et al., 2015) trouvent des valeurs de conductivité thermique entre 0,085 W/(m·K) pour une masse volumique de 260 kg/m^3 et 0,156 W/(m·K) à 460 kg/ m^3, lorsque (Benfratello et al., 2013) trouvent des conductivités entre 0,0899 et 0,1408 W/(m·K) pour des masses volumiques comprises entre 369 et 611 kg/m^3. Pour la chènevotte en vrac non tassée, (Magniont, 2010) mesure une conductivité thermique de 0,0545 W/(m·K).

La dépendance linéaire entre conductivité thermique et masse volumique est un phénomène reconnu par de nombreux travaux, un paramètre qui est étroitement lié à la proportion de granulat et donc à la formulation du matériau. En effet, pour une plus grande masse volumique, la conductivité du matériau augmente, condition qui a été constatée par (Collet et al., 2015; Dartois et al., 2017; S. T. Nguyen et al., 2016) et (Benfratello et al., 2013) entre autres. Mais la conductivité thermique est également influencée par un autre paramètre : la teneur en eau. Plusieurs auteurs (Collet & Pretot, 2014; P. De Bruijn & Johansson, 2013) ont observé une augmentation de la conductivité thermique avec l'humidité relative ou la teneur en eau. D'après (Arnaud Evrard, 2006) et (Cérézo, 2005), cette relation pourrait ne pas être linéaire. D'autres travaux ont établi la dépendance entre λ et la température, qui a également une influence sur la teneur en eau du matériau (Anh D. Tran Le et al., 2020).

L'orientation des fibres issue du compactage des bétons semble avoir également un impact sur la conductivité (S. T. Nguyen et al., 2016). L'anisotropie de la structure poreuse engendre des écarts de conductivité thermique entre la direction parallèle au compactage et la direction perpendiculaire (Dinh et al., 2015; Picandet et al., 2011). Selon (Sáez-Pérez et al., 2020), le choix du liant n'aurait pas un impact significatif.

(Magniont, 2010) constate une conductivité thermique de 0,0509 W/(m·K) pour la moelle de tournesol en vrac, valeur très proche de celle de 0,050 W/(m·K) trouvée par (Chabannes et al., 2015) et assez proche de celles des matériaux d'isolation synthétiques comme le polystyrène expansé ou la laine de verre, qui varient généralement entre 0,030 W/(m·K) et 0,040 W/(m·K). Ils mesurent également la conductivité d'un béton

contenant des tiges broyées de tournesol et obtiennent 0,413 W/(m·K), une valeur bien plus élevée. (Magniont et al., 2012) trouve des valeurs de conductivité entre 0,115 et 0,25 W/(m·K) pour des bétons avec 1 à 4 % de moelle de tournesol. La pâte de liant seule présente une conductivité de 0,31 W/(m·K), donc l'impact positif de la moelle est très évident.

De nombreux paramètres ont un impact sur la conductivité thermique des bétons biosourcés, tels que la teneur en eau, la masse volumique et la formulation. Il a été souligné auparavant que la masse volumique a la plus grande influence car un volume d'air plus important dans le matériau entraîne une faible conductivité thermique (Ahmad et al., 2018; Collet & Pretot, 2014; R. Walker et al., 2014).

1.1.3.2. Effusivité thermique

L'effusivité thermique (e) est la propriété d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle est définie à partir de la conductivité thermique (λ), de la masse volumique (ρ) et de la chaleur spécifique (C_p) du matériau, selon **(1.10)** :

$$e = \sqrt{\lambda \rho C_p} \qquad (1.10)$$

Avec e exprimé en W·s$^{1/2}$/(K·m^2), λ exprimé en W/(m·K), ρ en kg/m^3 et C_p en J/(kg·K).

Méthodes

La méthode du plan chaud expliquée dans **§1.1.3.1** permet également de mesurer l'effusivité thermique.

Valeurs dans la littérature

(Chabannes et al., 2015) déterminent une effusivité thermique de 58 W·s$^{1/2}$/(K·m^2) pour la chènevotte et de 51,7 W·s$^{1/2}$/(K·m^2) pour la tige broyée de tournesol, deux valeurs très proches. Pour les bétons, ils trouvent des valeurs plus disparates : 270 W·s$^{1/2}$/(K·m^2) pour un formulation chaux-chanvre et 133 W·s$^{1/2}$/(K·m^2) pour le béton de tiges de tournesol. Pour les particules seules, (Niez, 2015) trouve une effusivité thermique de 82,5 W·s$^{1/2}$/(K·m^2) pour la tige broyée de tournesol et 58,5 W·s$^{1/2}$/(K·m^2) pour la moelle.

1.1.3.3. Chaleur spécifique

Par définition la chaleur spécifique (C_p [J/(kg·K)]) à pression constante, aussi appelée capacité thermique massique, est la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température d'un kilogramme de matériau d'un degré. Elle exprime la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur, rapportée à la masse de celui-ci. Elle joue un rôle déterminant dans l'inertie thermique du matériau. La capacité thermique volumique [J/(m^3·K)] désigne le même concept de capacité de stockage de chaleur, mais rapporté au volume, et est calculée comme le produit de C_p par la masse volumique du matériau ρ.

Méthodes

Elle peut être déduite de la conductivité et l'effusivité thermiques à travers **(1.10)**, mais elle peut aussi être déterminée directement, typiquement avec un calorimètre. En général, le calorimètre utilisé est un calorimètre différentiel à balayage ou DSC (Differential Scanning Calorimetry), un appareil à l'intérieur duquel on place l'échantillon et qui augmente linéairement de température pour mesurer la réponse de l'échantillon.

Valeurs dans la littérature

(Rosanne Walker & Pavía, 2015) trouvent une chaleur spécifique de 1068 J/(kg·K) pour une formulation chaux-chanvre et 863,9 J/(kg·K) pour la pâte de liant seule. Le stockage de chaleur se voit donc incrémenté par la présence du chanvre. (Haik et al., 2020) mesurent 1394 J/(kg·K) pour un autre béton chaux-chanvre. Des valeurs de masse volumique, conductivité et effusivité déterminés par (Chabannes et al., 2015), il est possible de déterminer une chaleur spécifique de 578 J/(kg·K) pour la tige de tournesol broyée et d'environ 391 J/(kg·K) pour le béton dérivé. De plus, la chaleur spécifique volumétrique du béton de tige de maïs varie avec la température selon (Wei et al., 2019), que ce soit à l'état sec ou à l'état humide.

1.1.4. Propriétés hygroscopiques

1.1.4.1. Notions théoriques

Le caractère hygroscopique des matériaux est défini comme l'affinité particulière avec les phénomènes de transferts massiques. Les matériaux ayant un caractère hygroscopique ont une grande capacité d'adsorption, de désorption et une condensation capillaire importante. Ces caractéristiques sont dues à la spécificité de la matrice poreuse.

De façon générale, les bétons biosourcés sont considérés comme des matériaux avec un grand potentiel hygroscopique (Gross & Walker, 2014; Magniont, 2010), ayant la capacité d'exercer en tant que régulateur passif d'humidité grâce à leur caractère perméant. Un matériau est dénommé « perméant » quand il est capable de laisser passer la vapeur à travers lui.

De plus, en raison de la chaleur latente des processus d'adsorption et de désorption, ces matériaux pourraient également être utilisés comme système passif de régulation de la température (P. De Bruijn & Johansson, 2013; Medjelekh et al., 2016), même si l'impact réel de cet effet sur la consommation d'énergie des bâtiments doit encore être mieux évalué.

Variables et paramètres caractéristiques

Il est donc intéressant de savoir quantifier et modéliser le comportement hygroscopique des matériaux de construction pour en définir les apports pour le bâtiment. A cet effet, plusieurs variables et paramètres sont fréquemment utilisés (Trabelsi, 2010).

Les variables pour décrire l'état hydrique du milieu sont :

- La teneur en eau massique ou volumique : elle représente le rapport entre la masse (ou le volume) d'eau liquide et la masse de la matrice solide (ou le volume total).

  La teneur en eau massique : $u = \frac{m_w}{m_{sec}}$ (ou $w = \rho_{sec} \frac{m_w}{m_{sec}} = \rho_{sec}\, u$)

  La teneur en eau volumique : $\theta = \frac{V_w}{V}$

  Avec m_w et V_w la masse et le volume du liquide, respectivement, m_{sec} la masse de l'échantillon à l'état sec et V le volume total. Pour rappel, le rapport entre la teneur en eau volumique et la teneur en eau massique est de la forme $\theta = \left(\frac{\rho_{app}}{\rho_w}\right) u$ avec ρ_{app} la masse volumique apparente et ρ_w la masse volumique de l'eau à 23°C ≈ 997 kg/m^3.
- L'humidité relative : elle correspond au rapport entre la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante à la même température.

$$HR = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \qquad (1.11)$$

D'un autre côté, les paramètres hygroscopiques qui caractérisent un matériau sont :

- La capacité de stockage d'humidité ξ, qui est déduite des isothermes de sorption et qui aide à la caractérisation du stockage d'humidité.
- La perméabilité à la vapeur d'eau δ_p est un paramètre caractéristique des processus de diffusion. Il aide donc à la caractérisation des transferts de masse.

Enfin, la valeur tampon hydrique ou MBV (Moisture Buffering Value) n'est pas un paramètre au sens propre mais un résultat de test performanciel et elle représente l'aptitude d'un matériau à absorber ou à libérer l'humidité.

1.1.4.2. Isothermes de sorption

La capacité de stockage d'humidité peut être explicitée à l'aide des courbes de sorption du matériau à température constante, qui représentent la variation de la teneur en eau du matériau en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant (cf. **Figure 1.11**). Les courbes de sorption sont caractérisées par :

- Une phase d'adsorption lorsque le matériau est sujet à une augmentation progressive de l'humidité relative de l'air environnant.

  L'adsorption, à ne pas confondre avec l'absorption (voir **Figure 1.10**), permet la description des interactions qui existent entre la surface d'un solide (adsorbant) et les molécules en phase gazeuse ou liquide (adsorbat ou adsorbable). C'est un phénomène par lequel les molécules d'une phase fluide sont fixées par la surface d'un solide (Ferroukhi, 2015) : une accumulation de substance entre deux phases. L'adsorption est dite physique si les molécules de fluide sont retenues à la surface du solide par des forces de type Van der Waals, ou chimique si le fluide est retenu par des forces analogues à celles qui interviennent lors d'une réaction chimique

(Raoof, 1998). La quantité de gaz retenue à la surface d'un adsorbant dépend entre autres de l'étendue de l'interface adsorbant-adsorbat, de la pression du gaz et de la température (Aghahadi, 2019).

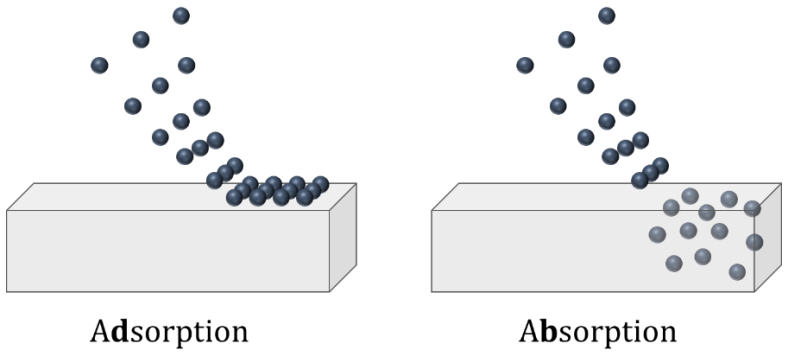


Figure 1.10 - Représentation comparative des phénomènes d'adsorption et d'absorption.

- Une phase de désorption lorsque le matériau est sujet à une diminution progressive de l'humidité relative de l'air dans lequel il est stocké.

  Ainsi à l'inverse de l'adsorption, la désorption est la libération des gaz ou vapeurs retenus par adsorption à la surface d'un solide.
- Un phénomène d'hystérésis

  Les phénomènes de sorption (adsorption et désorption) peuvent présenter un certain degré d'irréversibilité. En effet, lorsque l'adsorption physique est un processus réversible, l'adsorption chimique est irréversible. Le phénomène d'hystérésis correspond à la différence entre la teneur en eau pour une même valeur d'humidité relative entre l'adsorption et la désorption (Ferroukhi, 2015), sachant que la courbe de désorption est toujours supérieure à la courbe d'adsorption.

Ces phénomènes, étudiés par de nombreux auteurs (Barsotti et al., 2020; T. Colinart et al., 2016; Collet et al., 2008, 2013; A Evrard & Herde, 2005; Shea et al., 2012), sont représentés par des courbes associées (**Figure 1.11**) qui traduisent l'évolution de la teneur en eau d'un matériau en fonction de la valeur de l'humidité relative de l'air en équilibre à une température constante. A partir des courbes de sorption, il est possible de définir le coefficient ξ [kg/m^3] correspondant à la capacité de stockage d'humidité. Ce coefficient est calculé à partir de la pente de la courbe d'adsorption ou de désorption et peut être ainsi écrit tel que dans **(1.12)**, avec w la teneur en humidité exprimée en kg/m^3 :

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial HR} \qquad (1.12)$$

Différentes théories existent pour définir les équations des courbes de sorption. Parmi elles, il peut notamment être cité la théorie de Langmuir (1918), qui est la première théorie cohérente selon (Trabelsi, 2010) pour l'adsorption monocouche ; mais aussi la

théorie Brunauer-Emmett-Teller (BET) (Stephen Brunauer et al., 1938), servant au calcul de la surface spécifique ; la théorie Guggenheim-Andersen-de Boer (GAB) (Anderson, 1946; Van den Berg, 1984), une amélioration de la théorie BET ; ou encore la théorie Park (1986) qui est basée sur trois différents mécanismes physiques de sorption interprétant la forme d'une courbe d'isotherme de sorption (Aghahadi, 2019; Rebaia Remache, 2011).

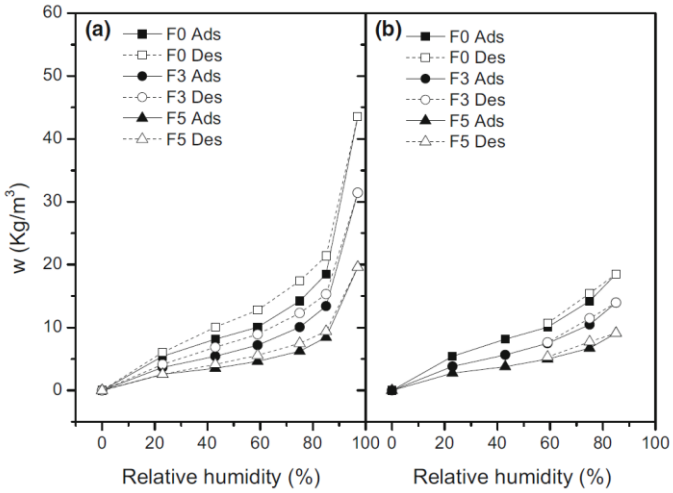


Figure 1.11 - Isothermes de sorption jusqu'à 97 %HR (a) et jusqu'à 85 %HR (b) (McGregor et al., 2017).

En ce qui concerne les articles qui étudient la capacité de stockage d'humidité ξ pour les matériaux biosourcés, (Belayachi et al., 2015) comparent les matériaux à base de paille, le bois, le blé, l'orge.

Classification des courbes

Selon le mode de fixation de l'eau à l'échelle microstructurales, les isothermes d'adsorption et de désorption d'eau présentent trois zones distinctes (Ferroukhi, 2015).

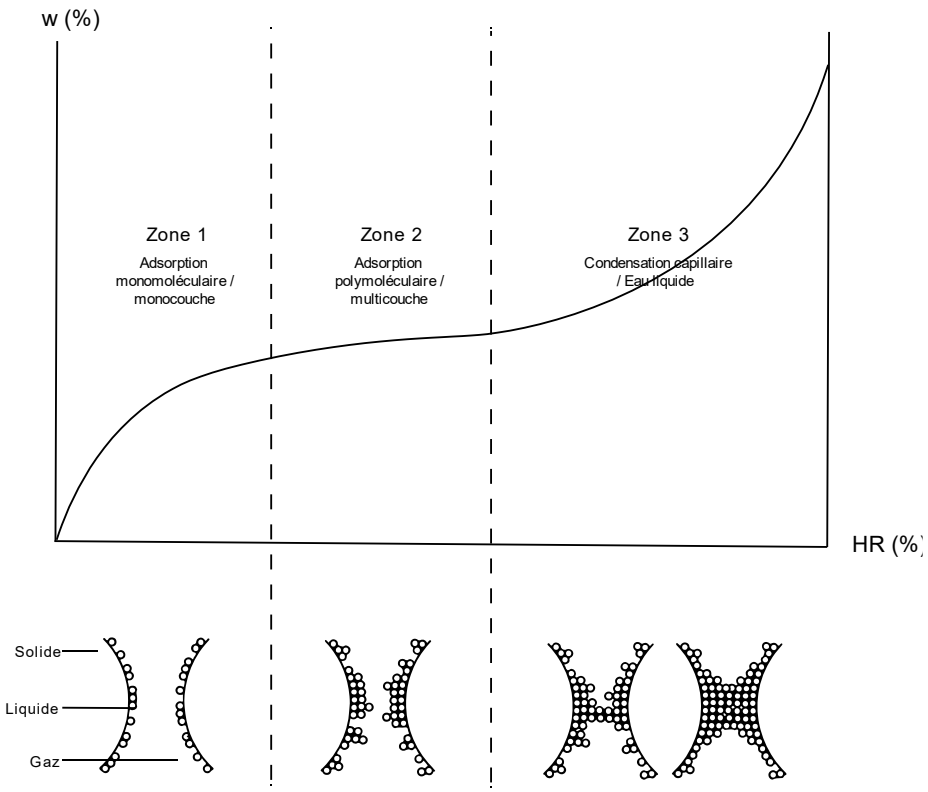


Figure 1.12 - Représentation schématique de l'adsorption d'un pore en parallèle de la courbe de sorption. Inspiré de (Collet, 2004; Ferroukhi, 2015; Rebaia Remache, 2011).

Une classification physique a été élaborée par Brunauer, Deming, Deming et Teller (S. Brunauer et al., 1940), puis par la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) (K. S. W. Sing et al., 1985) (voir **Figure 1.13A**). Cette classification définit six catégories d'isothermes définissant un type de milieu bien particulier. Généralement, les isothermes obtenues expérimentalement correspondent rarement de manière rigoureuse à l'un des six types. L'interprétation d'une isotherme expérimentale se fait donc en la décomposant en plusieurs portions (voir **Figure 1.12**) en fonction des isothermes types (Ferroukhi, 2015). Une classification existe aussi pour les phénomènes d'hystérésis selon quatre types différents (K. S. W. Sing et al., 1985) (**Figure 1.13B**).

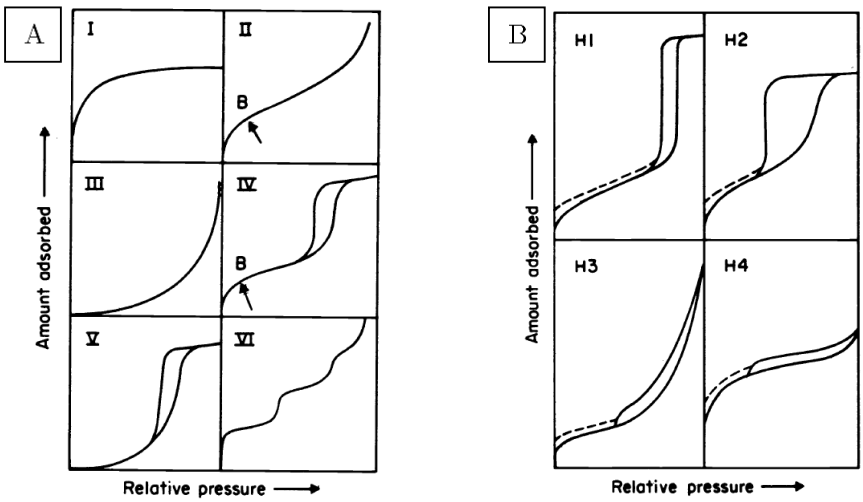


Figure 1.13 - Classification des isothermes de sorption (A) et des cycles d'hystérésis (B) selon la IUPAC (K. S. W. Sing et al., 1985).

Méthodes

Pour la caractérisation des isothermes de sorption, deux méthodes peuvent être utilisées : la méthode du déssiccateur et la méthode dynamique. La première consiste, pour l'obtention de chaque point de la courbe, à placer l'échantillon suspendu dans une boîte à sel qui contient une solution saline qui maintient une humidité constante. Ce récipient est placé à l'intérieur d'une enceinte ventilée à température contrôlée et constante. L'échantillon, dont la masse sèche est connue, doit être pesé périodiquement jusqu'à ce que sa masse ne varie plus de 0,1 % entre deux pesées avec 24 heures de différence, ce qui indique l'équilibre avec l'air à l'intérieur du récipient. En faisant la différence entre la masse à l'équilibre et la masse sèche, il est possible de déterminer la masse d'humidité adsorbée (1.13) où m est la masse à l'instant t.

$$u = \frac{m - m_{sec}}{m_{sec}} \qquad (1.13)$$

L'inconvénient de cette méthode est que cela peut prendre des semaines pour que chaque échantillon atteigne l'équilibre, notamment pour les valeurs élevées de HR.

En revanche, dans la méthode dynamique, l'échantillon est mis dans un courant d'air, ce qui accélère l'obtention de l'équilibre. Cela est fait à l'aide d'un système composé de deux régulateurs de débit massique, un premier qui contrôle le flux d'air sec et d'un deuxième qui contrôle le débit d'air humide. En variant les proportions du mélange, il est possible de modifier l'humidité relative du flux d'air.

Dans ce projet de thèse, la méthode du dessiccateur a été appliquée selon la norme EN ISO 12571 (International Organization for Standardization, 2013). La première étape a consisté à sécher tous les échantillons dans une étuve à 50 °C afin de commencer le test à masse sèche. Comme les échantillons contenaient de la matière organique, la

température maximale utilisable était de 60 °C, car les fibres végétales peuvent souffrir de dégradation à des températures plus élevées. Pour garantir la reproductibilité des mesures de la masse sèche et la cohérence entre les méthodes du dessiccateur et du DVS, l'humidité relative à l'intérieur de l'étuve a été vérifiée pour être inférieure à 5 %HR. Les échantillons ont été placés dans des boîtes à sel à six niveaux différents d'humidité relative (23, 43, 59, 75 et 85 %) dont le niveau d'humidité a été établi en utilisant des solutions salines saturées. Pour ce test, la température a été maintenue à 23 ± 2 °C. Un capteur portable (ROTRONIC HygroLog HL-NT) a été utilisé pour le contrôle constant de l'humidité relative et de la température dans les boîtes. Le point de départ de la courbe de sorption correspond à la masse sèche des échantillons. Après avoir trouvé le point initial de la courbe, les échantillons sont ensuite placés aux valeurs d'humidité relative mentionnées ci-dessus, suivant une étape d'adsorption puis une étape de désorption.

La méthode dynamique du DVS (*Dynamic Vapor Sorption*) a également été appliquée, en utilisant un flux d'air sec de moins de 5 %HR. Le point de départ de la courbe de sorption correspond aussi à la masse sèche des échantillons. Après avoir trouvé le point initial de la courbe, les échantillons sont ensuite soumis à des flux d'air humides contrôlés à des humidités relatives de 23 %HR, 49 %HR, 59 %HR, 75 %HR et 85 %HR suivant une étape d'adsorption puis une étape de désorption. Le critère d'équilibre utilisé est une variation de masse inférieure à 10^{-4} % en 24 heures.

Valeurs dans la littérature

Pour le béton de chanvre, (Collet et al., 2008) trouvent des isothermes de type II, ainsi que (Delannoy et al., 2018) pour le chanvre seul. Le même résultat a été trouvé par (Brouard, Belayachi, Ranganathan, et al., 2017) pour le béton de tournesol et par (Lagouin et al., 2019) pour l'écorce de tournesol.

1.1.4.3. Transferts de masse

Au sein du matériau, l'humidité est soit stockée, soit en mouvement. En ce qui concerne le mouvement, le transfert de masse au sein d'un milieu poreux non réactif s'effectue selon trois phases distinctes : la phase liquide, la vapeur d'eau et l'air. En se basant sur l'équation de conservation de la masse et en prenant comme source interne d'humidité uniquement le changement de phase, le flux massique total passant à travers le milieu poreux est la somme des flux massiques de ces trois phases.

Pour la vapeur d'eau, le mode de transfert dominant est la diffusion. Elle a lieu sous trois modes distincts :

- La diffusion moléculaire ou diffusion de Fick : diamètre du pore supérieur à 10^{-6} m.

  Il n'y a pas d'interaction avec la matrice solide, les collisions se produisent majoritairement entre les particules ou molécules et non avec les parois ;
- La diffusion de Knusden : diamètre du pore inférieur à 10^{-8} m.

Il y a interaction avec la matrice solide, les collisions avec la paroi deviennent non négligeables ;

- La diffusion de surface

  Il s'agit du mouvement sur la surface du solide de la phase adsorbée. Les particules se déplacent d'un site d'adsorption à un autre.

En ce qui concerne la phase liquide, le transfert s'effectue par capillarité et écoulement (Lelièvre, 2015). L'eau liquide contenue dans les pores par condensation capillaire se déplace sous l'effet d'un gradient de pression capillaire. Ce type de transfert se produit pour des humidités relatives élevées, lorsque la phase liquide est continue, et les pores sont presque remplis d'eau liquide (Bennai, 2017). Le calcul de la densité de flux est alors généralement basé sur la loi de Darcy.

Le phénomène d'évaporation-condensation vient compléter les transferts de masse des phases liquides et gazeuses. Il correspond au phénomène qui se produit à l'interface liquide-gaz. Son origine provient en général d'un déséquilibre entre la pression de vapeur et la pression capillaire.

Malgré ces différents types de transfert de masse, le critère représentatif est celui de la perméabilité à la vapeur d'eau ou la résistance à la diffusion de vapeur d'eau, car dans les conditions habituelles d'humidité dans le bâtiment, la quantité d'eau adsorbée est très faible et les transferts d'eau liquide sont, par conséquent, très faibles. Selon (Carpentier, 2011), c'est seulement à partir de 80 %HR que le transfert d'eau n'est plus négligeable.

1.1.4.3.1. Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau est la capacité d'un matériau de laisser passer ce fluide à travers lui et elle dépend principalement de la géométrie interne et de la porosité du matériau. Cette propriété peut être étudiée à travers la perméabilité, δ_p [kg/(m·s·Pa)], ou à travers le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, μ [-], qui dérive de celle-ci selon **(1.14)**.

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \tag{1.14}$$

Avec δ_a [kg/(m·s·Pa)] la perméabilité au passage de la vapeur de l'air, dont la valeur dépend de la température et de la pression selon **(1.15)**. La perméabilité à la vapeur exprime la quantité de vapeur transmise à travers une surface par unité d'épaisseur, de temps et de différence de pression de vapeur.

$$\delta_a \approx 2 \cdot 10^{-7} \frac{T^{0,81}}{P_0} \tag{1.15}$$

Avec T [K] la température ambiante et P_0 [Pa] la pression de l'air ambiant.

Méthodes

La perméabilité à la vapeur d'eau peut être mesurée via la méthode de la coupelle selon la norme NF EN ISO 12572 (International Organization for Standardization, 2016), qui a été appliquée dans ce projet. Cette méthode consiste à imposer une différence de pression de vapeur entre les deux faces d'un échantillon pour établir un flux de vapeur unidirectionnel. Pour cela, on utilise une coupelle à l'intérieur de laquelle on place une solution saline ou un dessicant pour imposer une valeur d'humidité relative. L'échantillon doit être placé au-dessus ou imbriqué dans la coupelle de telle manière qu'il n'y ait pas de fuite. Une deuxième valeur d'humidité relative est imposée dans l'ambiance (typiquement l'intérieur d'une boîte de grand volume), que ce soit grâce à une autre solution saline ou au moyen d'une enceinte climatique. L'humidité est contrôlée à l'intérieur (via une perforation) et à l'extérieur de la coupelle à l'aide d'un capteur ROTRONIC. La perméabilité à la vapeur d'eau et la résistance à la vapeur d'eau peuvent être déterminées à partir du taux de transmission de la vapeur d'eau à travers l'échantillon. L'échange de vapeur est suivi en mesurant la variation de masse de l'ensemble coupelle-échantillon. Cette variation de la masse est tracée en fonction du temps pour ensuite calculer la ligne de régression $G = \Delta m/\Delta t$ [kg/s] quand le régime permanent, dans lequel l'échange d'humidité se stabilise, est atteint. La perméabilité à la vapeur s'exprime en utilisant la loi de Fick selon **(1.16)** :

$$\delta_p = \frac{G \cdot d}{A \cdot \Delta p_v} \qquad (1.16)$$

Où d [m] représente l'épaisseur de l'échantillon, A [m^2] est la surface de l'échantillon exposée et Δp_v [Pa] dénomme la différence de pression de vapeur entre les deux faces de l'échantillon.

Il existe deux variantes de cette méthode, selon le signe de la différence de pression de vapeur entre ambiance et coupelle. On parle de coupelle humide (« wet cup » en anglais) quand la valeur d'humidité relative dans la coupelle est plus grande et le flux de vapeur se produit de la coupelle vers l'ambiance. Par conséquent, la masse de l'ensemble diminue au cours du test. En revanche, la coupelle sèche (« dry cup ») présente une humidité relative plus basse que l'ambiance et le flux de vapeur s'établit de l'ambiance vers la coupelle. La masse de l'ensemble augmente lors de l'essai. La température doit rester constante tout le long de l'essai.

De plus, il est commun de réaliser des corrections sur les valeurs de perméabilité ou résistivité obtenues pour prendre en compte : la résistance à la diffusion liée à la couche d'air située entre la surface de la solution saline ou dessicant à l'intérieur de la coupelle et la surface inférieure de l'échantillon, l'effet de bord masqué de l'éprouvette et la résistance du film des surfaces supérieure et inférieure de l'échantillon avec indépendance de l'épaisseur de celui. Enfin, pour rendre négligeable l'effet de la résistance de la couche

d'air au-dessus de la coupelle, il faut assurer que la vitesse de l'air à cet endroit-là soit d'au moins 2 m/s.

La première correction pour négliger l'effet de la couche d'air à l'intérieur de la coupelle est spécifiée dans l'annexe G de la norme ISO et elle est appliquée à la perméabilité à la vapeur selon (1.17) :

$$\delta_{p,1} = \frac{G \cdot d}{A \cdot \Delta p_v - G \frac{d_a}{\delta_a}} \qquad (1.17)$$

Avec d_a [m] l'épaisseur de la couche d'air. Dans ce projet, cette épaisseur est de 20 mm pour tous les échantillons conformément à la norme ISO 12572 (15±5 mm).

La deuxième correction est présente dans l'annexe F de la norme ISO 12572 et s'applique dans le cas où l'échantillon n'est pas imbriqué dans la coupelle mais au-dessus, donnant lieu un « bord masqué » de l'échantillon, un chemin bidimensionnel pour la vapeur, comme l'illustrent les flèches de la **Figure 1.14** :

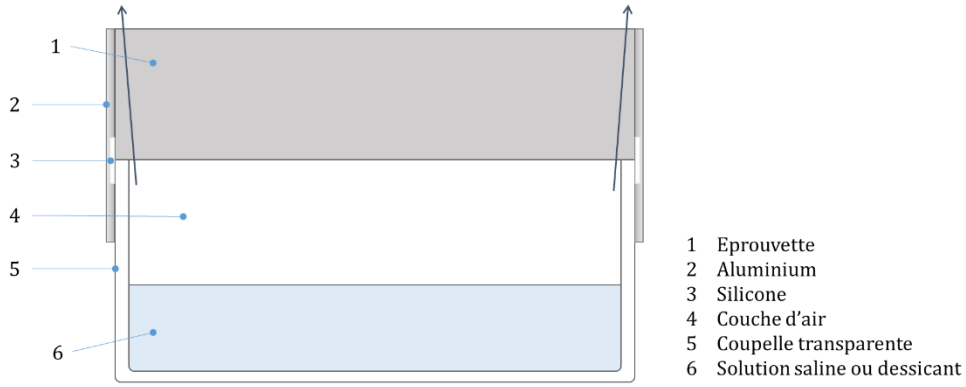


Figure 1.14 - Représentation de l'essai de la coupelle et de l'effet du "bord masqué" sur le flux d'humidité.

(1.18) et **(1.19)** montrent le calcul pour effectuer la deuxième correction.

$$\frac{g_{me}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1 + \exp\left(-2\pi \cdot b/d\right)}\right) \qquad (1.18)$$

$$\delta_{p,2} = \frac{\delta_{p,1}}{g_{me}/g} \qquad (1.19)$$

Avec g_{me} [kg/(m²·s)] le débit de transmission de la vapeur y compris la vapeur qui traverse le bord masqué, g [kg/(m²·s)] le débit de transmission de la vapeur en ignorant le bord masqué, S [m] le diamètre hydraulique calculé comme quatre fois l'aire d'essai divisée par le périmètre et b [m] la largeur du bord masqué.

La troisième correction a été proposée par (Vololonirina et al., 2014; Vololonirina & Perrin, 2016) et validée par (McGregor et al., 2017). Pour déterminer la résistance de film de surface globale, au moins trois échantillons d'épaisseurs différentes doivent être étudiés pour établir une relation entre l'épaisseur du matériau et la résistance apparente.

En traçant cette relation, qui est censée être affine, il est possible d'en déduire la valeur de la résistance apparente pour un échantillon d'épaisseur 0. Cette résistance est appelée Z et son calcul peut être exprimé selon **(1.20)**. **(1.21)** donne le résultat final de la perméabilité à la vapeur.

$$Z = \lim_{d \to 0} \left(d \frac{1}{\delta_{p,2}} = d \frac{1}{\delta_{p,3}} + Z \right) \tag{1.20}$$

$$\delta_{p,3} = \frac{d \cdot \delta_{p,2}}{d - Z\delta_{p,2}} \tag{1.21}$$

Où $\delta_{p,3}$ est la perméabilité à la vapeur réelle ou perméabilité après la troisième correction et $\delta_{p,2}$ est la perméabilité apparente calculée préalablement, issu des deux premières corrections.

Dans ce projet, les trois corrections ont été appliquées. La mise en place des coupelles a été réalisée selon la procédure suivie par (McGregor, Heath, Fodde, et al., 2014). Par conséquent, une fine couche de silicone a été appliquée pour sceller les échantillons sur les coupelles en plexiglas. Du scotch aluminium étanche à la vapeur a été utilisé pour sceller les côtés de l'échantillon avec le côté de la coupelle. L'utilisation du scotch aluminium se justifie par ses propriétés : il est imperméable et n'absorbe pas lui-même l'humidité (Svennberg, 2006).

Valeurs dans la littérature

Dans le cas du béton de chanvre, les valeurs obtenues par les différentes études sont raisonnablement proches les unes des autres. Pour δ_p, (Rahim et al., 2015) trouvent une valeur de $2{,}23 \cdot 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa), (Collet et al., 2013) trouvent $5 \cdot 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa), (Vu et al., 2015) trouvent $6{,}68 \cdot 10^{-11}$ et (Chamoin, 2013), $5{,}64 \cdot 10^{-11}$. Cependant, pour caractériser correctement cette propriété, il est important de prendre en compte l'effet de l'humidité relative, qui se traduit en la teneur en eau de l'échantillon. En effet, (Mazhoud et al., 2016) et (Collet et al., 2013) entre autres déterminent que la perméabilité à la vapeur du béton de chanvre augmente avec l'humidité relative, pouvant augmenter de trois fois entre la valeur à 0 %HR et 100 %HR.

Pour le béton de tige broyée de maïs, (Ahmad & Chen, 2020) déterminent une perméabilité à la vapeur de $1{,}614 \cdot 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa) pour un béton avec ciment de phosphate de magnésium et $1{,}263 \cdot 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa) pour un béton avec ciment de Portland.

1.1.4.3.2. MBV ou valeur tampon hydrique

La valeur tampon hydrique ou MBV selon ses sigles en anglais (« Moisture Buffering Value »), aussi appelée VCTH (Valeur Caractéristique du Tampon Hydrique), dénomme la capacité d'un matériau à échanger de l'humidité avec son environnement. Elle caractérise le stockage d'humidité d'un matériau. Cela permet par la suite de définir dans

quelle mesure le matériau modère les variations de l'humidité intérieure dans le bâtiment. Elle est exprimée en g/(m²·%HR), puisqu'elle représente la masse d'humidité échangée (Δm) par unité de surface (A) et par unité de variation d'humidité relative (ΔHR), calculée selon **(1.22)**. Le concept du MBV a été développé par les pays nordiques (Danemark, Finlande, Norvège et Suède).

$$MBV_{pratique} = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta HR} \qquad (1.22)$$

Avec Δm [g] la variation de la masse pendant le cycle, ΔHR exprimé en %HR et $MBV_{pratique}$ exprimé en g/(m²·%HR).

(Rode et al., 2007) ont développé une solution analytique afin de prédire la valeur de la MBV en fonction de ξ et μ. La valeur calculée est appelée $MBV_{idéal}$ et il s'agit d'une estimation de la valeur tampon hydrique MBV lorsque la résistance de la couche d'air est négligée. Elle est déterminée à travers **(1.23)**, formule donnée par (Rode et al., 2007). La capacité idéale de stockage de l'humidité $\xi_{\text{idéal}}$ des échantillons est la capacité de stockage qui conduirait effectivement à un $MBV_{\text{idéal}}$ égal au MBV_{pratique} et elle est déduite du MBV_{pratique} par **(1.24)**. Elle est exprimée en kg/m³.

$$MBV_{idéal} \approx 0{,}00568 \cdot P_{v,sat} \cdot b_m \cdot \sqrt{t_p} \qquad (1.23)$$

$$\xi_{\text{idéal}} \approx 0{,}65\, \mu \left(MBV_{\text{pratique}}\right)^2 \qquad (1.24)$$

Avec $P_{v,sat}$ [Pa] la pression de vapeur de saturation, $b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \xi}{P_{v,sat}}}$ [kg/(m²·Pa·s$^{1/2}$)] l'effusivité hydrique, t_p [s] la période, $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$ [-] le facteur de résistance à la vapeur, δ_a [kg/(m·s·Pa)] la perméabilité à la vapeur de l'air, δ_p [kg/(m·s·Pa)] la perméabilité à la vapeur du matériau et ξ [kg/m³] la capacité de stockage de l'humidité. À 23 °C, la pression de vapeur saturante et la perméabilité à la vapeur de l'air sont respectivement égales à 2814 Pa et 1,97·10^{-10} kg/(m·s·Pa).

Méthodes

Le protocole développé, appelé méthode Nordtest (Rode et al., 2007) est le suivant : le MBV donne l'absorption d'humidité par pourcentage de variation de l'humidité relative lorsque 1 m² d'une surface est exposée à une succession d'humidité relative et 33 % à 75 %, et selon des plages de temps différentes (8h à 75 %HR et 16h à 33 %HR). Un premier benchmark a ainsi été établi (**Figure 1.15**) permettant une classification des matériaux par rapport à leur MBV. Le concept a ensuite été étendu au volume de la pièce dans l'Annex41 (Rode et al., 2008). Elle peut également être mesurée grâce à un protocole similaire proposé dans les normes industrielles japonaises (Japanese Industrial Standard (JIS), 2002). Les deux protocoles exposent un échantillon à des cycles d'adsorption-désorption, à des valeurs d'humidité et à des intervalles de temps différentes, et mesurent la variation de masse de celui-ci.

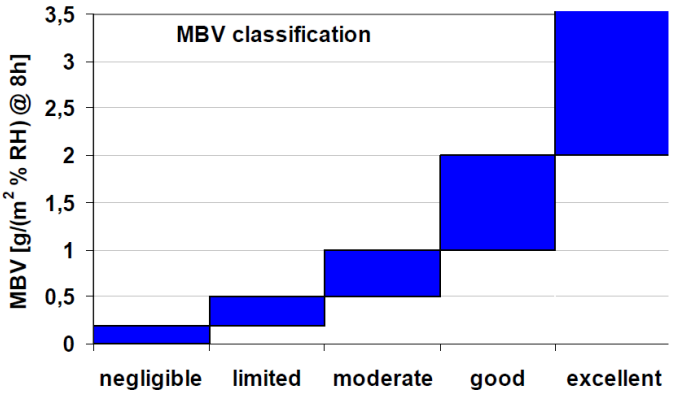


Figure 1.15 - Plages de classification des matériaux selon leur valeur MBV pratique (Rode et al., 2007).

Dans ce projet, la méthode MBV a été appliquée. L'échantillon testé est scellé sur toutes ses faces à l'aide de scotch aluminium, à l'exception de la face supérieure. Le contrôle de masse a été effectué avec un intervalle d'une heure puis de deux heures jusqu'à atteindre le maximum du cycle puis une dernière mesure 24h après le début du cycle. La valeur de MBV a été calculée lorsque le régime était stabilisé, c'est-à-dire lorsque la différence de masse entre le début et la fin d'un cycle était inférieure à 5 %.

Valeurs dans la littérature

La valeur de MBV peut être calculée pour la variation de masse lors de l'adsorption ou lors de la désorption. (Rahim et al., 2015) donnent une valeur moyenne entre le MBV de l'adsorption et le MBV de la désorption d'environ 1,9 g/(m^2·%HR) pour un béton de chènevotte, ce qui correspond à « bon » matériau hygroscopique, selon la classification de Rode. (Collet et al., 2013) déterminent des valeurs entre 1,94 et 2,15 pour le même type de matériau. Pour un composite à base d'argile et de tige de tournesol, (Brouard, 2018) trouve une valeur de MBV de 2,86 g/(m^2·%HR). Pour différents bétons à base de tige de maïs, (Ahmad et al., 2020) trouve des valeurs de MBV entre 1,4 et 3,4 g/(m^2·%HR). (McGregor, Heath, Fodde, et al., 2014) établissent que les paramètres qui conditionnent la valeur de MBV d'un échantillon sont la vitesse de l'air dans l'enceinte climatique, les intervalles de temps et la valeur d'humidité relative des cycles, ainsi que l'ajout de stabilisants, mais pas l'épaisseur de l'échantillon à partir d'une épaisseur plus grande que l'épaisseur active.

1.2. Les interactions liant-granulat dans la littérature

Dans les bétons biosourcés, la présence d'agrégats végétaux entraîne des perturbations qui peuvent avoir un effet sur les propriétés macroscopiques du matériau au court et au long terme. Les interactions chimiques et physiques qui sont à l'origine de ces perturbations, ainsi que les hypothèses les plus répandues pour expliquer ces phénomènes, seront détaillées dans la présente section.

1.2.1. Echelle microscopique

La biomasse lignocellulosique est la matière végétale sèche et elle est dénommée ainsi puisqu'elle contient principalement des polymères appelés cellulose, hémicellulose et lignine, ainsi que des pectines (Nozahic & Amziane, 2012). La moelle de tournesol, la chènevotte ou le bois sont des matériaux lignocellulosiques. L'étude bibliographique de la composition chimique du chanvre et de la tige de tournesol menée par (Nozahic et al., 2012) et reflétée dans le **Tableau 1.1** révèle que la moelle, comme la chènevotte, est composée de cellulose pratiquement à 50 %, mais qu'elle contient beaucoup moins de lignine que celle-ci ou que l'écorce de tournesol. Elle contient également un pourcentage considérable de cendres.

Tableau 1.1 - Composition chimique des agrégats. Extrait de *(Nozahic et al., 2012)*

	Cellulose [%]	**Hémicelluloses [%]**	**Lignine [%]**	**Pectines [%]**	**Cendres [%]**	**Cires et protéines [%]**
Chènevotte (Garcia-Jaldon et al., 1998)	48	12	28	6	2	4
Fibres de chanvre (Garcia-Jaldon et al., 1998)	55	16	4	18	4	3
Tige de tournesol (Khristova et al., 1996)	38,6	22,8	16,2	-	12,2	-
Ecorce de tournesol (Khristova et al., 1996)	41,4	30	18,3	-	8,9	-
Moelle de tournesol (Yin et al., 2007)	47,4	9,4	3,5	6	20,4	-

Ces différences dans la composition, ainsi que les différences dans la microstructure qui seront détaillées par la suite, peuvent donner lieu à des interactions liant-granulat très différentes en fonction du type d'agrégat.

1.2.1.1. Interactions physiques

Absorption d'eau

Les agrégats végétaux ont une grande capacité d'absorber de l'eau et, dès le moment où le granulat, le liant et l'eau sont mélangés, une compétition s'établit pour cette ressource, qui est nécessaire pour la prise de la plupart de liants. Les agrégats tendent à absorber une partie importante de l'eau pour la relarguer plus tard. L'affinité des agrégats

pour l'eau a deux causes. D'un côté, la cellulose et l'hémicellulose contiennent une grande quantité de groupes hydroxyle (-OH) polaires qui ont une tendance à former des liaisons d'hydrogène avec l'eau. La lignine, en revanche, est une molécule hydrophobe (Vo & Navard, 2016). De l'autre côté, les agrégats sont généralement très poreux, ce qui permet que l'eau pénètre dans la particule par capillarité.

La structure poreuse de la moelle est très différente de celle de la chènevotte. Lorsque cette dernière est composée de canaux oblongs parallèles de type xylème de diamètre 10-20 µm (Magniont et al., 2012), connectés entre eux par des pores de diamètre environ 5 µm, la moelle présente une structure dite « alvéolaire » ou en nid d'abeille dans toutes les directions. Ces pores sont sensiblement plus grands en diamètre (supérieur à 100 µm) que ceux de la chènevotte, mais beaucoup plus courts. (Nozahic & Amziane, 2012) affirment que la moelle contient également un nombre de pores de type xylème de diamètre environ 10 µm et qu'ils constituent l'entrée principale pour l'absorption capillaire de l'eau. Cela est probablement dû au fait que la moelle étudiée est proche de l'écorce. D'une autre part, le contenu de cellulose et d'hémicellulose des deux agrégats est très semblable (cf. **Tableau 1.1**).

Les résultats expérimentaux de plusieurs auteurs convergent sur le fait que la moelle est plus absorbante que la chènevotte en relation à son poids. (Nozahic et al., 2012) déterminent une absorption finale de 500 % pour la tige de tournesol et de 406 % pour la chènevotte, lorsque (Magniont et al., 2012) trouvent 917 % pour la moelle de tournesol seule et 300 % pour la chènevotte. Tous les pourcentages sont des ratios massiques. Magniont et al., expliquent que l'écart peut être imputable à une différence dans les caractéristiques des agrégats, mais aussi à la méthode. Dans tous les cas, la moelle reste plus absorbante que la chènevotte. Cependant, l'effet de cette propriété sur le béton doit être nuancé du fait que la moelle est très légère (entre 5 et 10 fois plus que la chènevotte selon l'étude) et que, par conséquent, les bétons de moelle contiennent généralement une proportion massique d'agrégat plus réduite que les bétons de chènevotte, puisque, dans le cas où le même ratio serait utilisé, la moelle prendrait une partie importante du volume du béton, qui serait donc très peu résistant mécaniquement.

Les conséquences de ce pouvoir absorbant des particules d'agrégat sont spécialement marquées pour les liants dont la prise se fait par hydratation, comme le ciment ou la chaux hydraulique. Cependant, la chaux aérienne a également besoin d'une certaine humidité pour réaliser la carbonatation.

Pour réduire l'impact de l'absorption de l'eau de la part du liant, (Arizzi et al., 2015) conseillent l'utilisation d'agrégats frais en opposition aux agrégats préalablement séchés, car les premiers absorberont moins d'eau pendant la prise. Toutefois, cela peut nuire à l'adhésion entre agrégat et liant, car la surface des agrégats serait plus lisse et le retrait de celui-ci sera plus important. Une autre possibilité est d'assurer un certain niveau d'humidité ambiante pendant la prise et le durcissement, mais par intervalles de temps

dans le cas de la chaux aérienne, pour laquelle un excès d'humidité bloquerait l'accès du CO_2 à la pâte de liant.

Adhésion physique

Un deuxième type d'interaction physique est l'adhésion par emboîtement physique. L'adhésion physique ou mécanique est définie par (River et al., 1991) comme l'état dans lequel deux surfaces sont attachées l'une à l'autre par un adhésif qui a pénétré dans la structure poreuse en état liquide et qui s'est ancré par solidification. Elle dépend principalement de la porosité et de la rugosité de la surface de l'agrégat mais, avant tout, de la mouillabilité de l'agrégat par le liant (Courard, 2000, 2002). Cette dernière propriété est évaluée à travers l'angle de contact.

Un solide est considéré « mouillable » si l'angle de contact est inférieur à 90°. L'angle de contact est lié à la rugosité par la relation de Wenzel (Kinloch, 1987; Wenzel, 1936). Si le solide est mouillable, comme c'est le cas des agrégats végétaux, l'angle de contact sera plus petit pour une surface rugueuse de la même nature que le solide, puisque la surface disponible sera supérieure.

L'adhésion est meilleure si l'agrégat a une plus grande rugosité puisque celle-ci permet non seulement un meilleur mouillage de la part du liant, mais aussi l'emboîtement physique entre les deux. Cependant, cela dépend également de la viscosité de la pâte de liant, qui diminue avec la teneur en eau. La porosité favorise également l'adhésion car elle permet l'absorption capillaire, qui améliore la mouillabilité de l'agrégat. D'après (Courard, 2000), l'absorption capillaire aura lieu avec plus de force dans les capillaires fins, mais en plus grande quantité et à plus grande vitesse dans les grands capillaires.

L'adhésion est également provoquée par des forces physiques d'attraction entre molécules, qu'elles soient de type polaire ou non-polaire (de Bruyne, 1939). Généralement, la surface des agrégats est polaire grâce aux groupes hydroxyle de la cellulose et l'hémicellulose et peut former des liaisons relativement fortes (notamment des liaisons d'hydrogène, mais aussi des forces dipôle-dipôle de Van der Waals) avec des liants également polaires, liaisons qui seront résistantes à l'eau. Selon (Coutts, 2005), les groupes hydroxyle présents dans la surface de la cellulose seraient la cause principale de l'adhésion entre les fibres végétales et le ciment.

Des études ont observé que l'adhésion entre chènevotte et chaux n'est pas très bonne, mais elle est un peu meilleure pour la chaux aérienne que pour la chaux hydraulique (Arizzi et al., 2015). Quant à elle, la moelle est plus poreuse et plus rugueuse que la chènevotte ou l'écorce, ce qui assure une meilleure adhésion.

Retrait

Les variations de volume des agrégats et du liant provoquent des contraintes de cisaillement dans l'interface entre les deux. D'une part, les particules végétales augmentent leur volume quand elles absorbent de l'eau (la chènevotte plus que la moelle) et rétrécissent une fois elles relarguent l'eau. (Nozahic & Amziane, 2012) attestent un rétrécissement de -6,4 % pour la moelle. Cela se produit principalement lors du gâchage et la prise, car une grande quantité d'eau est disponible, mais aussi chaque fois que le matériau est exposé à l'humidité ambiante. D'autre part, le liant rétrécit aussi lors des premiers jours après gâchage à mesure que celui-ci sèche (Pozo-Antonio, 2015).

Cela engendre une dégradation de l'interface liant-granulat, avec l'apparition de microfissures et d'espaces vides. (Nozahic et al., 2012) observent un espace de 10-20 µm entre les particules de chènevotte et le liant.

Modification de la structure des agrégats

Les interactions entre agrégats et liant peuvent entrainer des changements substantiels dans la structure des premiers. Si la structure poreuse des agrégats se voit dénaturalisée, que ce soit parce que les pores extérieurs sont bouchés ou parce que des particules arrivent à accéder aux pores internes, le béton végétal risque de perdre ses propriétés hygrothermiques remarquables.

(Arizzi et al., 2015) affirment que la structure porale interne de la chènevotte après trois mois ne change pas car le liant n'arrive pas à pénétrer, puisque la chènevotte est remplie d'eau lors de la prise et le début du durcissement, raison pour laquelle les particules de chaux ne peuvent se déposer que dans les zones les plus superficielles de l'agrégat.

1.2.1.2. Interactions chimiques

Effet des sucres

Certains sucres ont été identifiés comme des retardateurs et/ou inhibiteurs de la prise des liants. (Thomas & Birchall, 1983) signale que le ciment de Portland se voit perturbé par la présence de ces substances, qui solubilisent des constituants du ciment et retardent la prise, parfois de façon indéfinie. Selon (Jorge et al., 2004), le glucose est la substance responsable de la plus grande diminution des propriétés physiques des composites végétaux. Constituant principal de la cellulose, le glucose se trouve dans la chènevotte (Diquélou et al., 2015; Gandolfi et al., 2013; Sedan et al., 2008) et dans la moelle de tournesol (Xu, 2016) en quantité non-négligeable.

D'autres auteurs signalent l'hémicellulose comme la responsable de ces perturbations. Solubilisée partiellement en milieu alcalin (Nozahic & Amziane, 2012) et dans l'eau (Diquélou et al., 2015), l'hémicellulose forme des liens acide-base avec les espèces métal-hydroxylées. Cela retarde et inhibe la prise des liants très basiques particulièrement.

Pour prouver cette interaction, (Arizzi et al., 2015) observent au microscope la chènevotte extraite d'un béton de chaux trois mois après fabrication et remarquent que l'hémicellulose disparaît de la surface des agrégats. D'après le **Tableau 1.1**, la moelle contient un peu moins d'hémicellulose que la chènevotte (9,4 % devant 12 %) et beaucoup moins que l'écorce de tournesol (30 %), ce qui indiquerait un avantage de l'utilisation de la moelle.

Minéralisation des agrégats

(Sedan et al., 2008) expliquent que les pectines ont la capacité d'attraper des ions Ca^{2+}, car elles ont une concentration importante de groupes carboxylate et alcool libres qui adsorbent une grande quantité de groupes hydroxyle. Ces groupes sont ionisés en présence d'un milieu alcalin (chaux, ciment), ce qui fait que la surface des agrégats soit chargée négativement et puisse interagir avec les ions calcium pour donner lieu à des grains d'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ qui se déposent sur la surface. Dans le cas d'un béton de chènevotte et de ponce / chaux, (Nozahic et al., 2012) observent non seulement des traces de $Ca(OH)_2$ sur la surface de la chènevotte, mais aussi de CaO.

Ce phénomène de capture de calcium provoque une diminution de la concentration de cet élément dans la pâte de liant, qui est à l'origine d'un retard dans la prise. Dans le cas du ciment, (Sedan et al., 2008) notent un retard de 45 minutes généré par la difficulté accrue pour que le silicium forme des hydrates de silicate de calcium (C-S-H), le produit d'hydratation principal du ciment de Portland. Pour la chaux hydraulique, ce serait la capacité diminuée du béton pour combiner des ions silico-aluminate dans un milieu pauvre en calcium qui provoque le retard (Nozahic et al., 2012).

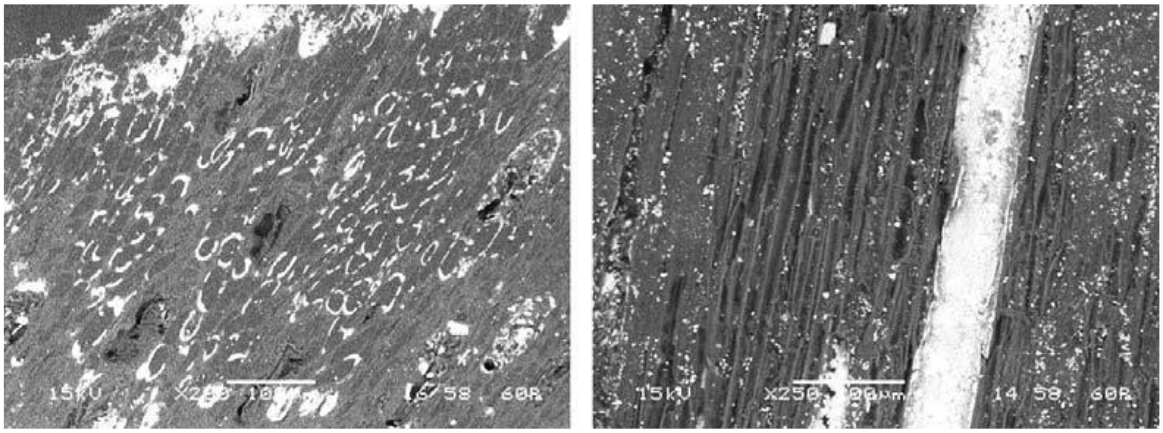


Figure 1.16 - Phénomène de minéralisation de la chènevotte observé par (Magniont et al., 2012).

Bien que pendant les premières heures, le phénomène de calcification n'ait lieu qu'en surface, avec le temps, cela se produit également à l'intérieur des particules d'agrégat végétal. (Magniont et al., 2012) observent la chènevotte 72 heures et 2 ans après fabrication et trouvent que, lorsque la première ne présente des composants minéraux que dans la partie externe, la deuxième présente des particules minérales à l'intérieur des agrégats au point de boucher les pores dans les cas les plus extrêmes. L'explication que

Magniont et al. proposent est que, lors du durcissement en présence d'une ambiance humide, les phases calciques sont dissoutes et diffusées à l'intérieur des pores de l'agrégat végétal, où elles précipitent à nouveau. Ces observations ont été faites également pour des particules de moelle. D'un côté, ces transformations provoquent une perte de l'élasticité des agrégats qui rend les bétons biosourcés uniques mais, d'un autre côté, les bétons augmentent en résistance mécanique de façon notable.

Selon (Tonoli et al., 2012), la présence de lignine dans les particules végétales empêcherait partiellement la migration des espèces minérales à l'intérieur des agrégats du fait de son caractère hydrophobe.

Dégradation des agrégats

La durabilité des agrégats au sein des bétons biosourcés se voit affectée par certains liants. Comme il a été mentionné auparavant, l'hémicellulose se solubilise partiellement en présence d'un milieu alcalin, mais la lignine aussi quand le milieu alcalin atteint une certaine température, ce qui se produit, par exemple, pendant l'hydratation du ciment (Vo & Navard, 2016). Cela provoque une dégradation importante des agrégats qui, à long terme, peut entrainer une perte de résistance mécanique du béton.

1.2.2. Echelle macroscopique

L'effet des interactions susmentionnées est bien évident à l'échelle du béton. (Diquélou et al., 2015) expliquent qu'une partie des composés chimiques est dissoute dans l'eau de la pâte de liant et une autre est dissoute en milieu alcalin, quand les agrégats se décomposent partiellement.

Pour mesurer l'effet des composés dissous dans l'eau, Diquélou et al. produisent trois solutions avec trois types de chènevotte en mélangeant celle-ci avec de l'eau avec un ratio massique de 0,1. Après 24 heures, ils filtrent la chènevotte et gardent uniquement le liquide résultant. Ils fabriquent ensuite 4 pâtes cimentaires avec de l'eau inaltérée et avec chacune des trois solutions, qu'ils appellent « extraits aqueux de chènevotte ». Ils attestent que, dans les trois cas, les extraits aqueux provoquent un retard et une inhibition partielle de la prise par rapport à la pâte fabriquée avec de l'eau ordinaire. La prise, qui a lieu entre 240 et 400 minutes après malaxage pour la pâte ordinaire, est retardée d'entre 3,5 et 5 heures selon le type de chènevotte. Pour étudier l'inhibition de la prise, ils analysent les pâtes après 7 jours et constatent un manque d'hydrates C-S-H et d'hydrates de type portlandite. Ce manque est constaté également à 28 jours, ce qui révèle qu'il ne s'agit pas d'un simple retard dans la prise, mais d'un effet irréversible sur le durcissement.

Dans l'objectif de déterminer les causes de ces effets, une analyse chimique des extraits aqueux est menée. Elle révèle que la solution qui provoque le retard et l'inhibition les plus marqués présente plus de sucres (parmi lesquels, des hémicelluloses et de la glucose) et d'autres composés non identifiés.

Cependant, la présence des particules a également un impact sur la prise et durcissement du liant. D'une part, les particules végétales ont une grande capacité pour absorber l'eau, comme il a été expliqué dans **§1.1.2.1** et, d'une autre part, une partie des composés contenus dans les agrégats qui ne sont pas dissous dans l'eau peuvent l'être en présence de liants alcalins.

La somme du manque d'eau et des interactions chimiques locales crée une auréole autour des particules d'agrégat composée par du liant qui n'a quasiment pas réalisé sa prise. Dans le cas du béton à base de ciment et de chènevotte, cette auréole fait environ 3 mm de rayon. Elle provoque une très mauvaise adhésion entre liant et particules et un problème de prise et durcissement du liant à grande échelle si les particules d'agrégat sont très proches les unes des autres.

Diquélou et al. trouvent que, encore pour un béton ciment-chènevotte, la migration des espèces chimiques génère une deuxième auréole autour de la première qui arrive jusqu'à 8 mm de diamètre, où la prise du ciment est juste retardée et inhibée à un très faible degré.

Ils déterminent que la moitié de la surface de l'auréole est provoquée par les espèces chimiques dissoutes dans l'eau du liant et l'autre moitié est due à l'absorption d'eau et aux espèces dissoutes en milieu alcalin. Il fait cela en comparant l'auréole de l'agrégat frais à l'auréole de l'agrégat lavé.

Arizzi et al. observent aussi que ces interactions, notamment le manque d'eau, retardent manifestement le durcissement de la chaux aérienne et hydraulique. Après 3 mois, seulement 40-60 % de la chaux a réagi.

1.2.2.1. Impact sur les propriétés mécaniques

Pour quantifier l'effet des agrégats sur la résistance mécanique du béton, (Diquélou et al., 2015) comparent la résistance à la compression des quatre pâtes cimentaires, une fabriquée avec de l'eau ordinaire et trois autres fabriquées avec les extraits aqueux de chènevotte, 28 jours après fabrication. Lorsque la pâte normale présente une Rc de 50 MPa, deux pâtes à base d'extraits de chènevotte présentent des résistances très proches, autour de 46 MPa, et une troisième présente une résistance notablement plus réduite, autour de 37 MPa. Cette pâte est la même qui présentait le plus grand retard de la prise. De plus, la résistance mécanique des quatre matériaux varie très peu entre 14 et 100 jours de durcissement.

(Sedan et al., 2008) étudient un ciment renforcé avec des fibres de chanvre et déterminent que la quantité optimale de fibres se trouve à 16 vol.% car, au-delà, l'adhésion entre la matrice cimentaire et les fibres n'est pas satisfaisante. Ils expliquent ce phénomène par le fait que le mélange n'est pas homogène, mais cela peut également être provoqué par les effets locaux autour des agrégats observés par Diquélou et al., c'est-à-dire, par une présence des auréoles trop étendue dans le ciment. Ils étudient également

l'effet de plusieurs traitements des fibres et concluent que le traitement avec NaOH permet d'enlever des hémicelluloses, des cires et des impuretés de leur surface. Par conséquent, la surface des fibres devient chimiquement plus homogène et plus rugueuse, ce qui améliore l'adhésion à la matrice cimentaire. La résistance à la flexion, qui dépend fortement de la qualité de l'interface entre les fibres et le ciment, se voit fortement améliorée, passant de 6,8 MPa pour le composite à base de fibres non-traitées à 9,5 MPa pour le composite à base de fibres traitées avec cette méthode.

D'autre part, (Magniont et al., 2012) comparent les propriétés mécaniques et thermiques d'un ensemble de bétons de chènevotte et de moelle de tournesol et concluent que, pour une performance thermique équivalente, les bétons de tournesol présentent une résistance mécanique plus importante car ils contiennent notablement moins de masse d'agrégat, qui absorbe un plus petit volume d'eau. Cela permet de fabriquer des bétons avec un ratio eau/liant moins important, ce qui donne une meilleure résistance mécanique. Ils évaluent également l'effet de la présence d'agrégats sur le développement de la résistance mécanique en comparant l'évolution de la Rc du liant seul avec celle du béton de chènevotte. Ils trouvent que, lorsque le liant atteint sa plus grande résistance à 49 jours, la résistance du béton continue à augmenter bien après cela, même un an après fabrication. L'explication à cela pourrait se trouver dans le phénomène de minéralisation des agrégats, puisque le retard de la prise et du durcissement induit par les agrégats, montré par d'autres auteurs, ne dure que quelques heures.

1.2.2.2. Impact sur les propriétés hygrothermiques

Les effets de ces perturbations sur les propriétés hygroscopiques et thermiques des bétons ont été peu explorées dans la littérature. Cependant, la porosité du matériau joue un rôle central dans l'interaction des matériaux avec la vapeur et dans leur capacité de transmettre la chaleur. Pour cette raison, la modification de la structure des agrégats, que ce soit à la suite de l'apparition d'espèces minérales à l'intérieur des particules ou à cause de la pénétration du liant dans ces dernières, aurait un impact important sur ces propriétés. En outre, la conductivité thermique se voit également affectée par les caractéristiques de la matrice solide, qui peuvent être modifiées par la présence des agrégats dans le cas du liant ou par la présence d'un milieu alcalin dans le cas des agrégats.

Chapitre 2 : Caractérisation mécanique et hygrothermique des bétons bio-sourcés - Analyse comparative entre béton de chanvre et béton de moelle

Table des matières

2.1 Introduction 66
2.2 Impact de l'origine des granulats 67
2.2.1 Matériaux et méthodes 67
2.2.2 Résultats et discussion 73
2.2.3 Conclusion 81
2.3 Impact du liant et de la formulation 81
2.3.1 Matériaux et méthodes 81
2.3.2 Etude de la microstructure 84
2.3.3 Etude des propriétés macroscopiques 91
2.3.4 Discussion sur le potentiel hygroscopique des bétons à base de moelle 106
2.3.5 Conclusion 109
2.4 Conclusion générale du chapitre 111

2.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les propriétés mécaniques et hygrothermiques des bétons de moelle. Dans un premier temps, on vérifie si ces bétons sont compatibles avec les spécifications mécaniques du guide français de bonnes pratiques de la construction en chanvre.

Ensuite, on s'intéresse à plusieurs facteurs de variabilité des propriétés, sujet dont l'étude a donné lieu à de nombreux travaux de recherche dans le cadre des bétons d'origine végétale (Arnaud, 2000; Arnaud et al., 2006; Cérézo, 2005; Collet, 2004; Dowd & Quinn, 2005; Arnaud Evrard, 2008; Marceau et al., 2017; A.D. Tran Le et al., 2015). Ces travaux conduisent à la conclusion que les performances mécaniques et hygrothermiques des bétons biosourcés sont significativement influencées par les caractéristiques de l'agrégat, par la nature du liant et par le dosage en liant, entre autres, même si aucune relation claire n'existe encore pour relier ses caractéristiques et les performances du béton. Par exemple, (Ahmad et al., 2018) ont étudié l'impact sur la conductivité thermique de la composition de deux bétons à base de tiges de maïs et de ciment de phosphate de magnésium. Ils ont remarqué que les échantillons ayant une teneur plus élevée en tiges de maïs avaient une conductivité thermique plus faible. Ils ont obtenu le même résultat sur les bétons de chanvre, en précisant toutefois que la relation entre la quantité de chènevotte et la conductivité thermique n'est pas linéaire. De plus, (Ahmad et al., 2018) ont observé que pour une même teneur en tiges de maïs, les grandes tiges présentaient une conductivité thermique inférieure à celle des petites, ce qui s'explique par une masse volumique plus faible et une porosité plus élevée.

Certaines études ont constaté que les particules plus fines augmentent à la fois la résistance mécanique et la capacité d'absorber de l'eau (Cigasova et al., 2013). D'autre part, d'autres études ont montré qu'une taille de particule plus grande donne de meilleures propriétés mécaniques, ce qui est attribué à un chevauchement plus important des particules (Ceyte, 2008). Une des raisons possibles du désaccord de ces conclusions pourrait être la fluctuation des propriétés des bétons provoquée par la variabilité naturelle des agrégats.

Etant donné que la répétabilité des performances est essentielle, on s'intéresse à l'impact de l'origine géographique et de la période de récolte des agrégats végétaux sur les performances du béton. À cette fin, cinq bétons préparés à partir de cinq variétés de moelle et un liant commun ont été analysés. Ces moelles ont des caractéristiques similaires en ce qui concerne leurs principales propriétés physiques, à savoir la masse volumique apparente et la distribution granulométrique, deux paramètres avec un impact significatif sur la résistance à la compression et la conductivité thermique selon (Magniont et al., 2012; Williams et al., 2018). La perméabilité à la vapeur d'eau, la capacité de sorption, la valeur tampon hydrique et la conductivité thermique de ces bétons ont été déterminées.

Une fois établi si l'origine de la moelle a un impact sur les propriétés des bétons ou non, l'interaction des agrégats avec différents liants, l'impact de la formulation et l'impact de caractéristiques comme la masse volumique sur plusieurs paramètres physiques clés ont été évalués. Ces paramètres sont la résistance à la compression uniaxiale, la conductivité thermique, les isothermes de sorption et la perméabilité à la vapeur d'eau, ainsi que la valeur tampon hydrique (MBV). La conductivité thermique a été étudiée par deux méthodes différentes, la méthode du fil chaud et un nouveau dispositif conçu pour une mesure plus précise. Cette étude a été menée en parallèle sur des bétons de moelle et de chanvre avec plusieurs liants pour analyser les différences entre ces deux familles de matériaux.

2.2. Impact de l'origine des granulats

2.2.1. Matériaux et méthodes

2.2.1.1. Matériaux

Agrégats végétaux

Dans le cadre de cette campagne expérimentale, deux types d'agrégats biosourcés ont été étudiés : la moelle de tournesol et la moelle de maïs. Cinq types de moelle différents ont été sélectionnés et sont représentés dans la **Figure 2.1**. Les moelles D2016 et D2017 sont des moelles de tournesol de la coopérative Dauphinoise provenant de la même région du sud-est de la France mais qui diffèrent par l'année de récolte. Deux autres moelles de tournesol référencées O et G sont originaires de l'ouest de la France, des coopératives Ovalie et GDA, respectivement, avec un climat plus océanique. La moelle de maïs de la coopérative Ovalie est appelée M dans ce document. O et M proviennent de la récolte de 2016 et G de 2014. Chaque coopérative utilise sa propre méthode de récolte.

Figure 2.1 - Echantillons (de gauche à droite) de moelle D2016, M, O, D2017 et G.

Tableau 2.1 - Récapitulatif des appellations des agrégats.

Origine de l'agrégat	Type d'agrégat	Appellation
Coopérative Dauphinoise, récolte 2016	Moelle de tournesol	D2016
Coopérative Dauphinoise, récolte 2017	Moelle de tournesol	D2017

Coopérative Ovalie, récolte 2016	Moelle de tournesol	O
Coopérative GDA, récolte 2014	Moelle de tournesol	G
Coopérative Ovalie, récolte 2016	Moelle de maïs	M

Une teneur élevée en fibres entraîne une réduction du nombre de points de contact entre les particules de moelle et le liant, avec une diminution des propriétés adhésives et une perte de résistance mécanique. Il est donc préférable d'utiliser une moelle aussi pure que possible (Marechal & Rigal, 1999). Même si les agrégats utilisés sont différents dans leur mode d'extraction et leur préparation, ils répondent tous aux mêmes spécifications en termes de masse volumique apparente et de distribution granulométrique. Une variabilité de la taille des grains peut être observée dans le sac de moelle en vrac mais dans le cas de cette étude, ce point n'est pas pris en compte, car les propriétés de tous les agrégats utilisés ont été vérifiées avant de procéder aux mélanges.

La **Figure 2.2** et **Figure 2.3** représentent les résultats de l'étude granulométrique des agrégats susmentionnés.

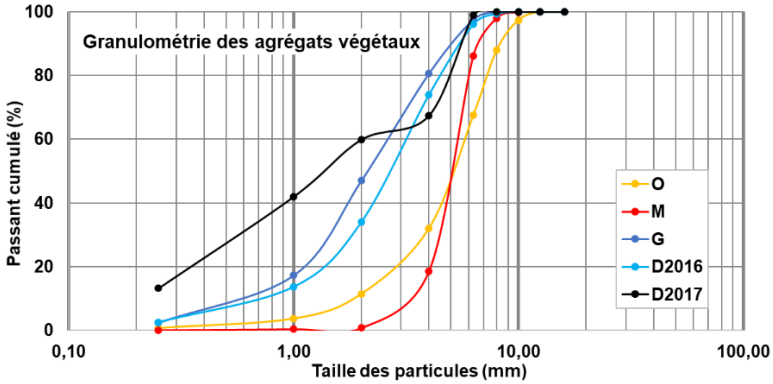


Figure 2.2 - Courbe granulométrique des agrégats étudiés.

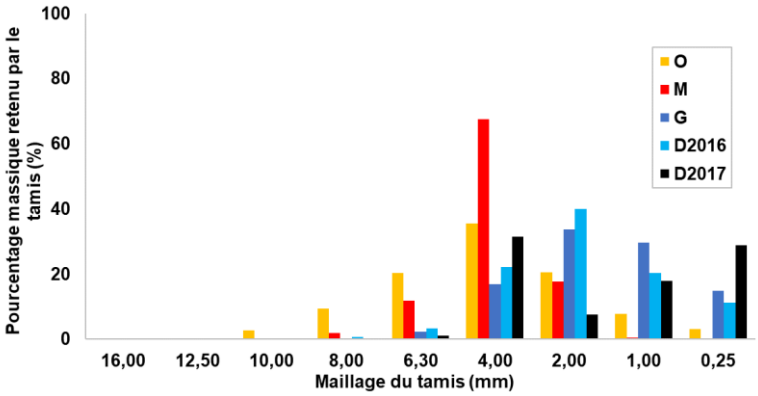


Figure 2.3 - Histogramme de fréquence du retenu de la granulométrie des agrégats étudiés.

Liants

Un seul liant a été utilisé pour les différentes formulations, un liant hydraulique appelé HB pour ses sigles en anglais (*Hydraulic Binder*). Comme il a été mentionné dans le

Chapitre 0, il contient environ 80 % de chaux hydraulique, 10 % de ciment, 5 % de chaux aérienne et 5 % d'autres composants, la formulation exacte n'étant pas disponible car elle appartient au partenaire industriel ParexLanko.

Bétons biosourcés

Les formulations ont été préparées avec l'eau, l'agrégat et le liant dans les proportions suivantes : un ratio massique moelle/liant de 0,20 pour les bétons de tournesol et de 0,16 pour le béton de maïs et un ratio massique eau/liant de 2,92 pour tous les bétons. Les composants ont été mélangés à l'aide d'une bétonnière pendant 3 minutes, au bout desquelles une vérification de la consistance a été effectuée. À la suite de cette vérification, le béton est malaxé pendant 2 minutes additionnelles. L'ordre de mélange des composants a été choisi pour éviter leur ségrégation. Les bétons ont été projetés dans des moules cylindriques de dimensions 16x32 cm. Puisqu'un seul liant est utilisé, les bétons seront nommés d'après l'agrégat qu'ils contiennent. Les échantillons fabriqués sont montrés dans la **Figure 2.4**.

Figure 2.4 - Aperçu des échantillons de béton de moelle fabriqués.

Afin de déterminer les caractéristiques physiques telles que la porosité du squelette, les masses volumiques sèches et du squelette des cinq bétons isolants, le pycnomètre a été utilisé conformément à la norme NF EN 1097-7 2008 (International Organization for Standardization, 2008) et les résultats sont résumés dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 - Récapitulatif des caractéristiques physiques des bétons

Caractéristique	D2016	D2017	M	G	O
Porosité [-]	0,94 ±0,01	0,92 ±0,03	0,92 ±0,01	0,92 ±0,04	0,93 ±0,02
$\boldsymbol{\rho_{sec}}$ **[kg/m³]**	150 ±4	180 ±5	160 ±5	180 ±6	160 ±8
$\boldsymbol{\rho_{squelette}}$**[kg/m³]**	2410	2350	2040	2210	2370

Les valeurs du **Tableau 2.2** montrent la très faible masse volumique apparente des bétons, tandis que la masse volumique du squelette obtenue est conforme à celle habituellement observée pour les bétons biosourcés. Une porosité beaucoup plus importante que celle mesurée sur les bétons de chanvre, comme par exemple (Aït Oumeziane et al., 2014), est observée pour les bétons étudiés.

2.2.1.2. Méthodes

2.2.1.2.1. Test de compression uniaxiale

Pour la détermination de la résistance à la compression (Rc), le module global de déformation (E) des matériaux, trois séries d'essais ont été réalisées selon le protocole décrit dans le **Chapitre 1**, chaque série contenait 5 types de bétons et 3 exemplaires pour chaque type, ce qui fait un total de 15 éprouvettes par série. Deux âges du béton ont été choisis : 60 et 90 jours. Complémentairement, D2016 et M ont été testés à 28 jours et D2017 à 18 mois.

Les échantillons ont été testés avec deux modes de cure différents dans le but d'évaluer l'influence du séchage sur les propriétés mécaniques :

- Cure 1 : suivant les Règles Professionnelles (Association construire en chanvre & Fédération Française du Bâtiment, 2009), les échantillons ont été maintenus à 20 (±3) °C et 50 (±5) %HR pendant 28 jours. Au bout des 7 premiers jours, les faces inférieure et supérieure ont été démoulées. Le démoulage complet a été fait à 28 jours, à la suite duquel les échantillons ont été stockés à 20 (±3) °C et 50 (±5) %HR. Enfin, les échantillons ont été séchés dans une étuve à 50 °C et HR $<$ 4 % pendant 120 heures juste avant l'essai.
- Cure 2 : les échantillons ont été maintenus à 20 (±3) °C et 50 (±5) %HR pendant 28 jours. Au bout des 7 premiers jours, les faces inférieure et supérieure ont été démoulées. Le démoulage complet a été fait à 28 jours, suivi d'un séchage dans une étuve à 50 °C et HR $<$ 4 % jusqu'à l'essai.

La cure de type 2 a été effectuée uniquement sur des échantillons testés à 60 jours à but comparatif avec les échantillons fabriqués selon les RP.

Figure 2.5 - Test de compression simple

2.2.1.2.2. Conductivité thermique (méthode du fil chaud)

La conductivité thermique a été mesurée à l'aide d'un appareil à fil chaud. Des échantillons cylindriques de 16x32cm ont été découpés après 21 jours de fabrication en petits échantillons cylindriques (16x6cm), obtenant 3 échantillons par formulation de béton. Ceux-ci ont été stockés dans une pièce à environ 23 (±5) °C et 60 (±5) %HR pour le séchage à l'air et ont été testés après 100 jours de durcissement dans les mêmes conditions d'humidité et de température.

2.2.1.2.3. Isothermes de sorption (méthode DVS)

Dans cette campagne expérimentale, le système automatisé DVS a été utilisé, pour lequel un porte-échantillon spécifique a été réalisé afin de maximiser la quantité de moelle lors de la mesure. La valeur de la capacité de stockage d'humidité ξ a également été déterminée à partir des courbes isothermes. Les échantillons testés sont des cubes d'environ 1 cm^3 et chaque formulation a été testée 3 fois.

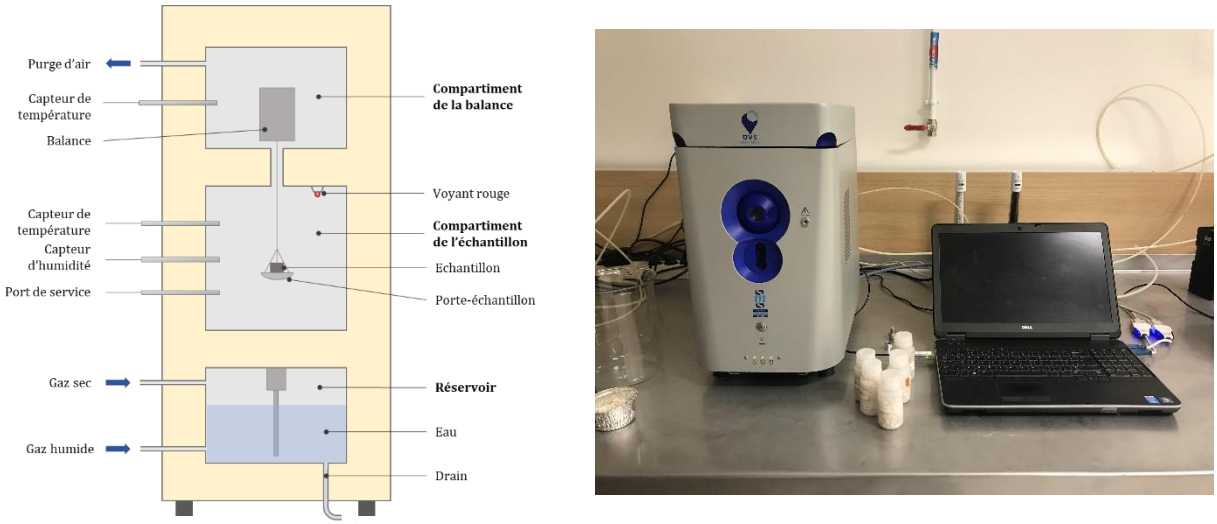


Figure 2.6 - Aperçu du système DVS.

2.2.1.2.4. Perméabilité à la vapeur d'eau (méthode de la coupelle humide)

La perméabilité à la vapeur d'eau a été mesurée en utilisant la méthode de la coupelle humide (*wet cup*). L'humidité relative est fixée à 50 %HR dans l'enceinte climatique et à 85 %HR dans la coupelle, qui contient une solution saline saturée de chlorure de potassium. Les conditions environnementales (50 %HR et 23 °C) ont été constamment contrôlées par l'enceinte climatique.

Pour chaque formulation, des échantillons de 3 épaisseurs (2 cm, 4 cm et 6 cm, comme le montre la **Figure 2.7**) ont été testés.

Figure 2.7 - Essai coupelle humide.

2.2.1.2.5. Comportement dynamique des échanges hygroscopiques (Moisture Buffering Value)

Afin de quantifier le potentiel hygroscopique d'un milieu poreux, la méthode *Moisture Buffering Value* ou MBV a été appliquée. Des échantillons cylindriques de 16x32 cm ont été préalablement découpés pour obtenir 3 échantillons identiques de taille 16x6 cm pour chaque type d'isolant, ce qui fait un total de 15 échantillons. Le résultat pour chaque formulation est la moyenne arithmétique des trois échantillons.

Figure 2.8 - Essai MBV.

2.2.2. Résultats et discussion

2.2.2.1. Résultats

2.2.2.1.1. Résistance à la compression uniaxiale et module global de déformation

Les résultats du test de compression uniaxiale sont présentés dans le **Tableau 2.3** et le **Tableau 2.4**. Pour chaque valeur, trois tests de compression uniaxiale ont été effectués. Le module global de déformation (E) est estimé sur la partie linéaire de la courbe contrainte axiale - déformation axiale.

Des essais de compression à 28 jours ont été effectués pour estimer l'évolution de la résistance mécanique pendant l'étape d'hydratation du liant.

Tableau 2.3 - Récapitulatif de la résistance à la compression moyenne

Rc **[kPa]**		**D2016**	**D2017**	**M**	**G**	**O**
Cure 1	**28 jours**	95,5 ±11	-	112 ±19	-	-
	60 jours	265,4 ±13	270,7 ±15	237,9 ±27	241,4 ±21	279,4 ±27
	90 jours	292,5 ±32	260,2 ±25	226,3 ±19	227,9 ±24	285,3 ±16
	18 mois	-	329,9 ±31	-	-	-
Cure 2	**60 jours**	163,5 ±22	225 ±17	205 ±25	173,8 ±21	252,5 ±29

Tableau 2.4 - Récapitulatif des valeurs moyennes du module global de déformation

E **[MPa]**		**D2016**	**D2017**	**M**	**G**	**O**
Cure 1	**28 jours**	-	-	-	-	-
	60 jours	10,0 ±0,8	8,5 ±1,1	7,5 ±1,0	9,6 ±0,9	8,6 ±1,2
	90 jours	15,9 ±1,0	7,9 ±0,6	7,5 ±0,8	9,6 ±0,8	8,8 ±1,3
	18 mois	-	11,4 ±0,8	-	-	-
Cure 2	**60 jours**	9,5 ±0,9	7,9 ±0,6	9,6 ±0,5	6,9 ±1,0	10,8 ±1,1

2.2.2.1.2. Conductivité thermique

Les résultats de la conductivité thermique sont présentés dans le tableau ci-dessous, qui présente la moyenne des 3 valeurs mesurées.

Tableau 2.5 - Conductivité thermique des matériaux étudiés

Formulations	**D2016**	**D2017**	**M**	**G**	**O**
λ **[W/m·K]**	0,065 ±0,002	0,083 ±0,002	0,075 ±0,003	0,074 ±0,002	0,064 ±0,002

Les conductivités thermiques des bétons de moelle mesurées au cours de cette étude se situent entre 0,064 et 0,083 W/m·K. Il est important de rappeler que les mesures ont été effectuées par la méthode du fil chaud. Cette technique est connue pour surestimer la conductivité thermique des matériaux biosourcés (Billy Seng et al., 2016), car les résultats dépendent de la taille des irrégularités en surface (Merckx et al., 2012) et de la planéité des échantillons (Zach et al., 2009). L'explication est que, quand la taille caractéristique de la mesure est trop petite par rapport à la taille caractéristique des « vides » de

l'échantillon, le fil chaud ne prend pas en compte la contribution d'une partie de la porosité et donne une valeur trop élevée.

Cependant, on suppose que la méthode du fil chaud peut être utilisée à des fins de comparaison.

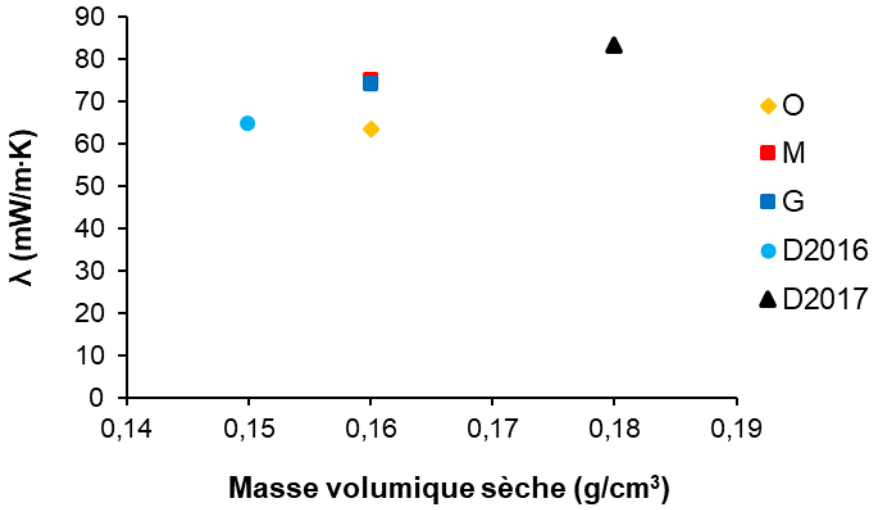


Figure 2.9 - Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche des 5 bétons.

Comme le montre la **Figure 2.9**, quel que soit l'agrégat utilisé, les valeurs de conductivité thermique restent assez proches et semblent suivre la même variation avec la masse volumique sèche.

2.2.2.1.3. Isothermes de sorption

La courbe d'adsorption-désorption a été tracée pour les 5 bétons. La **Figure 2.10** montre les résultats.

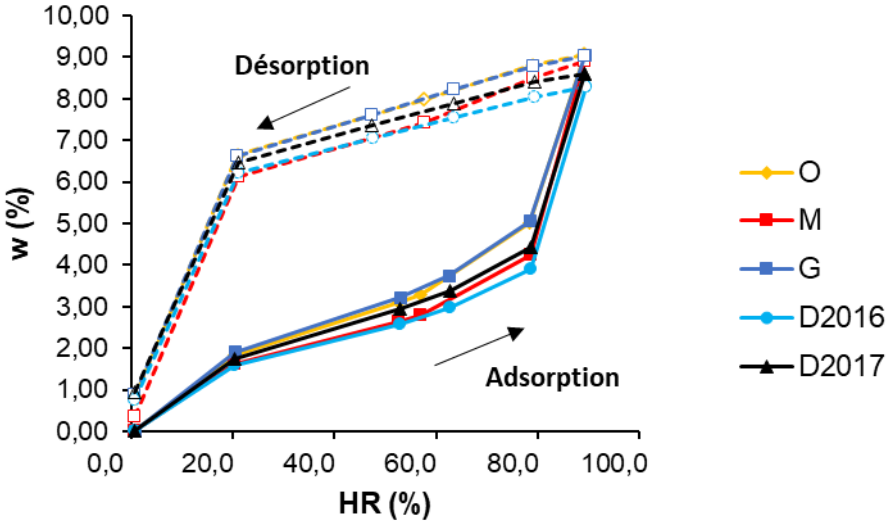


Figure 2.10 - Courbes d'adsorption (lignes pleines) et de désorption (lignes pointillées) pour les 5 bétons.

Toutes les courbes d'adsorption-désorption obtenues à l'aide du système DVS présentent une forme similaire, même s'il y a de légères différences dans les quantités d'eau absorbées par les cinq bétons.

On observe une hystérésis entre les isothermes d'adsorption et de désorption. Cette différence entre les courbes d'adsorption et de désorption a déjà été étudiée dans le béton de chanvre (Collet & Pretot, 2012; A Evrard & Herde, 2005; Shea et al., 2012), dans le bois (Merakeb et al., 2009), dans les films d'amidon de sagoutier (Bajpai et al., 2011), dans le béton (Baroghel-Bouny, 2007) et dans la bentonite (Mihoubi & Bellagi, 2006). L'évolution de la capacité de stockage d'humidité en fonction de l'humidité relative des 5 bétons est présentée à la **Figure 2.11** pour la méthode DVS.

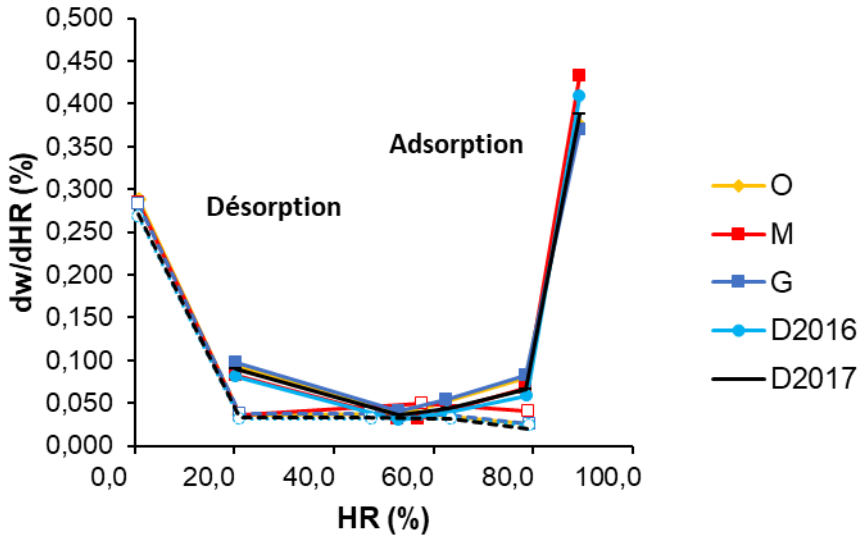


Figure 2.11 - Dérivée des courbes d'adsorption (lignes pleines) et de désorption (lignes pointillées) pour les bétons.

La pente de sorption semble varier fortement avec l'humidité relative. Sachant que les cycles d'hygrométrie réalistes dans les bâtiments ne dépassent généralement pas 75 %HR et ne descendent pas en dessous de 33 %HR, une pente moyenne peut être déterminée pour les résultats expérimentaux dans cette plage. Ces résultats sont présentés dans le **Tableau 2.6**.

Tableau 2.6 - Capacité de stockage d'humidité moyenne entre 20 %HR et 60 %HR

Formulations	D2016	D2017	M	G	O
$\xi_{adsorption}$ [-]	0,053 ±0,003	0,035 ±0,004	0,064 ±0,003	0,057 ±0,005	0,054 ±0,004
$\xi_{désorption}$ [-]	0,033 ±0,0003	0,029 ±0,003	0,044 ±0,003	0,041 ±0,004	0,038 ±0,003
$\xi_{adsorption}$ [kg/m³]	7,97 ±0,43	6,32 ±0,75	10,20 ±0,52	10,24 ±0,97	8,57 ±0,58
$\xi_{désorption}$ [kg/m³]	4,99 ±0,05	5,14 ±0,56	7,01 ±0,50	7,38 ±0,64	6,07 ±0,41

2.2.2.1.4. Perméabilité à la vapeur

La **Figure 2.12** montre les variations de masse de l'ensemble constitué par la coupelle en plexiglass, la solution saline et l'échantillon de moelle en fonction du temps. On observe un comportement similaire des trois échantillons testés appartenant à la même formulation. Tous les échantillons ont atteint un état stable après une seule journée. Pendant cette phase d'équilibre, avec un gradient de pression de vapeur homogène, une relation linéaire entre le flux de vapeur et les gradients de pression permet de calculer la perméabilité apparente à la vapeur d'eau du matériau.

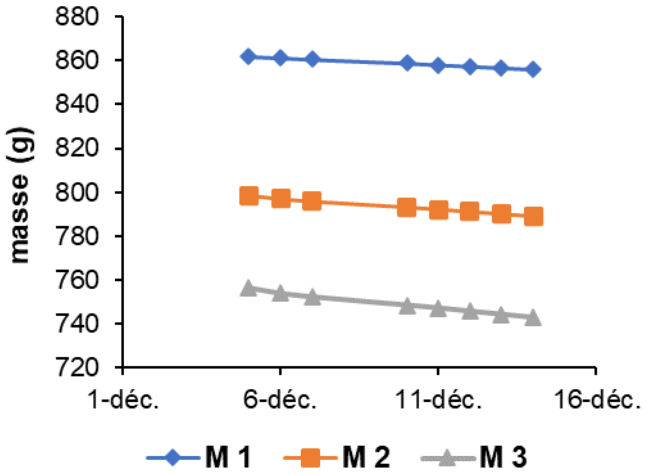


Figure 2.12 - Variation de masse des coupelles humides pour les échantillons de maïs.

Une fois que la pente de la droite de régression est déterminée à partir des résultats des coupelles humides, la perméabilité à la vapeur d'eau δ_p [kg/s·m·Pa] de chaque échantillon peut être déduite en utilisant l'approche décrite dans (McGregor et al., 2017). Le facteur de résistance à la vapeur (μ) peut être déterminé car il est souvent utilisé à la place de la perméabilité à la vapeur d'eau. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.7**.

Tableau 2.7 - Valeurs pour le coefficient de résistivité au passage de la vapeur μ

Formulations	D2016	D2017	M	G	O
μ [-]	4,7 ±0,3	4,9 ±0,5	5,1 ±0,6	5,5 ±0,6	5,9 ±0,4

2.2.2.1. Comportement dynamique des échanges hygroscopiques

La figure ci-dessous montre les variations de masse enregistrées pour le dernier cycle du test de tampon hydrique avec les susmentionnés paramètres de cycle de 8h à 75 %HR et de 16h à 33 %HR. Ces variations ont été normalisées par la surface exposée.

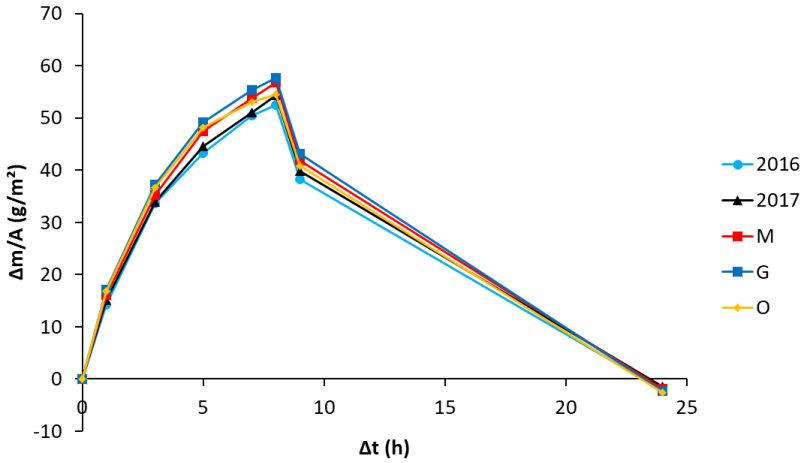


Figure 2.13 - Evolution de la masse des échantillons pendant le cycle MBV.

En utilisant la définition pratique du MBV donnée sur NordTest, la valeur tampon hydrique est mesurée pour chaque isolant et les résultats sont résumés dans la **Figure 2.13** et la **Figure 2.14**.

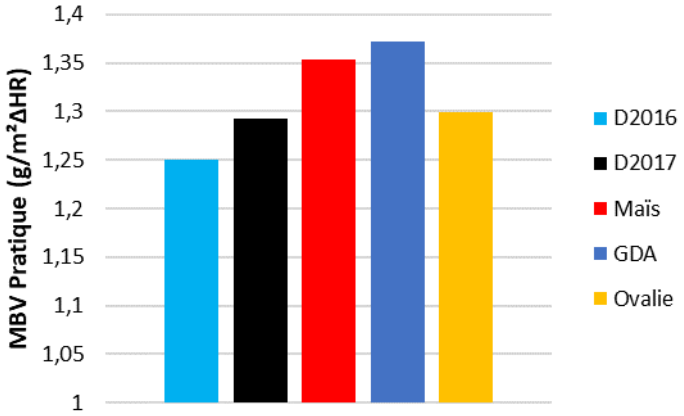


Figure 2.14 - Valeur moyenne de MBV pour différents bétons à base de moelle.

La capacité d'humidité, ξ, peut être déterminée expérimentalement en utilisant la section pseudo-linéaire de l'isotherme de sorption qui se trouve dans la zone intermédiaire de l'isotherme (Hall & Allinson, 2009). Cette dernière indique la teneur en humidité adsorbée par le matériau pour atteindre l'équilibre à la pression de vapeur du milieu environnant.

A partir de ce point, et pour vérifier la validité de la perméabilité à la vapeur corrigée et de $MBV_{pratique}$ obtenue précédemment, il a été décidé d'utiliser ces valeurs afin d'estimer la valeur tampon hydrique par un calcul analytique indirect. Par la suite, le résultat analytique sera comparé avec le résultat expérimental déterminé dans cette étude.

La solution analytique pour le test MBV a été développée dans (Rode et al., 2007). Elle est considérée comme idéale pour le test MBV. Elle fournit l'estimation de la valeur

tampon hydrique en utilisant **(2.1)**, où t_p est la période correspondant au cycle d'adsorption-désorption d'humidité (en heures) et b_m est l'effusivité hydrique [kg/m^3] :

$$MBV_{idéal} \approx 0{,}00568 \cdot P_{v,sat} \cdot b_m \cdot \sqrt{t_p} \qquad (2.1)$$

L'effusivité hydrique constitue une possibilité théorique d'exprimer le taux d'humidité absorbé par un matériau lorsqu'il est soumis à une augmentation soudaine de l'humidité de surface, et elle est liée à la perméabilité à la vapeur d'eau et à la capacité d'humidité du matériau comme suit :

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \xi}{P_{v,sat}}} \qquad (2.2)$$

En utilisant les résultats du DVS, la valeur de ξ est obtenue, qui représente la pente de la phase linéaire de la courbe de sorption. Nous obtenons ainsi :

Tableau 2.8 - MBV mesuré et calculé pour les 5 formulations étudiées

Formulations	**D2016**	**D2017**	**M**	**G**	**O**
$\boldsymbol{MBV_{pratique}}$ **[g/(m²·%HR)]**	1,25 ±0,06	1,29 ±0,06	1,35 ±0,03	1,3 ±0,05	1,37 ±0,07
$\boldsymbol{MBV_{idéal}}$ **[g/(m²·%HR)]**	1,14	1,37	1,18	1,31	1,24

2.2.2.2. Discussion

En ce qui concerne la première partie de l'étude, les résultats mécaniques, la période de récolte et l'origine géographique n'ont aucun effet sur la résistance tandis que la période de récolte n'a qu'un faible impact sur le module global de déformation. A première vue, on peut constater que le matériau étudié est compatible avec les spécifications du guide français de construction en chanvre pour l'utilisation en toiture uniquement. Quelle que soit la formulation, il est évident que la valeur de la résistance à la compression augmente de manière significative entre 28 jours et 60 jours dans tous les cas, puis légèrement entre 60 jours et 90 jours. Ce comportement est similaire à celui du béton de chanvre, comme le concluent (Gross & Walker, 2014). De manière surprenante, les essais à 18 mois, seulement réalisés pour la formulation D2017, ont mis en évidence une augmentation significative de la résistance à la compression et du module de raideur. Ce comportement à plus long terme mériterait donc d'être analysé plus en détail.

En outre, on peut voir que la cure a une influence sur les propriétés mécaniques avec une baisse de la résistance comprise entre 10 et 30 % pour les échantillons ayant été séchés à 50 °C. Le module global de déformation est également influencé par la méthode de séchage : une légère diminution du module est observée, sauf pour le béton de maïs M et pour O, pour les échantillons qui ont été séchés à 50 °C. On peut conclure que le protocole de conditionnement joue un rôle important dans la performance mesurée du

matériau. Il apparaît donc nécessaire de définir un protocole de cure adapté aux bétons de moelle, qui serait cohérent avec les conditions du site. Selon (Zadeh & Bobko, 2014), la cure à température élevée intensifierait l'échange d'eau entre les agrégats végétaux et la matrice du liant, ce qui détériorerait la liaison du béton. Ce comportement est associé à la formation d'une zone de transition plus poreuse et à une plus mauvaise imbrication entre la pâte et l'agrégat.

En ce qui concerne la conductivité thermique, les valeurs obtenues sont presque les mêmes mais on observe une variation avec la masse volumique sèche des échantillons. Cette variation semble cependant indépendante de l'origine et de l'année de récolte des agrégats. Il est à noter que les tests ont été effectués à T = 27 (±1) °C et 60 (±0,1) %HR. Ces conditions sont plus proches des conditions réelles de construction que si le matériau était complètement sec. Selon (Mazhoud et al., 2017), la conductivité thermique change avec la température de l'environnement et aussi avec la teneur en eau du matériau. Il serait donc intéressant de poursuivre l'expérimentation pour confirmer cette prémisse sur les matériaux étudiés.

Quant aux isothermes de sorption, l'hystérésis observée sur la **Figure 2.10** pour les matériaux biosourcés pour une humidité relative de 80 %HR est comprise entre 3,5 % et 4 %. Cette boucle d'hystérésis assez importante, qui est couramment observée pour les matériaux biosourcés (A. Fabbri & McGregor, 2017), peut notamment être expliquée par l'approche des domaines indépendants développée par (Derluyn et al., 2012) et qui suppose que l'humidité relative à laquelle les processus d'adsorption et de désorption se produisent sur les sites de sorption au sein du matériau dépend de leur géométrie et de leur composition chimique.

Il est intéressant de noter que les cinq bétons ont un comportement hystérétique très similaire. De plus, le **Tableau 2.6** montre que la capacité de stockage ne dépend pas du type d'agrégat.

Comme on peut le voir dans le **Tableau 2.7**, les résistances à la vapeur d'eau des échantillons D2016 et D2017 sont presque identiques malgré la différence d'année de récolte, qui est également comparable à la valeur du maïs, tandis que G et O ont une résistance un peu plus élevée.

D'après les résultats de la valeur tampon hydrique (MBV), on peut noter que la variabilité des agrégats n'a pas d'influence significative sur la valeur du tampon hydrique, même si différentes méthodes de récolte sont utilisées dans les différentes campagnes ainsi que différents types et sources d'agrégats. La moyenne des valeurs tampon des variétés de moelle est de 1,248 g/m^2·%HR et l'écart type ne dépasse pas 0,0736 g/m^2·%HR, ce qui représente environ 6 % de la moyenne. Ce résultat est logique étant donné que la valeur de $MBV_{idéal}$ est calculée à partir de la capacité de stockage (ξ), qui varie à peine en fonction des résultats des isothermes de sorption. Pour comparer avec d'autres matériaux de construction courants, la classification proposée par (Rode et al., 2007), qui

définit cinq plages allant de « négligeable » à « excellent » pour les valeurs tampon hydrique pratiques, a été utilisée. Cette classification des matériaux étudiés (obtenue avec des échantillons de la même épaisseur de 7 cm) en comparaison avec d'autres matériaux testés dans le cadre du projet NordTest, montre que les matériaux étudiés ont une "bonne" performance de tampon hydrique.

2.2.3. Conclusion

L'objectif de cette étude était principalement d'étudier l'impact de l'origine géographique et de l'année de récolte des agrégats végétaux sur les propriétés mécaniques et hygrothermiques utilisées pour les bétons isolants légers. L'exploitation des résultats obtenus permet de conclure que la variabilité des agrégats a un impact limité sur les performances mécaniques et hygroscopiques du béton isolant à l'échelle du matériau.

En conclusion, des tests supplémentaires doivent encore être réalisés afin de parvenir à une évaluation complète de l'impact de l'origine des granulats sur le béton d'origine végétale.

2.3. Impact du liant et de la formulation

2.3.1. Matériaux et méthodes

2.3.1.1. Agrégats végétaux

Dans le cadre de cette campagne expérimentale, trois types d'agrégats végétaux ont été étudiés : la chènevotte (H) provenant du projet IBIS, la moelle de tournesol (S) provenant de la coopérative Dauphinoise et la moelle de maïs (M) provenant de la coopérative agricole Ovalie. Comme le montre la **Figure 2.15**, la moelle de tournesol et la moelle de maïs contiennent des traces d'écorces. La chènevotte provient d'une coopérative agricole basée dans le nord de la France. La chènevotte en vrac avait une masse volumique de 100 kg/m^3, les grains ayant une largeur moyenne de 4,1 mm et une longueur moyenne de 7,6 mm. La moelle de tournesol provient d'une coopérative agricole basée dans le sud-est de la France. La masse volumique apparente sans tassement ρ_{app} de cette moelle de tournesol était d'environ 14 kg/m^3, le diamètre moyen des grains était d'environ 4,2 mm. La moelle de maïs provient d'une coopérative agricole basée dans l'ouest de la France au climat plus océanique. La moelle de maïs avait une masse volumique apparente sans tassement ρ_{app} de 18 kg/m^3, une largeur moyenne de 2,2 mm et une longueur moyenne de 9,6 mm. La masse volumique des agrégats a été déterminée selon le protocole proposé par (Amziane et al., 2017), tandis que les dimensions moyennes des agrégats ont été calculées par une courbe granulométrique de tamisage pour la moelle et par une analyse granulométrique d'image 2D développée par (Ceyte, 2008) pour la chènevotte.

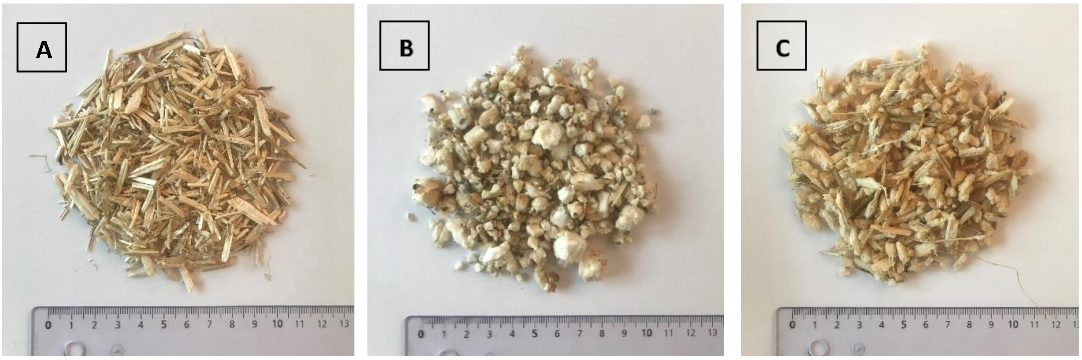


Figure 2.15 - Granulats utilisé dans cette campagne expérimentale (A) chènevotte, (B) moelle de tournesol avec des traces d'écorce et (C) moelle de maïs avec des traces d'écorce.

2.3.1.2. Liants

Trois types de liants différents ont été utilisés dans cette campagne. Le premier, nommé C1, est du PF70, un liant à base de chaux calcique présenté dans le **Chapitre 0**. Le deuxième, appelé C2, est du Calco, qui est composée de chaux hydraulique, de charges calcaires, d'adjuvants hydrophobes et rhéologiques et qui a également été présenté préalablement. La principale différence entre ces deux liants est que C1 contient de la chaux aérienne et fait sa prise en contact avec l'air, lorsque C2 contient de la chaux hydraulique qui fait sa prise en présence d'eau. Par conséquent, la prise du C1 est généralement plus lente, comme il a été expliqué dans le **Chapitre 0**, **§0.1.3.1**. Le dernier, nommée HB et qui a déjà été présenté dans **§2.2.1.1**, est un mélange de ciment et de chaux avec d'autres additifs.

Tableau 2.9 - Appellation des liants.

Composition du liant	Appellation
PF70 - 75 % chaux aérienne, 15 % chaux hydraulique, 10 % de pouzzolane	C1
Calco - chaux hydraulique naturelle, charge calcaire, adjuvant hydrofuge, adjuvant rhéologique, sable	C2
Hydraulic Binder – ciment, chaux et autres	HB

2.3.1.3. Bétons biosourcés

Tous les échantillons ont été fabriqués dans les mêmes conditions (50 %HR et 23 °C) et la composition de toutes les formulations utilisées est résumée dans le **Tableau 2.10**. Les échantillons ont été projetés dans des moules cylindriques de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur en une seule couche, sauf pour le C2-H*, qui a été fabriqué en 6 couches d'environ 5 cm chacune. Chaque couche a été compactée à 0,05 MPa selon les règles professionnelles de construction en chanvre (Association construire en chanvre & Fédération Française du Bâtiment, 2009). Il est rappelé que H, S et M sont les agrégats expliqués dans **§2.3.1.1**, plus précisément la chènevotte, la moelle de tournesol et la

moelle de maïs respectivement, tandis que C1, C2 et HB sont les liants expliqués dans **§2.3.1.2**. C2-H* correspond à une formulation qui a été compactée.

Tableau 2.10 - Récapitulatif de la formulation et du ratio massique

Type de liant	**C1**	**C2**				**HB**		
Type d'agrégat	H	H	H*	S	H+S	H	S	M
Dénomination	C1-H	C2-H	C2-H*	C2-S	C2-H+S	HB-H	HB-S	HB-M
Chènevotte/liant [-]**	0,33	0,33	0,33	0	0,17	0,33	0	0
Moelle/liant [-]**	0	0	0	0,10	0,06	0	0,20	0,16
Eau/liant [-]**	0,81	0,88	0,88	0,80	1,07	0,88	2,92	2,92
Proportion massique de chènevotte [-]	0,15	0,15	0,15	0	0,07	0,15	0	0
Proportion massique de moelle [-]	0	0	0	0,05	0,03	0	0,05	0,04

* correspond à une formulation qui a été densifiée à l'aide d'une dame.

** correspond à un rapport de masse entre les constituants

Un pycnomètre a été utilisé afin de déterminer les propriétés physiques telles que la porosité du squelette, la masse volumique sèche et du squelette des différentes formulations selon la norme NF EN 1097-7 2008 (International Organization for Standardization, 2008). Les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.11**.

Tableau 2.11 - Récapitulatif des caractéristiques physiques des bétons étudiés

Formulation	**C1-H**	**C2-H**	**C2-H***	**C2-S**	**C2-H+S**	**HB-H**	**HB-S**	**HB-M**
ϕ **[-]**	0,76 ±0,02	0,79 ±0,01	0,70 ±0,02	0,77 ±0,01	0,70 ±0,02	0,78 ±0,02	0,94 ±0,01	0,92 ±0,01
ρ_{sec} **[kg/m³]**	470 ±5	440 ±6	600 ±10	550 ±5	590 ±6	410 ±8	150 ±4	160 ±5
$\rho_{squelette}$ **[kg/m³]**	1960	2090	2000	2390	1970	1860	2500	2000

Les formulations C2-H*, C2-H+S et C2-S visaient à tester l'impact de l'agrégat sur la performance. En effet, elles ont été fabriquées avec différents agrégats mais avec le même liant, et leur masse volumique sèche est dans la même plage de valeurs. La formulation C2-H, qui est similaire à C2-H*, a été faite pour tester l'impact d'une variation modérée de la masse volumique. L'impact du liant sera évalué par l'analyse comparative des résultats des formulations C1-H, C2-H et HB-H.

Enfin, deux formulations légères, à savoir HB-S et HB-M, ont été fabriquées afin de tester la capacité des granulats de moelle à être utilisés dans des bétons légers à hautes performances thermiques. La **Figure 2.16** montre un spécimen de HB-S et de C1-H.

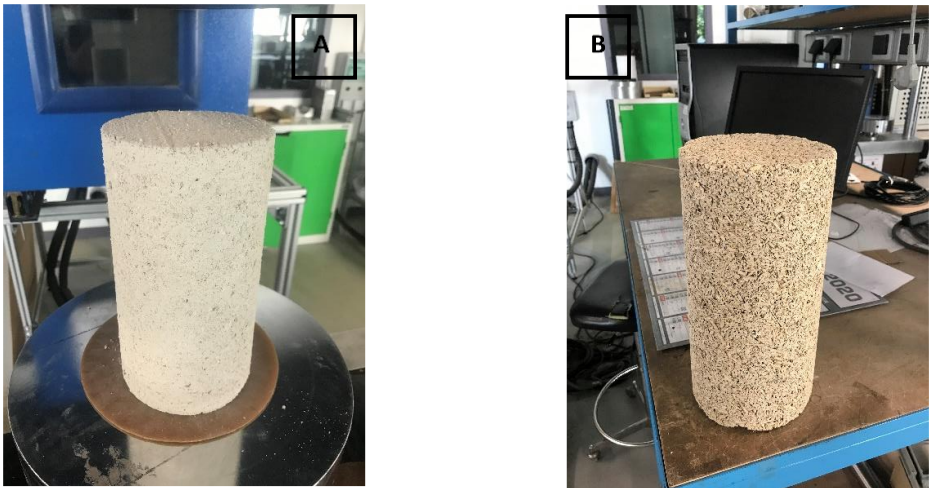


Figure 2.16 - Un spécimen de HB-S de dimensions 16x32 cm (A) et un spécimen de C1-H de dimensions 16x32 cm (B)

2.3.2. Etude de la microstructure

2.3.2.1. Surface spécifique (BET)

La surface spécifique des liants, des agrégats et des couples liants agrégats a été déterminée selon la méthode décrite dans l'**Annexe D.1**, les résultats étant présentés dans le **Tableau 2.12**.

Tableau 2.12 - Résultats de surface spécifique.

Matériau	**Surface spécifique [m²/g]**
Bille en verre	0,71 ± 0,02
Agrégat S	95,67 ± 2,89
Agrégat M	52,87 ± 1,52
Agrégat H	12,80 ± 0,28
Liant HB	6,86 ± 0,21
Liant C1	11,33 ± 0,19
Liant C2	10,78 ± 0,26
HB-S	11,86 ± 0,30
HB-M	10,51 ± 0,24
C1-H	8,13 ± 0,32
C2-H*	9,13 ± 0,24
C2-S	8,71 ± 0,21
C2-H+S	9,27 ± 0,35
H98-G	4,99 ± 0,17
H98-UK	11,73 ± 0,28
H98-F	5,64 ± 0,15
CLIN-UK	3,72 ± 0,11
CLIN-G	14,06 ± 0,30
C1-F	8,34 ± 0,23

Plusieurs familles de matériaux ont été étudiées. Tout d'abord, la détermination de la valeur pour la bille en verre, un matériau non poreux, permet de vérifier le bon fonctionnement de l'appareil. Ensuite, on s'intéresse à la surface spécifique des matériaux présentés dans ce chapitre, commençant par les agrégats : la moelle de tournesol (S), la moelle de maïs (M) et la chènevotte (H). Les résultats obtenus montrent que la moelle a une surface spécifique qui est substantiellement plus grande que celle de la chènevotte, entre 7 et 8 fois dans le cas de la moelle de tournesol et environ 4 fois pour la moelle de maïs. On observe également que la moelle de tournesol a une surface spécifique quasiment 2 fois plus grande que la moelle de maïs. Quant aux liants HB, C1 et C2, leur surface spécifique varie entre 6,86 et 11,33 m^2/kg, des valeurs légèrement en-dessous de la surface de la chènevotte (12,80 m^2/kg) mais sensiblement plus basses que celle de la moelle. Le liant HB présente la surface la plus petite parmi les trois. Les bétons formés à partir de ces composants (HB-S, HB-M, C1-H, C2-H*, C2-S et C2-H+S) présentent des valeurs de surface spécifique entre 8,13 et 11,86 m^2/kg. Ils présentent, à l'exception de HB-S et HB-M, des valeurs qui sont moindres que celles des composants, mais proches de la valeur du liant correspondant. Cela pourrait suggérer qu'une partie de la nano-porosité des composants, qui est majoritairement responsable des fortes surfaces spécifiques, n'est plus présente ou n'est plus accessible dans le mélange liant-agrégat. Dans le cas de HB-S et HB-M (11,86 et 10,51 m^2/kg), il semble que la présence de moelle compense partiellement la basse surface spécifique de HB (6,86 m^2/kg).

La troisième famille de matériaux sont les bétons à base de chènevotte qui seront étudiés lors du **Chapitre 3**, appartenant à la campagne expérimentale développée lors de la thèse de P. Glé : H98-G, H98-UK, H98-F, CLIN-UK, CLIN-G et C1-F. Leurs valeurs de surface spécifique varient entre 3,72 et 14,06, un écart plus important que dans la famille de bétons précédente et dont la limite inférieure est notablement plus basse. Pour un même type de liant, par exemple, CLIN, on trouve des valeurs très disparates (3,72 m^2/kg pour CLIN-UK et 14,06 pour CLIN-G). Cela s'applique aussi pour un même type de chènevotte (11,73 m^2/kg pour H98-UK et 3,72 pour CLIN-UK).

2.3.2.2. Distribution de la taille des pores (BJH)

Des travaux comme (Lenormand et al., 2017) et (T. T. Nguyen, 2010) mentionnent que les bétons biosourcés possèdent des pores intragranulaires et intergranulaires dont l'échelle va de 1 µm à 1 cm, approximativement. Cependant ce sont uniquement les pores qui peuvent être observés au microscope ou à l'œil nu et ils appartiennent tous au domaine des macropores selon la définition de (Kenneth S W Sing, 1995) présentée en **Annexe D** (pour rappel, micropores en dessous de 2 nm, mesopores entre 2 et 50 nm et macropores au-dessus de 50 nm). Dans le présent sous-chapitre, on s'intéresse aux micropores, mesopores et à une petite partie des macropores, qui peuvent avoir un impact important sur le comportement des matériaux en présence et d'humidité qui doivent être étudiés à travers des techniques spécialisées comme le BJH à l'azote à 77K. Pour rappel,

cette technique permet d'étudier la distribution de la taille des pores en dessous de 100 nm.

Dans un premier temps, les résultats BJH des agrégats, déterminés selon la méthode décrite dans l'**Annexe D.2**, sont présentés dans la **Figure 2.17** et **Figure 2.18**.

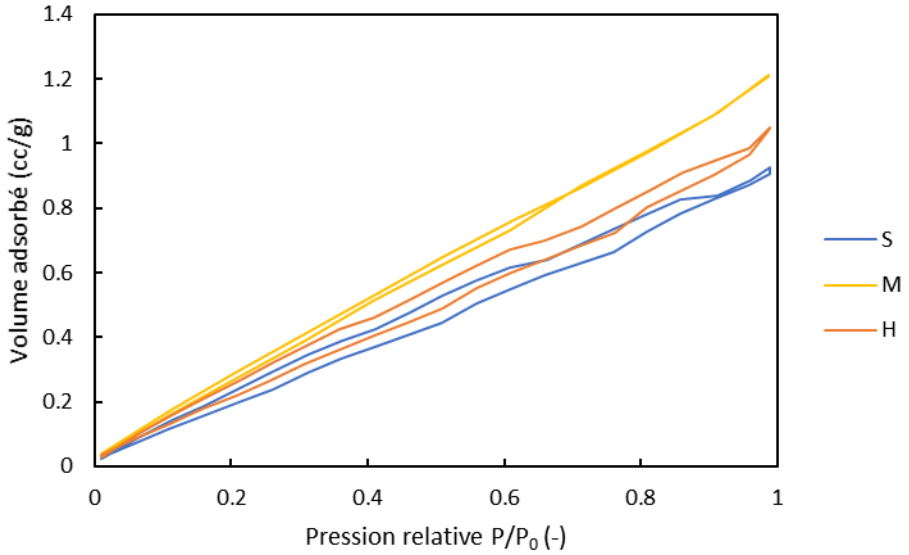


Figure 2.17 - Isothermes de sorption d'azote obtenues par la méthode BJH – agrégats S, M, H.

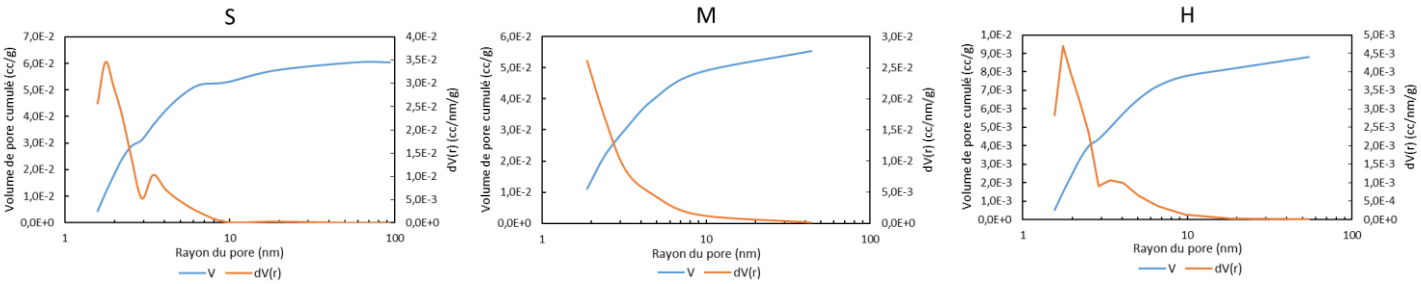


Figure 2.18 - Volume cumulé (bleu) et dérivée du volume (orange) en fonction du rayon de pore, obtenu par la méthode BJH – agrégats S, M, H.

La moelle de tournesol (S), la moelle de maïs (M) et la chènevotte (H) présentent toutes les trois des isothermes de sorption sans changement de pente, ce qui indique une adsorption monocouche uniquement, pas multicouche. De plus, les trois cycles de sorption présentent très peu d'hystérésis, un phénomène lié à l'adsorption capillaire. L'hystérésis est particulièrement réduite pour la moelle de maïs. Les isothermes des agrégats sont donc proches du Type II, lié aux matériaux macroporeux. Quant à la taille des pores, on observe un pic principal à 1,75 nm, un pic secondaire à 3,43 nm et un volume total des pores détectés de 0,060 cc/g pour S. Dans le cas de M, la distribution est décroissante, le maximum apparait à 1,88 nm (rayon minimal analysé) et le volume total des pores est de 0,055 cc/g. Pour H, un seul pic est présent, celui-ci étant à 1,75 nm. Le volume total est de 0,009 cc/g. Dans les trois cas, le volume total des pores est assez réduit, particulièrement si l'on prend en compte la basse masse volumique de ces agrégats.

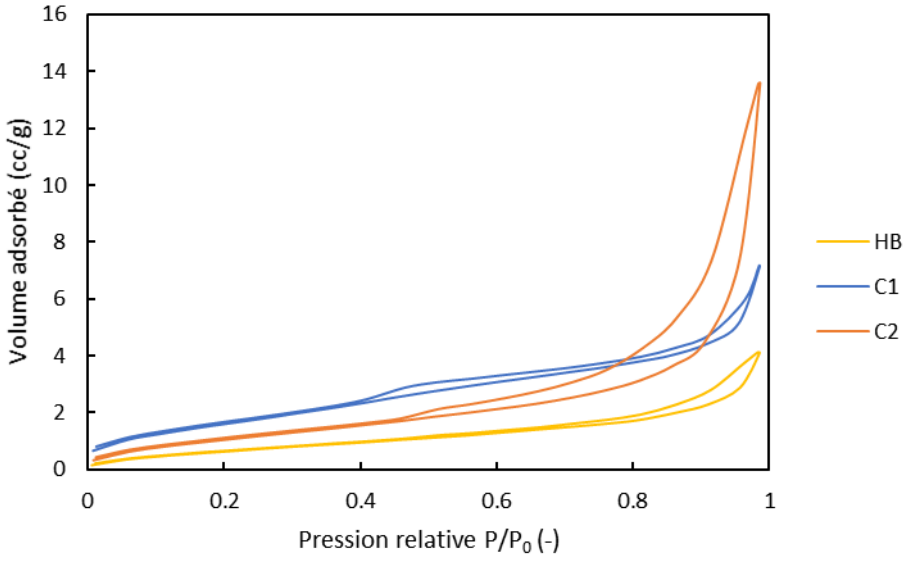


Figure 2.19 - Isothermes de sorption d'azote obtenues par la méthode BJH – liants HB, C1, C2.

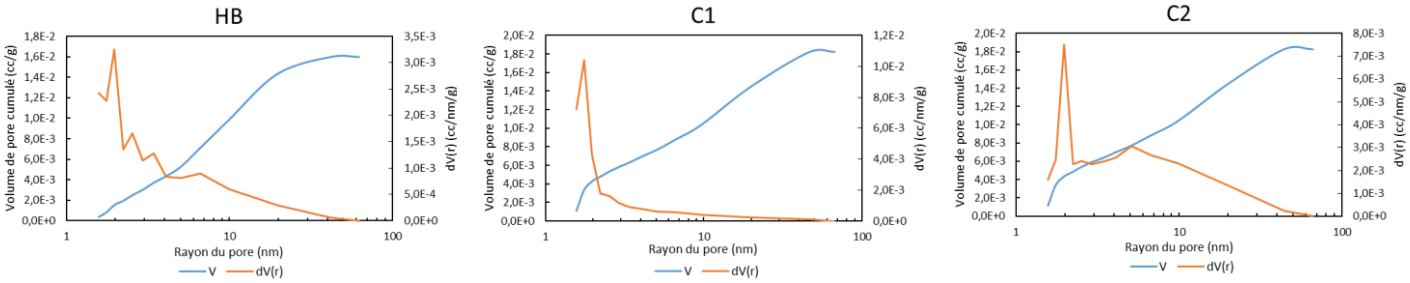


Figure 2.20 - Volume cumulé (bleu) et dérivée du volume (orange) en fonction du rayon de pore, obtenu par la méthode BJH – liants HB, C1, C2.

Ensuite, la **Figure 2.19** et **Figure 2.20** montrent les résultats BJH pour les liants HB, C1 et C2. Cette fois-ci, les isothermes présentent un changement de pente, qui témoigne de la présence d'absorption monocouche et multicouche. Ces isothermes de forme plus classique se trouvent entre les Types II et IV, car elles présentent que très peu d'hystérésis. Lorsque HB et C1 sont plus proches du Type II, C2 appartient plutôt au Type IV, ce qui indique la présence de condensation par capillarité. La répartition de la taille des pores de HB présente plusieurs pics, le plus important à 1,97 nm, suivi de deux autres moins importants à 2,56 et 3,46 nm, le volume total étant de 0,015 cc/g. C1 présente un seul pic à 1,75 nm, avec très peu de pores d'autres tailles et un volume total de 0,018 cc/g. En revanche, la répartition de taille de pores de C2 est plus homogène, avec un seul pic à 1,97 nm et un volume total de 0,057 cc/g.

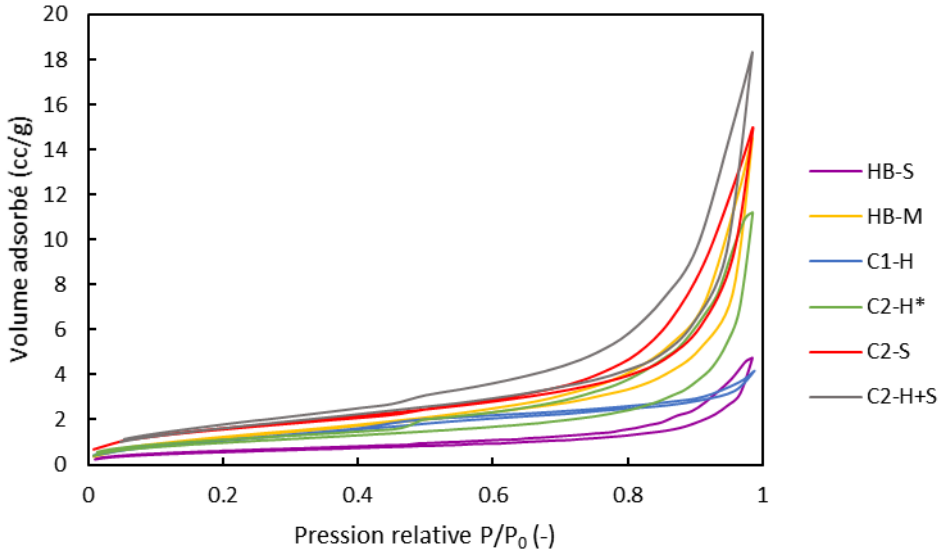


Figure 2.21 - Isothermes de sorption d'azote obtenues par la méthode BJH – bétons HB-S, HB-M, C1-H, C2-H*, C2-S, C2-H+S.

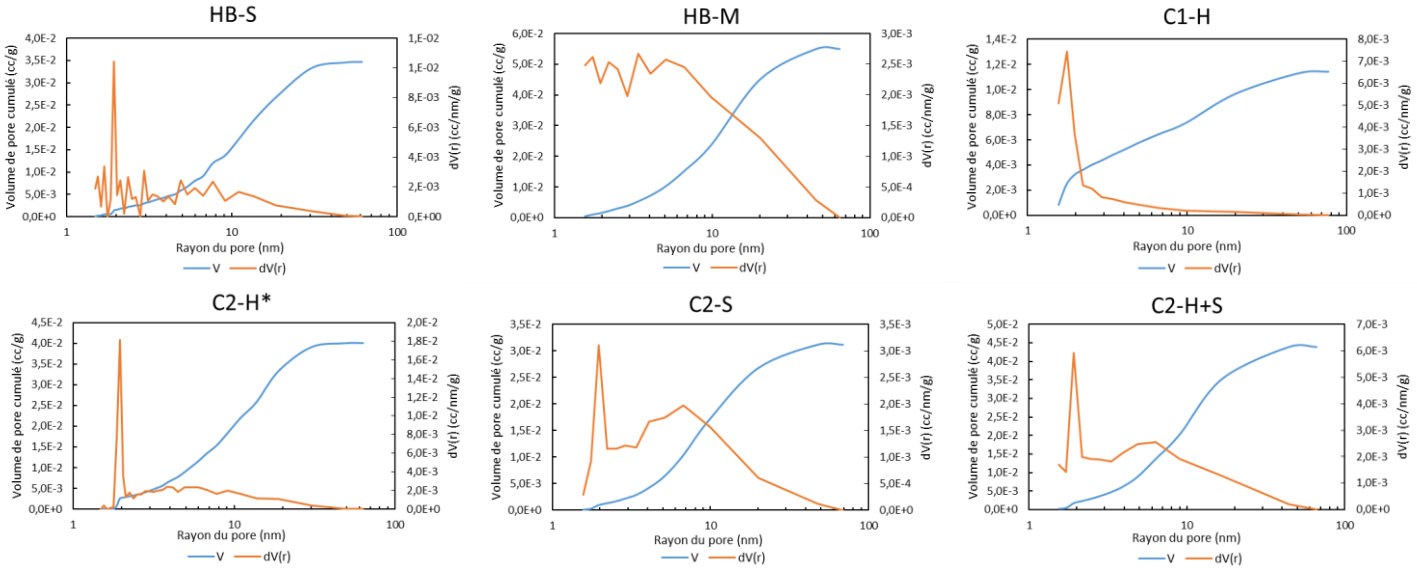


Figure 2.22 - Volume cumulé (bleu) et dérivée du volume (orange) en fonction du rayon de pore, obtenu par la méthode BJH – bétons HB-S, HB-M, C1-H, C2-H*, C2-S, C2-H+S.

On s'intéresse ensuite aux bétons formés à partir des susmentionnées agrégats et liants (HB-S, HB-M, C1-H, C2-H*, C2-S et C2-H+S), dont les résultats BJH sont dans la **Figure 2.21** et **Figure 2.22**. Toutes les isothermes sont de Type IV car elle présent de l'hystérésis (donc, de la condensation capillaire), à l'exception de C1-H, dont l'hystérésis est négligeable, qui est de Type II. De la même manière, toutes les isothermes ont un changement de pente qui témoigne de l'existence d'une adsorption monocouche et d'une adsorption multicouche. La répartition de taille de pores de HB-S présente un pic principal à 1,94 nm, avec grand nombre de pics secondaires entre 1,54 et 7,75 nm et un volume total de 0,035 cc/g. HB-M présente une répartition bien différente des autres car

elle est globalement décroissante au lieu d'avoir des pics isolés. Le volume total des pores détectés est de 0,055 cc/g. Pour C1-H, la porosité est concentrée autour d'un pic centré sur 1,76 nm et le volume total est de 0,011 cc/g. Suivant la même répartition, C2-H* présente un pic à 1,95 nm, ainsi qu'un volume total de 0,04 cc/g. C2-S présente un premier pic à 1,97 nm et un deuxième pic secondaire très large dont le maximum apparait à 6,75, avec un volume total de 0,031 cc/g. Enfin, C2-H+S a une répartition très semblable à celle-ci, avec le pic principal à 1,92 nm et le secondaire, très peu marqué, à 6,29 nm. Le volume total des pores est de 0,044 cc/g. A l'exception de HB-S, on observe que les bétons de moelle ont une distribution de taille de pores plutôt étalée, tandis que les bétons de chènevotte présentent un grand nombre de petits pores (vers 2 nm) et très peu de pores avec un rayon supérieur.

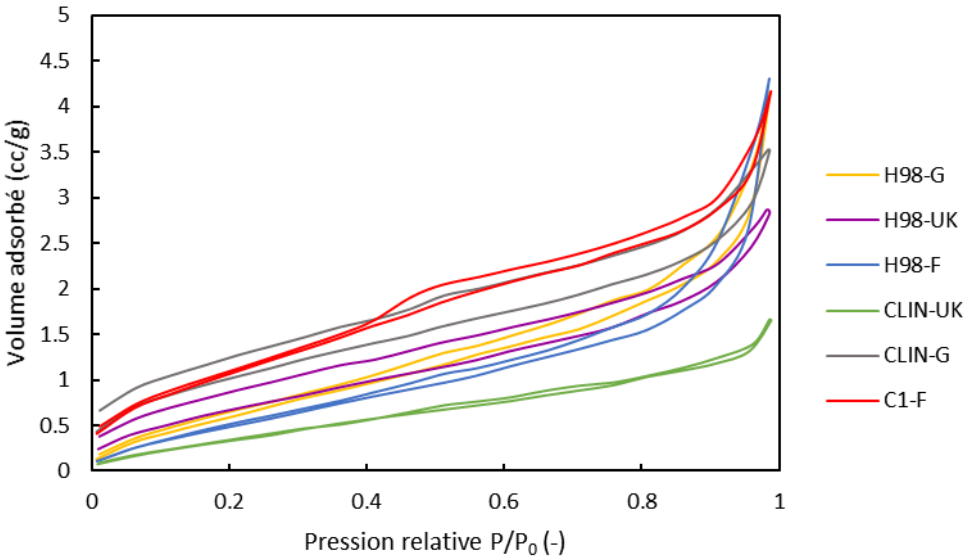


Figure 2.23 - Isothermes de sorption d'azote obtenues par la méthode BJH – bétons H98-G, H98-UK, H98-F, CLIN-UK, CLIN-G, C1-F.

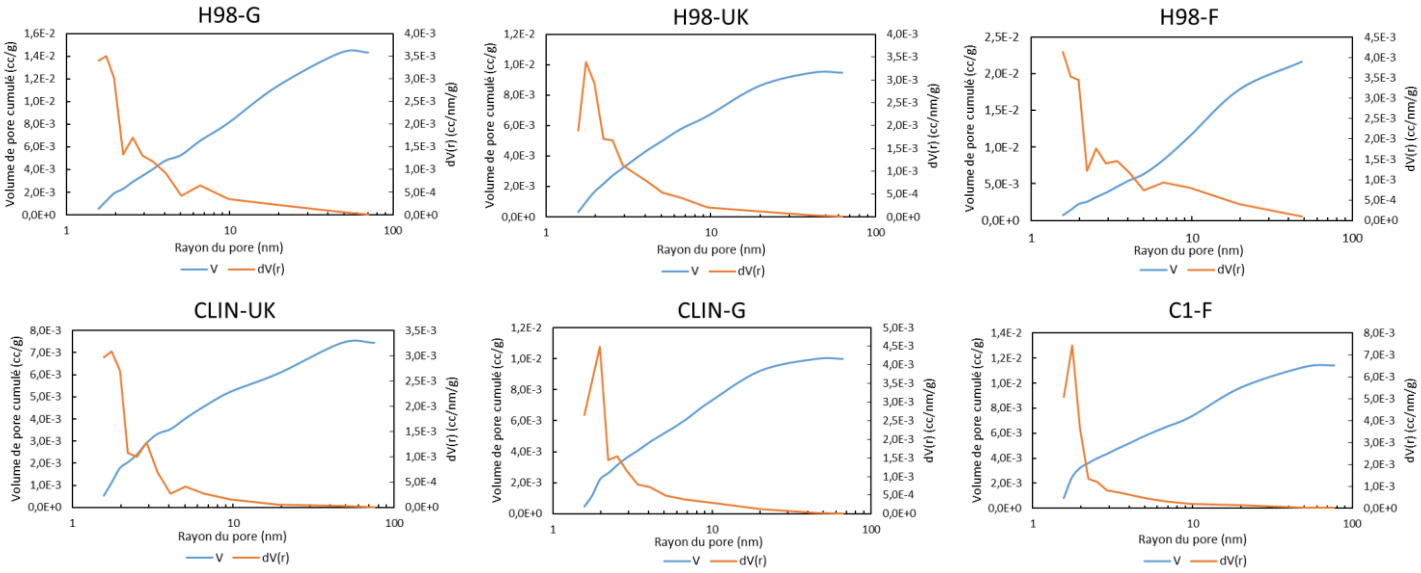


Figure 2.24 - Volume cumulé (bleu) et dérivée du volume (orange) en fonction du rayon de pore, obtenu par la méthode BJH – bétons H98-G, H98-UK, H98-F, CLIN-UK, CLIN-G, C1-F.

Les bétons qui seront étudiés lors du **Chapitre 3** (H98-G, H98-UK, H98-F, CLIN-UK, CLIN-G et C1-F), dont les résultats apparaissent dans la **Figure 2.23** et **Figure 2.24**, présentent des isothermes de Type IV avec une hystérésis modérée, à l'exception de C1-F et CLIN-UK, dont l'hystérésis est négligeable et qui sont, par conséquent, de Type II. Tout comme les bétons précédents, toutes les isothermes présentent un changement de pente (adsorption monocouche et multicouche). Le rayon des pores du béton H98-G est majoritairement entre 1,59 et 5,04 nm, avec un pic principal à 1,75 nm et un pic secondaire plus large à 2,55 nm. Le volume total des pores identifiés est de 0,014 cc/g. H98-UK présente un seul pic à 1,75 nm et un volume total de 0,009 cc/g, lorsque H98-F présente son maximum à 1,57 nm (rayon minimal analysé) et un pic secondaire large à 2,53 nm, avec un volume total de 0,022 cc/g. CLIN-UK présente une répartition similaire, avec le pic principal à 1,75 nm, le pic secondaire à 2,90 nm et un volume total de 0,007 cc/g. CLIN-G présente un seul pic à 1,97 nm, le volume total étant de 0,010 cc/g. Pour finir, C1-F présente également un seul pic à 1,75 nm et un volume total de 0,012 cc/g. Cette famille de bétons de chènevotte présente également une distribution de taille de pores « serrée », concentrée dans les petits rayons.

En conclusion, les granulats présentent uniquement de l'adsorption monocouche et très peu d'adsorption capillaire – un comportement typique des solides avec des macropores, lorsque les liants et bétons présentent tous de l'adsorption monocouche et multicouche. La plupart d'entre eux présente aussi un peu d'adsorption capillaire, qui se traduit par une légère hystérésis des isothermes. Les rayons des pores autour de 1,5-2 nm sont très récurrents pour tous les matériaux, que ce soient des agrégats, des liants ou des bétons, la plupart des pics principaux étant situés dans cette plage. De façon générale, le volume total que représentent les pores dans la plage étudiée (entre 1,5 et 100 nm) est réduit, la valeur maximale étant de 0,06 cc/g, trouvée pour S. (Collet et al., 2008) ont

réalisé l'étude BJH d'un béton de chanvre en utilisant de la vapeur d'eau à la place de l'azote et ont trouvé le plus grand volume de pores entre 7 et 30 nm approximativement, lorsque (Paul & Chakraborty, 2018) ont analysé des fibres de chanvre de Bengale et ont trouvé une taille de pore moyenne de 4,31 nm.

2.3.3. Etude des propriétés macroscopiques

2.3.3.1. Test de compression uniaxiale

La résistance à la compression (Rc) et le module global de déformation (E) à 28 jours et 60 jours ont été évalués sur les formulations denses HB-H, C2-H+S et C2-S et les formulations légères HB-M et HB-S.

Avant les tests de compression, les échantillons ont été stockés à 23 ± 2 °C et 50 %HR, puis séchés dans un four à 50 ± 1 °C pendant 96 heures en suivant les recommandations de (Association construire en chanvre & Fédération Française du Bâtiment, 2009). Les tests ont été effectués sur trois exemplaires, et la moyenne des trois résultats a été rapportée. La masse volumique de chaque échantillon a été mesurée avant le test.

Les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.13**. On considère la résistance à la compression Rc comme la limite entre le comportement élastique et élasto-plastique de la courbe contrainte axiale - déformation axiale, qui s'est produite à 3 % ± 0,5 % de déformation dans tous les cas. Le module global de déformation E est estimé comme la pente de la partie linéaire de la courbe. Comme les bétons biosourcés présentent généralement une déformation hétérogène, la déformation a été déterminée comme la variation de l'épaisseur totale de l'échantillon divisée par l'épaisseur initiale à l'aide d'un capteur de position incorporé dans la presse.

Tableau 2.13 - Valeurs moyennes de la résistance à la compression et du module global de déformation

Formulation	**HB-H**	**HB-S**	**HB-M**	**C2-H+S**	**C2-S**
Masse volumique ρ [kg/m³]	410 ±8	150 ±4	160 ±5	590 ±6	550 ±5
Rc_{28} [MPa]	0,53 ±0,03	0,10 ±0,01	0,11 ±0,02	0,58 ±0,03	0,50 ±0,01
E_{28} [MPa]	46 ±2,1	-	-	52,6 ±2,7	50,5 ±1,2
Rc_{60} [MPa]	0,66 ±0,02	0,27 ±0,01	0,24 ±0,03	0,78 ±0,02	0,64 ±0,02
E_{60} [MPa]	68,5 ±1,8	10,0 ±0,8	7,5 ±1	73,8 ±2,4	64,5 ±1,6

Les résultats de HB-S et HB-M semblent être clairement différents des autres (à savoir HB-H, C2-H+S et C2-S). Des valeurs de résistance à la compression à 28 jours de 0,10-0,11 MPa ont été trouvées pour HB-S et HB-M, et de 0,5-0,58 MPa pour les trois autres. À 60 jours, la résistance à la compression a augmenté jusqu'à 0,24-0,27 MPa pour HB-S

et HB-M, tandis que les trois autres atteignaient 0,64-0,78 MPa. Le module de déformation semble également être fortement inférieur pour les formulations HB-S et HB-M, ainsi que le rapport entre le module de déformation et la résistance à la compression. Pour les formulations HB-H, C2-H+S et C2-S, $E_{60}/Rc_{60} \approx 100$, tandis que $E_{60}/Rc_{60} \approx 35$ pour HB-S et HB-M. Ces différences significatives de comportement s'expliquent par leur masse volumique différente (150-160 kg/m^3 pour HB-S et HB-M alors que les autres varient de 410 à 590 kg/m^3).

Pour aller plus loin dans l'analyse, les valeurs de résistance à la compression obtenues à 28 jours dans cette étude ont été comparées à celles rapportées dans la littérature pour les bétons de chanvre, de tiges de maïs et de moelle. Les résultats sont présentés dans la **Figure 2.25**.

Dans un premier temps, on peut constater que les valeurs de cette étude se situent dans la fourchette de celles rapportées dans la littérature. Dans ce graphique, le fort impact de la masse volumique sèche sur la résistance à la compression, quels que soient les liants et les agrégats, semble tout à fait évident. Cependant, un examen plus approfondi semble indiquer que, pour une masse volumique donnée, la résistance à la compression est légèrement inférieure pour les bétons à base de moelle que pour les bétons à base de chanvre. Cette tendance peut également être observée dans les résultats de cette étude à partir de la comparaison entre les formulations C2-S+H, C2-S et HB-H. Une explication possible pourrait être la porosité plus élevée de la moelle (voir **Tableau 2.11**), qui se traduit par une faible résistance à la compression des agrégats. Il est cependant assez compliqué de conclure sur ce point, car il n'est pas possible de maintenir constants à la fois la masse volumique sèche et le rapport particules/liant, et ces deux paramètres sont connus pour avoir un impact significatif sur la résistance à la compression et le module de déformation. Ainsi, une évaluation précise de l'impact de la nature des agrégats sur les performances mécaniques aurait nécessité une campagne plus étendue d'essais de compression uniaxiale.

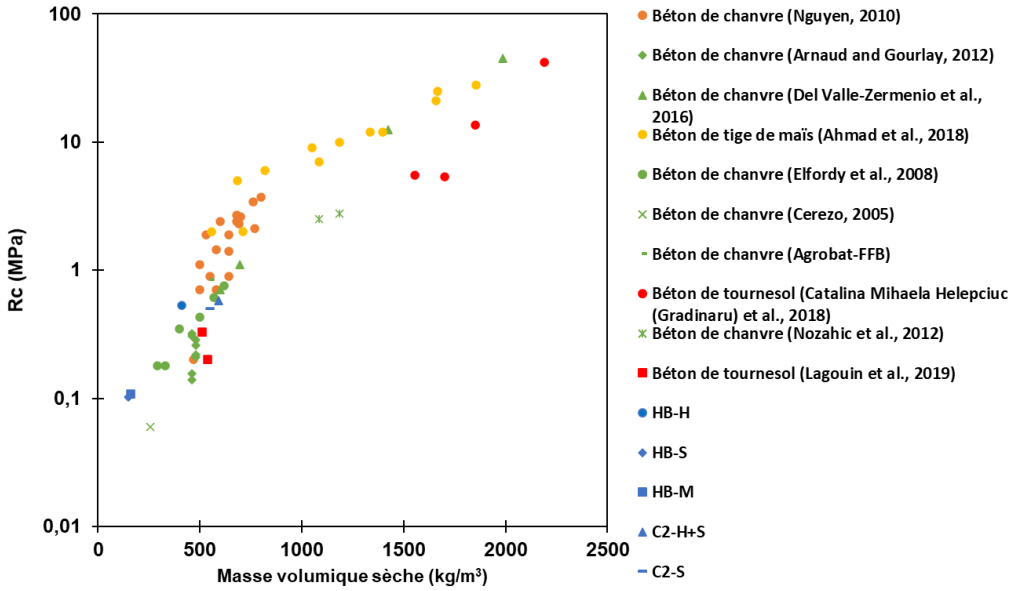


Figure 2.25 - Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et la masse volumique sèche des formulations testées dans cette étude et dans plusieurs études dans la littérature

Cependant, nous pouvons conclure que toutes les formulations étudiées dans cette campagne expérimentale ont conduit à des matériaux suffisamment cohésifs pour être utilisés à des fins d'isolation des bâtiments. Dans le cadre du guide français de la construction en chanvre "Construire en chanvre" (Association construire en chanvre & Fédération Française du Bâtiment, 2009), le HB-S et le HB-M ne peuvent être utilisés que pour des applications en toiture, tandis que le HB-H, le C2-H+S et le C2-S peuvent être utilisés comme enduit, mur, sol ou toit. L'autre information principale est que l'utilisation de la moelle au lieu du chanvre ne diminue pas de manière préjudiciable les performances mécaniques du béton, même si elle peut les réduire légèrement.

2.3.3.2. Conductivité thermique

Deux techniques ont été utilisées afin de mesurer la conductivité thermique. La méthode du fil chaud a été utilisée pour toutes les formulations. Pour ce faire, des échantillons cylindriques de 16x32 cm ont été découpés 21 jours après fabrication en échantillons cylindriques moins épais (16x6 cm), ce qui nous a permis d'obtenir trois échantillons par formulation. Ils ont été conservés dans une pièce à environ 23 °C (± 5 °C) et 60 %HR (± 5 %HR) et ont été testés après 100 jours de durcissement. Dans ces mêmes conditions, la mesure de la conductivité thermique des agrégats végétaux a été effectuée à l'aide de boîtes en plastique remplies de chènevotte (H) et de moelle de tournesol (S), selon la procédure présentée par (Magniont, 2010) et comme le montre la **Figure 2.26**. Chaque formulation a été testée en utilisant trois échantillons différents, les résultats étant la moyenne arithmétique des trois tests.

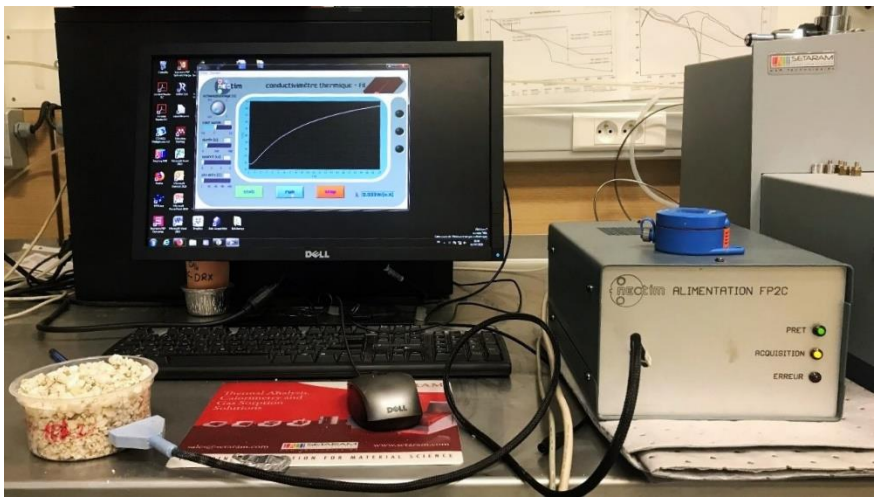


Figure 2.26 - Aperçu de la méthode du fil chaud pour mesurer la conductivité thermique des agrégats

La méthode du fil chaud est cependant fréquemment signalée en raison de certaines de ses limites. À savoir que la zone couverte par la sonde qui émet de la chaleur est difficilement représentative, et que les échantillons présentent des irrégularités à la surface, ce qui rend le transfert de chaleur non unidirectionnel.

Pour éviter ces problèmes et pour vérifier l'exactitude des mesures au fil chaud, un nouvel appareil de mesure a été conçu et mis en œuvre. Ce dispositif mesure la conductivité thermique d'un échantillon représentatif (35x35x7 cm). Le principe est similaire à celui de la plaque chaude, qui consiste à créer un flux de chaleur unidirectionnel traversant l'épaisseur de notre échantillon en imposant un gradient thermique entre deux chambres, une froide et une chaude. Les chambres (A et B) sont fabriquées en bois et configurées comme sur la **Figure 2.27**, l'atmosphère chaude étant régulée à l'aide d'une résistance chauffante (ampoule) contrôlée par PID (régulateur Proportionnel, Intégral, Dérivé) à l'aide d'un ordinateur. L'atmosphère froide est générée par un cryostat. Afin de l'homogénéiser, l'atmosphère est ventilée dans les deux compartiments.

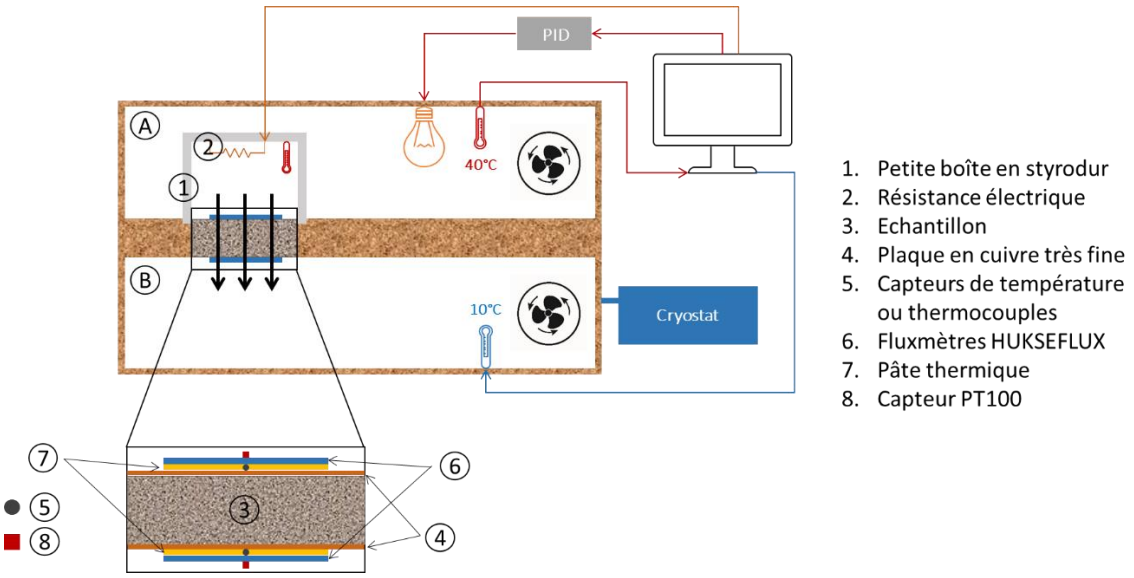


Figure 2.27 - Nouvel appareil de mesure de la conductivité thermique.

Une petite boîte en styrodur (1) a été fabriquée et placée au-dessus de l'échantillon de manière qu'il n'y ait pas de perte de chaleur vers l'environnement extérieur. Sans elle, l'environnement chaud autour de l'échantillon subirait des fuites de chaleur et ne serait pas stable. Cette boîte est chauffée par une résistance électrique (2) contrôlée par un ordinateur. Un capteur de température a été placé dans chaque compartiment. L'échantillon (3) est placé dans la cavité qui relie les deux chambres. Une fois l'échantillon placé, nous collons sur les deux faces une très fine plaque en cuivre (4), qui a une conductivité thermique très élevée, afin d'assurer une surface plane qui garantit un champ thermique vertical unidirectionnel. Sur cette dernière, des capteurs de température ou thermocouples (5) ont été collés avec du scotch aluminium pour suivre la température pendant l'essai. Nous collons ensuite les fluxmètres HUKSEFLUX (6) à l'aide de pâte thermique (7) pour assurer une bonne conductivité thermique et nous ajoutons un autre capteur PT100 (8) pour mesurer la valeur de la température en surface. L'appareil a été calibré en utilisant du polystyrène, dont la conductivité thermique est connue. Ce test a été effectué sur trois formulations, HB-S, C1-H et HB-H, et pour chacune d'entre elles, trois échantillons ont été étudiés. Les résultats sont la moyenne arithmétique pour chaque formulation. Dans un souci de comparabilité, les échantillons ont été stockés dans les mêmes conditions que celles du fil chaud, à savoir 30 °C (± 5 °C) et 60 %HR (± 5 %HR), et testés après 100 jours de durcissement. Cet âge a été choisi parce que la variation de masse était inférieure à 1 % entre deux mesures effectuées à 24 heures d'intervalle. Pour le test, la différence de température a été stabilisée à 30 °C, avec 40 °C dans l'atmosphère chaude (à l'extérieur et à l'intérieur de la boîte de styrodur pour assurer une température stable) et 10 °C dans l'atmosphère froide. Ces valeurs peuvent être configurées par l'utilisateur. Les conditions d'humidité n'ont aucun impact puisque l'échantillon est entièrement recouvert par les plaques de cuivre sur les deux faces et entouré de scotch aluminium.

Ce dispositif a été dimensionné pour effectuer des tests aussi longs que l'utilisateur le souhaite, mais dans cette campagne expérimentale, les tests ont duré environ 30 minutes, le temps d'obtenir un flux de chaleur stable à travers l'échantillon.

Les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.14**. $\lambda_{fil\ chaud}$ représente la conductivité thermique mesurée grâce au fil chaud, lorsque $\lambda_{nouveau\ dispositif}$ est celle mesurée avec le nouveau dispositif « artisanal ».

Tableau 2.14 - Récapitulatif de la conductivité thermique des formulations testées.

Formulation	**Masse volumique ρ [kg/m³]**	$\lambda_{fil\ chaud}$ **[mW/(m·K)]**	$\lambda_{nouveau\ dispositif}$ **[mW/(m·K)]**
C2-S	550 ±5	190 ±7	-
C2-H	440 ±6	135 ±10	-
C2-H*	600 ±10	150 ±10	-
C2-H+S	590 ±6	140 ±8	-
HB-S	150 ±4	65 ±2	66 ±1
HB-M	160 ±5	75 ±3	-
C1-H	470 ±5	155 ±10	147 ±2
HB-H	410 ±8	90 ±10	75 ±2
Chènevotte (H)	100 ±5	70 ±6	-
Moelle de tournesol (S)	14 ±4	50 ±1	-

Les valeurs obtenues avec les deux méthodes ne sont pas très différentes mais elles présentent quelques inexactitudes. Pour le HB-S, on peut observer que les deux valeurs sont presque identiques. Cependant, les résultats ne sont pas aussi bons pour C1-H et pour HB-H, pour lesquels le fil chaud a tendance à donner des valeurs plus élevées. La principale différence entre les spécimens est que les échantillons contenant de la moelle de tournesol présentent une surface plane alors que les échantillons de chanvre présentent de fortes irrégularités en surface. Une des raisons de cette tendance pourrait être que la taille des hétérogénéités du matériau (taille des agrégats et des pores) est trop importante pour les formulations à base de chanvre par rapport à la zone mesurée par le fil chaud. Cela mène à sous-estimer la contribution de l'isolation thermique causée par la porosité du matériau. Cependant, les tendances obtenues avec le fil chaud se sont avérées correctes et cette méthode peut être utilisée à des fins de comparaison.

La première analyse qui peut être faite est que la tendance générale est une augmentation de la conductivité thermique avec la masse volumique. Ceci est cohérent avec les observations faites dans des études précédentes, décrivant cette tendance (Lagouin et al., 2019). Comme le montre la **Figure 2.28**, la conductivité thermique des formulations est comparable à celle observée par d'autres auteurs. En regroupant les

données de conductivité en fonction de la masse volumique sèche, la régression linéaire suivante peut être trouvée :

$$\lambda = 0{,}2216\,\rho_{sec} + 0{,}0132 \qquad (2.3)$$

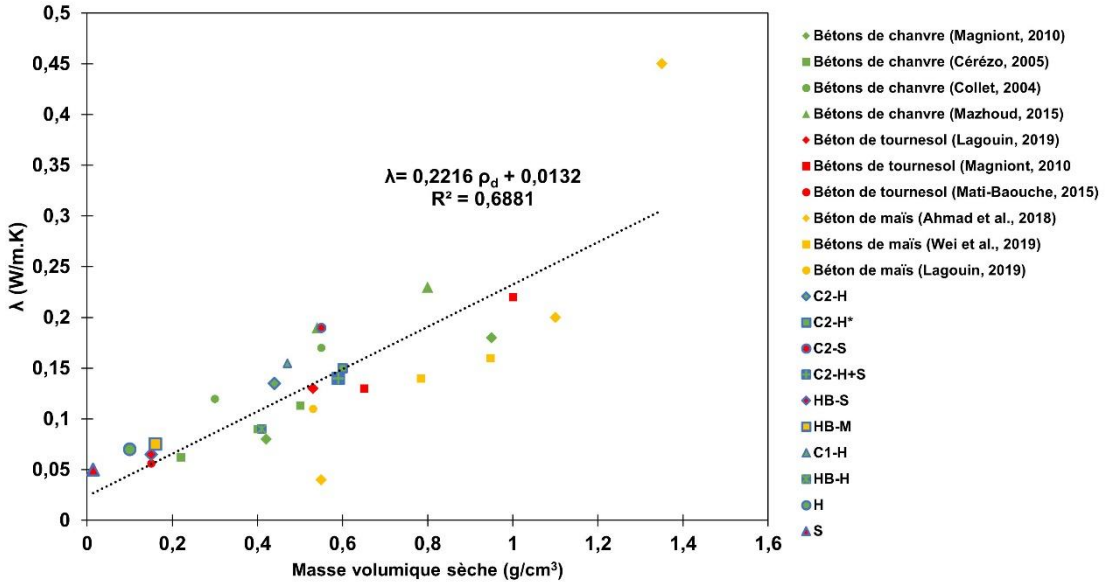


Figure 2.28 - Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche des formulations

Cette équation a été ajustée de manière à avoir un coefficient de détermination de R^2 = 0,69, ce qui indique qu'une tendance existe, mais que la masse volumique ne doit évidemment pas être le seul paramètre qui détermine la conductivité thermique.

Des mesures de conductivité thermique ont également été effectuées sur des agrégats en vrac. Une conductivité thermique de 0,07 W/(m·K) a été trouvée pour la chènevotte (H), tandis qu'une valeur de 0,05 W/(m·K) a été trouvée pour la moelle de tournesol (S). Ces résultats semblent être un peu plus élevés que prévu, mais il était prévisible que la conductivité thermique de la moelle de tournesol soit nettement plus faible que celle de la chènevotte.

Cette tendance est cependant inversée une fois que les agrégats sont mélangés au liant. Par exemple, les conductivités thermiques de C2-H et C2-H* sont inférieures à celle de C2-S, même si les formulations contiennent le même liant et bien que leurs masses volumiques soient dans la même fourchette (440 kg/m^3 pour C2-H, 600 kg/m^3 pour C2-H* et 550 kg/m^3 pour C2-S). La même conclusion peut être tirée de la comparaison entre HB-S et HB-H. Alors qu'il présente une masse volumique sèche nettement plus élevée (410 kg/m^3 contre 150 kg/m^3), la conductivité thermique du HB-H semble n'être que légèrement supérieure à celle du HB-S (0,075 W/(m·K) contre 0,066 W/(m·K)). Par conséquent, la conductivité thermique du béton s'avère être influencée par le type d'agrégat. Cet impact peut notamment dépendre du taux d'enrobage de la particule par

le liant, ainsi que des interactions physiques et/ou chimiques entre eux. Il ne sera donc pas possible de prévoir facilement la conductivité thermique du matériau composite à partir des conductivités thermiques de ses constituants. Ce résultat est en contradiction avec (Magniont, 2010), qui n'a trouvé aucune influence significative de la nature des agrégats sur la conductivité thermique des bétons biosourcés. Des études supplémentaires sont donc nécessaires pour tirer une conclusion définitive sur ce point.

Une autre analyse qui peut être faite est l'impact du liant, pour une masse volumique et un type de granulat donnés. Il n'y a pas de consensus clair sur ce point. Alors que (Magniont, 2010; R. Walker et al., 2014) mentionnaient que le liant et, plus spécifiquement, la conductivité thermique du liant, a probablement peu d'influence sur la conductivité thermique du béton, (E. Gourlay & Arnaud, 2010) a trouvé le contraire. Dans la présente étude, la comparaison entre C1-H, C2-H et HB-H, qui ont pratiquement la même masse volumique sèche, allant de 410 à 470 kg/m^3, mais qui ont révélé des valeurs de λ oscillant entre 0,09 et 0,155 W/(m·K), indique plutôt que la nature du liant a un impact significatif.

Pour conclure, les résultats susmentionnés suggèrent que la masse volumique est le paramètre qui influence le plus la conductivité thermique. Cependant, il a été constaté que le type d'agrégat a un certain impact, ainsi que le type de liant.

2.3.3.3. Isothermes de sorption

Les isothermes d'adsorption-désorption sont présentées dans la **Figure 2.30** et la **Figure 2.31**. Elles sont de type II selon la classification IUPAC (K. S. W. Sing et al., 1985). Elles correspondent à ce qui est couramment observé dans la littérature pour les matériaux biosourcés (A. Fabbri & McGregor, 2017; Rahim et al., 2015) et pour les bétons (Baroghel-Bouny, 2007; Derluyn et al., 2012).

Deux méthodes ont été utilisées pour la détermination des courbes de sorption : la méthode du dessiccateur et la méthode DVS (*Dynamic Vapor Sorption*). L'équivalence entre ces deux méthodes a déjà été discutée dans (A. Fabbri et al., 2017). Les protocoles utilisés pour mesurer les masses sèches dans chaque méthode doivent conduire à la même masse volumique sèche, ce qui a été vérifié avec succès ici.

La méthode du dessiccateur a été appliquée sur des échantillons représentatifs des formulations HB-H, HB-S, HB-M, C2-H et C1-H. Les échantillons étaient cubiques et avaient un bord de 4 cm. Ce volume représentatif a été déterminé à partir de la variation apparente de la masse volumique en fonction du volume (Collet et al., 2008).

Figure 2.29 - Aperçu de la méthode dessiccateur.

La méthode du *Dynamic Vapor Sorption* (DVS Intrinsic SMS) a été utilisée pour tracer les courbes de sorption des agrégats H, M et S et des formulations HB-M, HB-S, C2-S, C2-H+S et C2-H*. Pour les deux méthodes, chaque formulation a été testée en utilisant trois échantillons et les résultats donnés sont la moyenne arithmétique des trois échantillons de chaque formulation. HB-M et HB-S ont été testés en utilisant les deux méthodes afin de vérifier si les résultats étaient proches.

La comparaison des courbes de sorption peut être faite soit avec la teneur en eau exprimée en kg/m^3 (désignée par w) ou exprimée en kg/kg (désignée par u). Elles sont toutes deux reliées entre elles par la masse volumique sèche de l'échantillon (désignée par ρ_{sec}) :

$$w = \rho_{sec} \cdot u = \rho_{sec}\left(\frac{m - m_{sec}}{m_{sec}}\right) \qquad (2.4)$$

Où m est la masse à l'instant t de l'échantillon et m_{sec} sa masse sèche.

Ces deux moyens de comparaison ne fournissent pas exactement les mêmes informations. D'un côté, u est une valeur spécifique. Il est utile d'avoir la courbe intrinsèque d'un matériau ou d'un composant. Par exemple, pour caractériser les granulats biosourcés, il est conseillé d'utiliser u et non w. D'autre part, la teneur en eau en kg/m^3 représente la quantité d'eau réelle stockée dans le volume du matériau. Cette dernière doit plutôt être utilisée pour comparer le potentiel hygroscopique des produits finaux, puisque c'est cette dernière qui est impliquée dans les équations de conservation de la masse (Ferroukhi et al., 2015). Il est souligné que la plupart des comparaisons dans la littérature ont été faites avec une teneur en eau en kg/kg, ce qui peut induire certaines ambiguïtés sur la capacité réelle de stockage d'eau des matériaux.

Les courbes d'adsorption-désorption spécifiques des agrégats sont présentées dans la **Figure 2.30B**. Les valeurs en kg/m^3 indiquées sur la **Figure 2.30A** correspondent à

des échantillons d'agrégats en vrac de même masse volumique apparente que ceux utilisés pour estimer la conductivité thermique, la perméabilité à la vapeur et la MBV des agrégats. Les résultats se situent dans la fourchette de ceux qui sont généralement rapportés dans la littérature, même si la teneur en humidité de la moelle de tournesol à humidité relative élevée était supérieure à celle trouvée par (Lagouin et al., 2019).

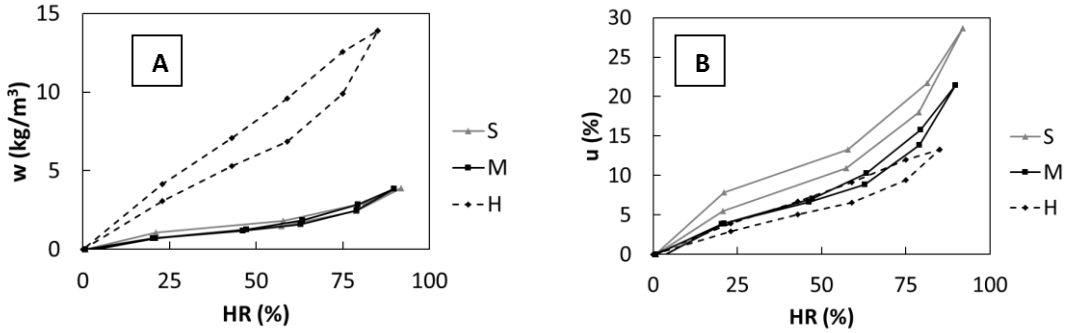


Figure 2.30 - Isothermes d'adsorption/désorption des trois agrégats végétaux avec la teneur en eau exprimée en (A) : kg/m³, et (B) : kg/kg.

Dans la **Figure 2.30**, les agrégats de maïs et de tournesol présentent un comportement très similaire entre eux, avec une hystérésis presque nulle. De l'autre côté, les grains de chènevotte présentaient une teneur en eau spécifique plus faible et une hystérésis plus importante, bien que limitée. En raison de sa plus grande masse volumique, la **Figure 2.30A** indique qu'un volume de chènevotte en vrac a la capacité de stocker environ trois fois plus d'eau que le même volume de moelle de tournesol ou de maïs en vrac.

La **Figure 2.31** montre les courbes d'adsorption et de désorption des bétons biosourcés. L'ordre de grandeur obtenu pour les valeurs d'humidité relative élevées se situe dans la fourchette de ce qui est classiquement observé pour ce type de matériaux. Par exemple, (Lagouin et al., 2019) a trouvé pour les bétons d'écorce de tournesol et de maïs une capacité d'adsorption maximale pratiquement identique à celle obtenue pour HB-S et HB-M, ainsi que le même changement de pente à 75 % d'humidité relative. En ce qui concerne les bétons à base de chènevotte, C2-H*, C2-H, C1-H et HB-H présentent des comportements similaires à ceux rapportés par (Chamoin, 2013) pour un béton chaux-chanvre projeté, et par (Latif, Lawrence, et al., 2015) et (P. De Bruijn & Johansson, 2013) pour un béton chaux-chanvre. En particulier, la forte augmentation de la pente de la courbe d'adsorption à 80 %HR et l'hystérésis significative qui peut être observée dans toutes les formulations à base de chanvre ont également été constatées par de nombreux auteurs (Aït Oumeziane et al., 2011; Collet et al., 2013; Mazhoud et al., 2016; Rahim et al., 2015, 2016).

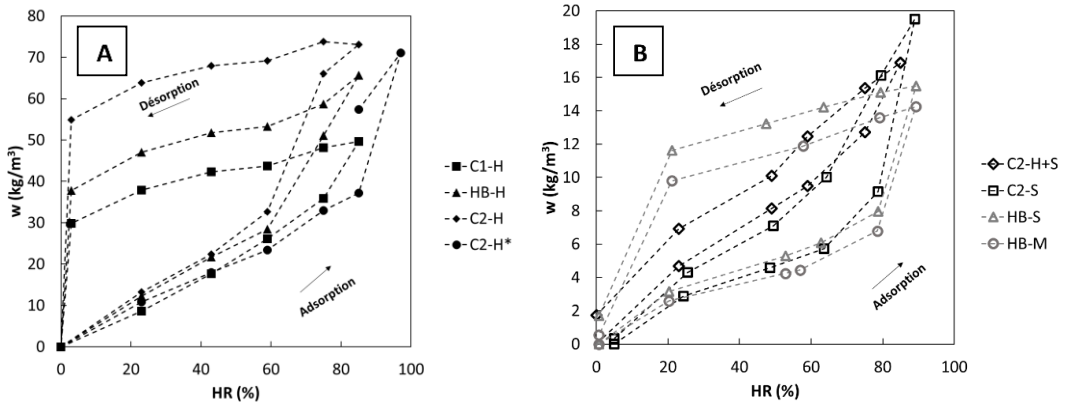


Figure 2.31 - Isothermes d'adsorption/désorption pour les huit bétons. Formulations à base de chènevotte (A) et formulations à base de moelle et de moelle et chènevotte (B).

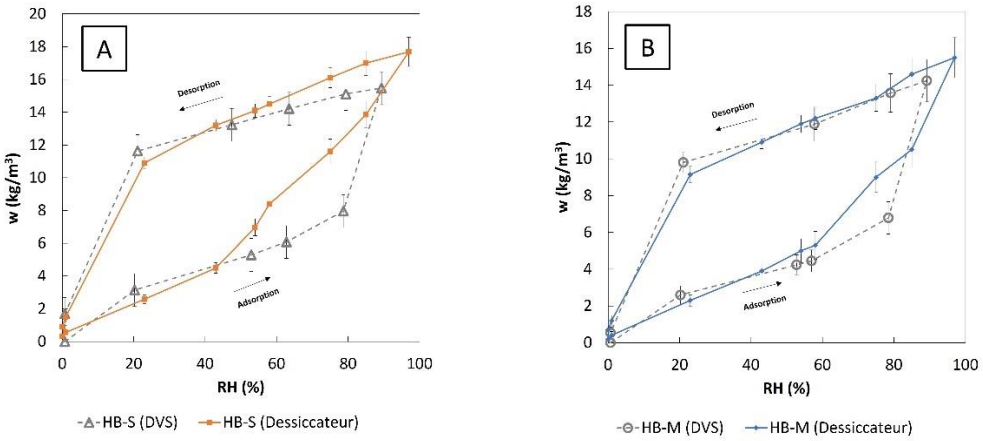


Figure 2.32 - Isothermes de sorption pour HB-S (A) et HB-M (B) : comparaison des méthodes DVS et dessiccateur.

La première remarque que l'on peut faire sur les courbes de sorption des bétons est que les tendances observées sur les agrégats libres se maintiennent. Les formulations à base de moelle de tournesol et de maïs donnent presque les mêmes résultats, avec une teneur en eau à 80 %HR comprise entre 13 kg/m^3 et 20 kg/m^3. En revanche, toutes les formulations à base de chanvre ont une teneur en eau plus élevée à 80 %HR, qui oscille entre 37 kg/m^3 et 70 kg/m^3, et présentent une forte hystérésis. Ces observations sont d'autant plus surprenantes qu'une valeur plus faible de la teneur en eau a été trouvée pour toutes les formulations à base de moelle, quelle que soit leur masse volumique. Cette première analyse suggère que les courbes de sorption sont plus influencées par le granulat que par le liant.

Au sein de chaque groupe (formulations à base de moelle ou de chanvre), l'influence du liant peut cependant être appréciée, même si elle est secondaire par rapport à celle des agrégats. En effet, le liant C2 permet un apport en eau plus important que le liant HB, qui permet en même temps une adsorption de l'humidité plus importante que le liant C1.

Tous ces résultats indiquent des dissemblances entre les microstructures des formulations. En particulier, (Hamidpour et al., 2012) suggèrent que l'hystérésis est due à un double mécanisme de sorption. C'est-à-dire un processus rapide qui a lieu à la surface du solide et un processus lent qui consiste en l'intégration des molécules d'eau dans la matrice solide. Ce phénomène est lié aux matériaux à base de cellulose. La différence notable dans le comportement hystérétique des bétons à base de chanvre et de moelle peut être le résultat d'une différence dans la dynamique des échanges d'eau à l'échelle microscopique.

La **Figure 2.32** montre les isothermes de sorption de HB-S et de HB-M en comparant les résultats obtenus avec la méthode DVS et avec la méthode du dessiccateur. Tandis que les résultats sont assez proches, la méthode du dessiccateur montre une boucle d'hystérésis modérément inférieure, les deux méthodes restant comparables.

(Anderberg & Wadsö, 2004) ont précisé que toutes les sortes d'humidité ne sont pas significatives pour le confort dans l'environnement intérieur, car une partie de l'eau est chimiquement liée au matériau et n'interagit donc pas avec les phénomènes hygroscopiques. C'est l'eau physiquement liée qui doit être étudiée pour ses propriétés hygroscopiques. Cette eau peut être adsorbée dans la structure et sur les surfaces ou peut être incorporée par condensation capillaire. L'eau adsorbée forme une première couche de molécules d'eau appelée monocouche d'humidité et qui est la partie la plus immobile. L'eau ajoutée au-delà de ce seuil a une plus grande mobilité et est donc soumise à l'étude des phénomènes de transfert d'eau, ainsi que de la condensation capillaire. En se concentrant à nouveau sur l'hystérésis, (Derluyn et al., 2012) a expliqué que les trois phénomènes qui affectent l'hystérésis sont la condensation capillaire, l'angle de contact et l'effet bouteille d'encre ou « ink-bottle ».

Selon (Anderberg & Wadsö, 2004), le phénomène de condensation capillaire est causé par la condensation de l'eau qui forme des ménisques concaves dont le rayon est déterminé par l'équilibre avec l'humidité relative de l'air. De faibles valeurs d'humidité relative produisent de faibles rayons et, par conséquent, seuls les petits pores seront complètement remplis d'eau. Ils ajoutent que la condensation capillaire est le principal phénomène des processus de transport de l'eau dans les matériaux à pores fins. (Barsotti et al., 2020) décrivent que le lien entre la condensation capillaire et l'hystérésis est le blocage des pores. Cela se produit lorsque les gros pores sont indirectement reliés à un fluide non confiné à travers des pores plus petits. Pendant la désorption, les grands pores confinés ne pourront pas se vider jusqu'à ce que les petits pores le fassent, ce qui ne se produira qu'à des valeurs d'humidité relative faibles. Cela se traduit par une forte teneur en eau à faible %HR lors de la désorption, puis par une diminution soudaine de la teneur en eau à très faible %HR.

La variation de l'angle de contact ou l'hystérésis de l'angle de contact est une autre raison principale de l'hystérésis dans les isothermes de sorption. (Aligizaki, 2006) a

expliqué que l'angle de contact entre un liquide et un solide change selon que le liquide avance ou recule, le premier angle étant plus grand que le second. Il a été observé dans de nombreux cas que cette différence donne lieu à l'hystérésis des isothermes de sorption.

En ce qui concerne le troisième facteur, les pores bouteille d'encre sont constitués de deux pores modélisés comme deux cylindres de rayons différents, celui qui a le rayon le plus faible est appelé "goulot" et celui qui a le rayon le plus élevé est appelé "bouteille". Ce type de pores apparaît naturellement dans les liants hydrauliques. (Moro & Böhni, 2002) ont précisé que dans ce type de pores, le liquide ne peut pas pénétrer avant d'avoir atteint une pression élevée qui le force à passer par le goulot et à remplir ainsi tout le pore. Au contraire, une très faible pression de vapeur doit être atteinte pour vider le pore. Ces deux phénomènes expliquent le changement brusque de pente lors de l'adsorption pour des valeurs d'humidité relative élevées et lors de la désorption pour des valeurs d'humidité relative faibles respectivement. (Espinosa & Franke, 2006) coïncident sur le fait que des forces de liaison très fortes entre l'eau et la matière doivent être brisées pour vider les pores des bouteilles d'encre, ce qui fait qu'une grande quantité d'eau reste dans ces pores jusqu'à ce que des valeurs très faibles d'humidité relative soient atteintes pendant la désorption.

Les cycles d'hygrométrie réalistes dans les bâtiments ne dépassent généralement pas 75 % de l'humidité relative et ne sont pas inférieurs à 33 %. Par conséquent, il est raisonnable de concentrer l'étude entre ces deux valeurs. De plus, il semble plus intéressant de comparer les matériaux en utilisant un seul paramètre. La capacité de stockage d'humidité, dénommée par ξ, est le paramètre qui exprime la capacité du matériau à stocker les molécules d'eau en soi. Elle est calculée comme la pente des isothermes d'adsorption $\xi_{adsorption}$ ou de désorption $\xi_{désorption}$ entre 33 et 75 %HR. Le **Tableau 2.15** résume la capacité de stockage d'humidité de tous les matériaux étudiés.

Dans la bibliographie mentionnée ci-dessus, qui ne comprend que les courbes d'adsorption, les valeurs de capacité de stockage d'humidité vont de 10,44 kg/m^3 (Latif, Lawrence, et al., 2015) à 57,29 kg/m^3 (Rahim et al., 2015), avec (Mazhoud et al., 2016) entre les deux et donnant une valeur de 26,03 kg/m^3. Les valeurs de ξ de HB-M, HB-S et C2-H* sont conformes à ces résultats. Cependant, C1-H, HB-H et C2-H présentent une très grande capacité de stockage d'humidité lors de l'adsorption par rapport aux autres matériaux existants.

On peut noter une différence entre la capacité de stockage d'humidité en adsorption et en désorption. Pour les formulations à base de chanvre, les valeurs de $\xi_{désorption}$ sont nettement inférieures à celles de $\xi_{adsorption}$. Le même résultat a été trouvé par (A. Fabbri & McGregor, 2017). Pour les formulations à base de moelle, la différence entre $\xi_{désorption}$ et $\xi_{adsorption}$ se situe dans la fourchette d'incertitude, et elles peuvent donc être considérées comme équivalentes.

Au vu de ces résultats, nous pouvons remarquer que lorsque de fortes différences existent pour $\xi_{adsorption}$ (entre 136 kg/m^3 et 8 kg/m^3), $\xi_{désorption}$ reste dans une fourchette de valeurs plus limitée (entre 22 kg/m^3 et 5 kg/m^3). La dissimilarité qui a été observée sur les courbes de sorption en fonction de la nature de l'agrégat est clairement visible sur $\xi_{adsorption}$, mais elle n'est pas plus visible si la comparaison est faite sur $\xi_{désorption}$. Pour cette dernière, la distinction se fait plutôt entre les formulations à faible masse volumique, qui ont des valeurs $\xi_{désorption}$ inférieures à 10 kg/m^3, et les formulations de haute masse volumique, qui présentent plutôt des valeurs entre 16 kg/m^3 et 22 kg/m^3 (à l'exception de C2-H).

Tableau 2.15 - Récapitulatif des propriétés hygroscopiques

Formulation	$\xi_{adsorption}$ [kg/m³]	$\xi_{désorption}$ [kg/m³]	μ [-]	$MBV_{pratique}$ [g/m²·%HR]	$\xi_{idéal}$ [kg/m³]	$\rho^*_{agrégat}$ [kg/m³]	$\xi^*_{agrégat}$ [kg/m³]
C2-S	12 ±0,6	15 ±0,8	7 ±1,4	1,21 ±0,05	6,7	0,05	23
C2-H	136 ±7,3	8 ±0,3	3,4 ±0,1	1,98 ±0,09	8,9	-	-
C2-H*	47 ±1,9	20 ±0,9	3,9 ±0,2	1,63 ±0,05	6,7	0,15	10
C2-H+S	15 ±3	16 ±0,4	3,9 ±0,6	1,71 ±0,07	7,4	H : 0,08 S : 0,03	15
HB-S	8 ±0,4	5 ±0,05	4,7±0,3	1,25 ±0,06	5,0	0,05	16
HB-M	10 ±0,5	7 ±0,5	5,1 ±0,6	1,35 ±0,03	5,7	0,04	13
C1-H	57 ±2,1	18 ±0,7	4,2 ±0,7	1,56 ±0,05	6,6	0,12	5
HB-H	92 ±5,2	22 ±1,6	4,0 ±0,3	1,60 ±0,07	6,7	0,11	5
Chènevotte (H)	14 ±0,4	17 ±0,2	1,2 ±0,002	2,90 ±0,02	6,6	-	-
Moelle de tournesol (S)	3 ±0,2	3 ±0,1	1,0 ±0,006	2,60 ±0,03	4,4	-	-

2.3.3.4. Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau de toutes les formulations a été mesurée par la méthode de la coupelle humide (*wet cup*) en fixant l'humidité relative à 50 % dans l'enceinte climatique et à 85 % dans la coupelle à l'aide d'une solution saline. Pour chaque formulation, des échantillons de 3 épaisseurs (2 cm, 4 cm et 6 cm) ont été testés, avec trois échantillons par épaisseur. Le résultat pour la perméabilité à la vapeur de chaque formulation est la moyenne arithmétique de la valeur pour chaque épaisseur.

Les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.15** en termes de valeur de μ [-], qui est le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau dans le matériau. La valeur de μ des agrégats en vrac s'est avérée proche de 1. Cela signifie qu'une fois l'état permanent atteint, ces derniers n'ont pratiquement aucun impact sur la diffusion de la vapeur.

Les bétons présentent des valeurs comprises entre 3,4 et 5,1, sauf pour C2-S, dont la valeur est de 7. Ces valeurs sont bien inférieures à celles observées par (Collet et al., 2013;

Arnaud Evrard, 2008; Rahim et al., 2015, 2016; R. Walker et al., 2014), qui vont de 5 à 12 pour les bétons de chanvre, de paille de colza et de lin. Cette différence avec la littérature est probablement attribuable aux conditions expérimentales, qui pourraient avoir un impact significatif sur les valeurs obtenues. Avec la méthode de la coupelle, (Vololonirina et al., 2014) a étudié l'influence de différents paramètres de test tels que l'épaisseur et la surface de l'échantillon, l'épaisseur de la couche d'air, la vitesse de l'air au-dessus de l'échantillon, la hauteur de la coupelle et l'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur de la coupelle. Plus concrètement, pour les matériaux hygroscopiques tels que les matériaux biosourcés pour la construction, la perméabilité à la vapeur d'eau est fortement liée à l'humidité relative locale. Ainsi, les mesures de la perméabilité à la vapeur d'eau, qui sont effectuées à différents niveaux d'humidité relative (coupelle sèche et coupelle humide), peuvent donner des valeurs différentes pour une même solution saline et un même matériau. L'augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative a été prouvée par (Chamoin, 2013) et (Collet et al., 2013) : le coefficient de diffusion de la perméabilité à la vapeur d'eau a été multiplié par sept en fonction de l'hygrométrie. Cela peut être dû à la contribution du transport de l'eau liquide à travers l'échantillon, qui devient visible à des valeurs d'humidité plus élevées.

Il est communément admis que, quand le reste des paramètres sont égaux, μ devrait augmenter avec la masse volumique (et donc diminuer avec la porosité), ce qui est cohérent avec les résultats obtenus avec la formulation C2-H et C2-H*. Une augmentation de la masse volumique de 1440 kg/m^3 à 1600 kg/m^3 a conduit à une augmentation de μ de 3,4 à 3,9. Cette tendance n'est cependant plus observée lorsque le couple liant - agrégat est modifié.

Plus précisément, les formulations à base de moelle présentent des valeurs de μ globalement plus élevées. Celle de la formulation C2-S est deux fois plus élevée que celle de C2-H* et C2-S+H, alors que leur liant et leur masse volumique sont approximativement les mêmes. Dans la même ligne, les valeurs de μ des formulations HB-S et HB-M se situent dans la même fourchette que celles des formulations à base de chanvre, alors que leur masse volumique est fortement inférieure. En fait, comme il a déjà été mentionné pour les mesures de conductivité thermique, la morphologie des bétons à base de chanvre et à base de moelle est clairement différente. Comme le montrent les photos de la **Figure 2.33**, alors que des pores ouverts et connectés sont visibles à la surface du premier, le second présente une surface plus plate et presque sans aspérité. Même si aucun lien direct ne peut être établi entre cette observation visuelle et la connectivité du réseau poreux des échantillons, elle indique clairement une différence de microstructure entre ces deux formulations.

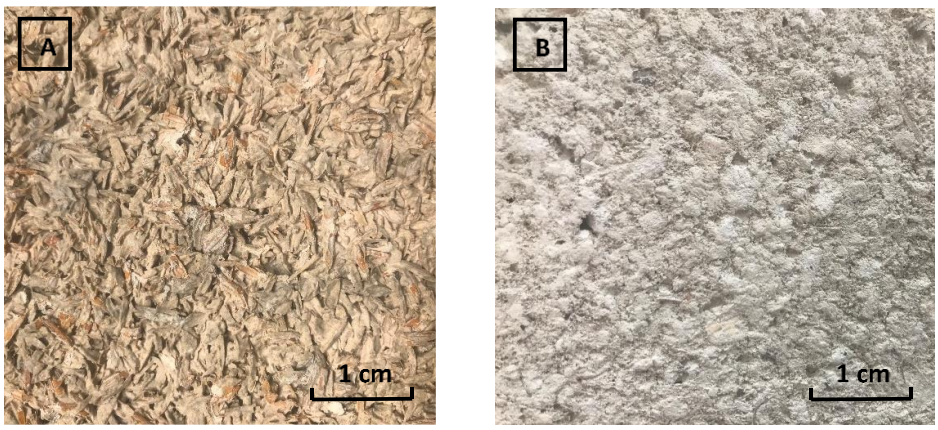


Figure 2.33 - Photographies de la surface d'une formulation à base de chènevotte (A) et à base de moelle (B).

2.3.4. Discussion sur le potentiel hygroscopique des bétons à base de moelle

La valeur tampon hydrique des agrégats et des bétons a été estimée selon le protocole NordTest (Rode et al., 2007). Les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.15**. La **Figure 2.34** donne un exemple de la courbe de suivi de la masse, à partir de laquelle on détermine $MBV_{pratique}$, de HB-S et HB-M.

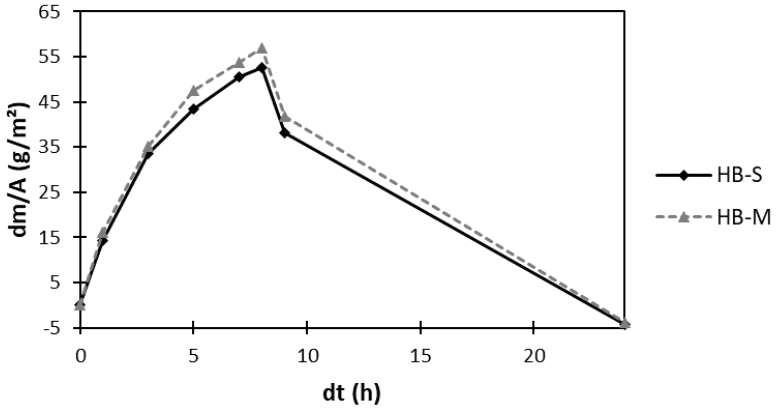


Figure 2.34 - Suivi de la masse de HB-S et HB-M lors du test MBV.

La première remarque qui peut être faite est que les résultats peuvent être divisés en trois groupes. Les granulats en vrac ont une valeur tampon hydrique (MBV) supérieure à 2 g/m^2·%HR, ce qui en fait des matériaux ayant un excellent potentiel hygroscopique selon la classification proposée par (Rode et al., 2007). Les formulations à base de chanvre et de chanvre-moelle ont des valeurs comprises entre 1,56 g/m^2·%HR et 1,71 g/m^2·%HR. Enfin, la MBV des formulations à base de moelle se situe plutôt entre 1,21 g/m^2·%HR et 1,35 g/m^2·%HR. Toutes ces formulations peuvent être classées comme des matériaux ayant un bon potentiel hygroscopique.

Ce niveau de potentiel hygroscopique est tout à fait prévisible au regard des résultats des propriétés de sorption et de diffusion de vapeur des matériaux testés. Toutefois, compte tenu des différences significatives constatées sur les courbes de sorption, une gamme plus large de MBV pourrait être anticipée.

En fait, la capacité de stockage ξ est connue pour influencer de manière significative le potentiel hygroscopique des matériaux (McGregor, Heath, Shea, et al., 2014). Cependant, comme le montrent les résultats, une grande incertitude existe sur cette valeur puisque plus d'un ordre de grandeur de différence peut être observé dans certains échantillons entre la capacité de stockage en adsorption et en désorption. Par conséquent, on introduit le paramètre $\xi_{\text{idéal}}$, présenté dans le **Chapitre 1**, pour établir une comparaison avec les valeurs expérimentales de ξ.

Les valeurs obtenues pour $MBV_{pratique}$, ξ et $\xi_{\text{idéal}}$ sont indiquées dans le **Tableau 2.15**. La première remarque qui peut être faite est que pour la plupart des formulations, les valeurs de $\xi_{désorption}$ et $\xi_{adsorption}$ (cf. **Tableau 2.15**) sont supérieures à celles de $\xi_{\text{idéal}}$. Toutefois, lorsque $\xi_{désorption}$ reste du même ordre de grandeur que $\xi_{\text{idéal}}$, les valeurs de $\xi_{adsorption}$ semblent être fortement supérieures. Le même type de résultats a été trouvé par (A. Fabbri & McGregor, 2017) sur un béton de chanvre. Cela a conduit à la recommandation d'utiliser plutôt les cycles d'humidité relative (ou au moins les courbes de désorption) que les courbes d'adsorption pour prédire le potentiel hygroscopique des bétons de chanvre. Une des raisons pourrait être que toute l'eau contenue dans le matériau n'est pas mobilisée pendant les cycles d'humidité relative. Ainsi, si la courbe d'adsorption commence sur un matériau fortement séché, une partie de l'eau qui sera capturée dans la microstructure du matériau ne sera pas libérée pendant l'étape de désorption, à moins qu'elle ne soit soumise à des conditions de séchage sévères, ce qui n'arriverait pas typiquement.

Il est intéressant de noter que, comme le montre la **Figure 2.35**, $\xi_{désorption}$ et $\xi_{\text{idéal}}$ semblent être presque identiques pour la moelle de tournesol en vrac et les formulations plus légères (HB-S et HB-M), tandis que des différences plus importantes sont observées pour la chènevotte en vrac et les formulations plus denses. Cela tend à indiquer que les caractéristiques statiques (à savoir $\xi_{désorption}$ et μ) ne sont pas suffisantes pour reproduire avec précision le comportement hygroscopique dynamique de la chènevotte et des formulations denses de cette étude. Cette différence entre les caractéristiques hygroscopiques statiques et dynamiques a déjà été mise en évidence par (Dubois et al., 2014). Pour éviter ce problème, le comportement des agrégats au sein des bétons sera étudié à travers les valeurs de $\xi_{\text{idéal}}$, puisque ce sont les valeurs qui sont liées au comportement dynamique du matériau.

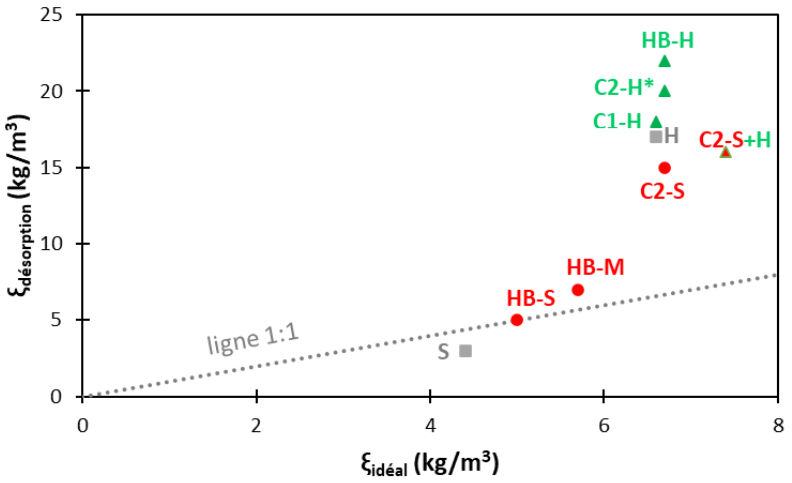


Figure 2.35 - ξ calculé à partir de la courbe de désorption en fonction du $\xi_{idéal}$ estimé à partir de $MBV_{pratique}$.

Les proportions massiques des agrégats dans les mélanges, désignées par $p_{\text{agrégat}}$ [kg/kg], sont indiquées dans le **Tableau 2.10**. À partir de cette valeur, il est possible de connaître la masse des agrégats par unité de volume des échantillons, désignée par $\rho^*_{\text{agrégat}}$ [kg/m³], grâce à la relation :

$$\rho^*_{\text{agrégat}} = \frac{m_h}{V}\, p_{\text{agrégat}} \qquad (2.5)$$

Où m_h [kg] est la masse de l'échantillon juste après le mélange, tandis que V [m³] est son volume. Les valeurs de $\rho^*_{\text{agrégat}}$ obtenues pour les différentes formulations sont indiquées dans le **Tableau 2.15**. Pour les formulations à base de chanvre, $\rho^*_{\text{agrégat}}$ reste assez proche de la masse volumique de la chènevotte en vrac (entre 110 kg/m³ et 150 kg/m³ pour $\rho^*_{\text{agrégat}}$ et 100 kg/m³ pour ρ). Il indique que le liant a rempli les espaces entre les particules de chanvre sans modifier de manière significative leur disposition géométrique, tandis que la $\rho^*_{\text{agrégat}}$ des formulations à base de moelle est environ quatre fois plus élevée que la masse volumique de la moelle de tournesol en vrac (entre 40 kg/m³ et 50 kg/m³ pour $\rho^*_{\text{agrégat}}$ et 14 kg/m³ pour ρ). En conséquence, cela indique probablement un compactage des particules de moelle lors de la fabrication des échantillons, la moelle étant un matériau qui subit des déformations plastiques importantes, comparé à la chènevotte, moins déformable.

La capacité de stockage d'humidité idéale des agrégats (chanvre ou moelle de tournesol) qui est calculée avec **(2.6)** et dont la valeur est indiquée dans le **Tableau 2.15**, sera notée $\xi^{\text{idéal}}_{\text{agrégat}}$. Elle peut être décrite comme la capacité de stockage dynamique des échantillons d'agrégats en vrac. Pour une microstructure d'agrégat donnée, elle doit varier de façon linéaire avec la masse volumique apparente. En conséquence, si les agrégats ne sont soumis à aucune modification de la microstructure ni à aucune interaction avec le liant, leur contribution à la capacité de stockage dynamique du béton sera égale à :

$$\xi^*_{\text{agrégat}} = \frac{\rho^*_{\text{agrégat}}}{\rho_{\text{agrégat}}} \xi^{\text{idéal}}_{\text{agrégat}} \qquad (2.6)$$

$\xi^*_{\text{agrégat}}$ a été calculée pour toutes les formulations et les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.15**. Pour les formulations à base de chanvre, $\xi^*_{\text{agrégat}}$ est très proche de la capacité de stockage dynamique du béton (c'est-à-dire le $\xi_{\text{idéal}}$ du béton). Cela indique que la chènevotte joue un rôle principal dans le comportement hygroscopique dynamique de ces formulations et que le liant n'altère pas de manière significative son potentiel hygroscopique. Au contraire, les valeurs de $\xi^*_{\text{agrégat}}$ sont nettement supérieures à celles de $\xi_{\text{idéal}}$ pour les formulations à base de moelle. Cette observation est une autre preuve de la forte interaction entre le liant et la moelle, qui altère son potentiel hygroscopique. Elle est cohérente avec les différences de comportement qui ont été observées pour les formulations à base de moelle pour la conductivité thermique et la diffusivité de la vapeur. Tous ces résultats convergent vers le fait que lorsqu'elle est mélangée au liant, la moelle de tournesol et de maïs subit des transformations microstructurelles assez importantes, qui limitent sa contribution à la fois à l'isolation thermique et au potentiel de tampon hydrique.

En conséquence, un des défis pour l'utilisation optimisée de ce type d'agrégats pourrait être le développement de liants spécifiques qui limiteraient ces interactions tout en conservant une résistance mécanique acceptable. Une autre possibilité serait de développer une méthode qui permette de stabiliser le granulat végétal avant de l'intégrer au béton afin de préserver ses propriétés microstructurelles.

Malgré cette observation, les performances mécaniques, thermiques et hygroscopiques des bétons à base de moelle testés restent assez proches de celles des bétons à base de chanvre. De plus, ce type de granulat a permis de fabriquer un composite d'isolation de faible masse volumique avec une conductivité thermique et des performances hygroscopiques très compétitives. Ainsi, même si des recherches supplémentaires doivent être menées afin d'optimiser leur utilisation, les granulats à base de moelle semblent particulièrement prometteurs.

2.3.5. Conclusion

Dans cette campagne expérimentale, des bétons végétaux fabriqués avec trois types de liants mélangés à de la chènevotte, de la moelle de tournesol et/ou de la moelle de maïs ont été étudiés. Même si ces bétons d'origine végétale ne peuvent pas être utilisés dans les éléments porteurs du bâtiment, certains d'entre eux (HB-H, C2-H+S et C2-S) peuvent être utilisés comme enduit, comme mur, comme sol ou en toiture selon le guide français de construction en chanvre, alors que d'autres peuvent être utilisés comme matériau de toiture (HB-S et HB-M). Cela prouve que les bétons de moelle peuvent avoir les mêmes applications que les bétons de chanvre. Il a été constaté que la résistance mécanique des bétons végétaux est proportionnelle à la masse volumique, comme l'est

aussi la conductivité thermique. De plus, il a été observé que la conductivité thermique est également influencée plus modérément par le type d'agrégat et le type de liant. Il a été également mis en évidence que la moelle de tournesol et la moelle de maïs ont un comportement très proche dans tous les aspects.

Dans cette étude, certains bétons présentent des caractéristiques hygrothermiques remarquables, en particulier ceux à base de chanvre (C2-H, C1-H et HB-H). Nous pouvons donc conclure que le type de granulat a un impact considérable sur ces propriétés. Un phénomène d'hystérésis est présente pour toutes les formulations, comme on l'observe couramment dans les matériaux biosourcés. L'étude de la MBV est plus précise lorsqu'elle est calculée à partir des cycles de l'humidité relative plutôt qu'à partir des courbes de sorption, étant donné que les cycles représentent plus fidèlement le comportement dynamique.

Pour toutes les propriétés susmentionnées, il a été remarqué que dans la plupart des cas, le comportement des matériaux ne peut pas être correctement expliqué par le type d'agrégat ou le type de liant. Au contraire, des interactions entre le liant et l'agrégat ont été aperçues d'après l'étude de certaines propriétés, de façon nettement plus marquée pour la moelle. Lorsque la variation des propriétés mécaniques semble être justifiée par les différences de masse volumique, les propriétés thermiques des bétons présentent des incohérences, puisque la moelle est un meilleur isolant que la chènevotte, mais les bétons à base de moelle ont une conductivité systématiquement plus importante que les bétons de chènevotte. De plus, la relation entre $\xi^*_{\text{agrégat}}$ et $\xi_{\text{idéal}}$ révèle que la moelle au sein des bétons n'arrive pas à exprimer son potentiel hygroscopique au même niveau que la chènevotte, ce qui induit à penser qu'elle subit des transformations microstructurelles importantes. Dans les deux cas, il s'agit vraisemblablement d'une déformation plastique de la moelle en soit ou de sa structure poreuse, qui peut se voir bouchée par la présence d'espèces minérales issu de la calcification ou par le liant, dans le cas où il arrive à pénétrer dans l'agrégat. Le comportement inattendu de la conductivité thermique peut être dû également à une perturbation de la prise du liant. Enfin, le comportement hystérétique des bétons de chènevotte suggère une capacité de transfert d'humidité très forte entre celle-ci et le liant qui ne se manifeste pas pour les bétons à base de moelle.

Pour conclure, les bétons de moelle étudiés dans ce sous-chapitre répondent aux exigences mécaniques et hygrothermiques attendues pour les matériaux isolants biosourcés. Cependant, probablement en raison des interactions entre le liant et les particules de moelle, le potentiel hygrothermique de ces dernières au sein du béton semble être réduit. Ce résultat suggère qu'il serait intéressant de rechercher des liants spécifiques pour les agrégats de moelle qui améliorent les propriétés hygroscopiques et mécaniques du béton.

2.4. Conclusion générale du chapitre

Ce chapitre a mis en évidence l'impact des liants, des agrégats et des couples liant-agrégat sur les propriétés macroscopiques des bétons, notamment sur les propriétés hygrothermiques. D'un côté, les bétons à base de moelle présentés dans la section **§2.2** ont tous des propriétés globalement proches les uns des autres. Etant donné qu'ils sont fabriqués à partir du même liant et d'agrégats de la même nature, il semble judicieux de supposer qu'ils présentent des microstructures semblables.

En revanche, on observe de fortes disparités entre les bétons de chanvre et les bétons de moelle, ainsi qu'entre des bétons à base de différents liants. Leur microstructure, qui peut se voir modifiée par des phénomènes d'interaction entre les deux composants, est soupçonnée avoir un rôle important dans les propriétés hygrothermiques macroscopiques. Par conséquent, une étude approfondie des paramètres géométriques microscopiques des bétons est requise pour mieux comprendre le comportement des matériaux étudiés.

Chapitre 3 : Lien entre la morphologie du réseau poreux et le comportement hygrothermique

Table des matières

3.1 Introduction 116
3.2 Paramètres géométriques et propriétés acoustiques des matériaux poreux 117
3.2.1 Paramètres géométriques 117
3.2.2 Propriétés acoustiques 121
3.3 Modèles acoustiques 123
3.4 Etude de la morphologie poreuse par les méthodes acoustiques . 124
3.4.1 Matériaux 124
3.4.2 Méthode de caractérisation acoustique (tube de Kundt) . 127
3.4.3 Résultats 132
3.4.4 Discussion 137
3.5 Lien avec les propriétés hygrothermiques 137
3.5.1 Matériaux 137
3.5.2 Méthodes 137
3.5.3 Résultats 138
3.5.4 Discussion 140
3.6 Conclusion 148

Nomenclature du chapitre

Caractères latins

Désignation	Description	Unité
A	Surface de l'interface fluide – matrice poreuse par unité de volume	[m^2]
A_e	Surface de l'échantillon exposée	[m^2]
c_0	Vitesse du son dans l'air libre	$[m/s]$
C_p	Chaleur spécifique / Capacité thermique du matériau	[J/(kg·K)]
d	Epaisseur de l'échantillon	$[m]$
f	Fréquence	[Hz]
f_d	Fréquence de découplage de phase	[Hz]
$\vec{I}$	Intensité acoustique	[Pa·m/s]
$\Im$	Partie imaginaire d'un nombre complexe	[–]
$\vec{I}_i$	Intensité acoustique incidente	[Pa·m/s]
$\vec{I}_t$	Intensité acoustique transmise	[Pa·m/s]
J_0,J_1	Fonctions de Bessel de première espèce d'ordre 0 et 1	[–]
j	$\sqrt{-1}$	[–]
K	Module d'incompressibilité dynamique	[Pa]
k	Nombre d'onde	[rad/m]
k_0	Perméabilité visqueuse statique	$[m^2]$
k_0'	Perméabilité thermique statique	$[m^2]$
K_a	Module d'incompressibilité adiabatique d'un fluide libre	[Pa]
k_{air}	Nombre d'onde de l'air	[rad/m]
L	Longueur du trajet poreux moyen	$[m]$
L_{KT}	Longueur effective du tube de Kundt	[cm]
N_{Pr}	Nombre de Prandtl de l'air	[–]
P	Pression totale	[Pa]
p	Surpression acoustique	[Pa]
P_0	Pression ambiante	[Pa]
p_0	Amplitude de l'onde incidente	[Pa]
p_i	Surpression acoustique de l'onde incidente	[Pa]
p_r	Surpression acoustique de l'onde réfléchie	[Pa]

p_t	Surpression acoustique de l'onde transmise	[Pa]
q_v	Débit volumétrique d'air qui traverse l'éprouvette	[m^3/s]
R	Résistivité d'un pore cylindrique	[Pa·s/m^2]
$\mathcal{R}$	Coefficient de réflexion	[–]
$\Re$	Partie réelle d'un nombre complexe	[–]
R_0	Constante spécifique de l'air	[J/(kg·K)]
R_{KT}	Rayon du tube de Kundt	[cm]
S	Section du pore	[m]
T	Température	[K]
t	Temps	[s]
TL	Indice d'affaiblissement acoustique	[dB]
Tr	Coefficient de transmission	[–]
V	Volume	[m ^{3}]
$\boldsymbol{V}$	Vitesse particulaire	[m/s]
$\vec{v}$	Vitesse d'écoulement	[m/s]
V_0	Volume de l'enceinte	[m ^{3}]
$v_{non\ visqueux}$	Vitesse du fluide dans la surface du pore pour un fluide non visqueux	[m/s]
$V_{squelette}$	Volume du squelette	[m^3]
V_t	Volume total du matériau	[m^3]
x	Epaisseur du matériau dans la direction de propagation de l'onde acoustique	[m]
Z	Résistance apparente de l'échantillon	[m^2·s·Pa/kg]
Z_0	Impédance caractéristique de l'air libre	[Pa·s/m]
Z_c	Impédance caractéristique d'un milieu	[Pa·s/m]
Z_s	Impédance de surface	[Pa·s/m]

Caractères grecs

Désignation	**Description**	**Unité**
α	Coefficient d'absorption acoustique	[–]
α_0	Tortuosité visqueuse statique	[–]
α_0'	Tortuosité thermique statique	[–]
α_∞	Tortuosité	[–]
α_{dyn}	Tortuosité dynamique	[–]
β	Facteur de compressibilité dynamique	[–]

γ	Ratio de chaleur spécifique	[–]
δ_t	Epaisseur de couche limite thermique	[m]
δ_v	Epaisseur de couche limite visqueuse	[m]
η	Viscosité dynamique du fluide	[Pa·s]
θ	Angle d'incidence de l'onde	[°]
Λ	Longueur caractéristique visqueuse	[m]
Λ'	Longueur caractéristique thermique	[m]
λ	Conductivité thermique	[W/(m·K)]
λ_{air}	Conductivité thermique de l'air	[W/(m·K)]
μ	Viscosité de cisaillement de l'air	[Pa·s]
ρ	Densité dynamique	[kg/m^3]
ρ_0	Masse volumique ambiante d'un fluide libre	[kg/m^3]
$\rho_{air,0}$	Masse volumique de l'air au repos	[kg/m^3]
ρ_{app}	Masse volumique apparente du matériau granulaire ou du solide	[kg/m^3]
ρ_{grain}	Masse volumique du grain d'agrégat	[kg/m^3]
ρ_s	Masse volumique statique d'un fluide	[kg/m^3]
$\rho_{squelette}$	Masse volumique du squelette	[kg/m^3]
ρ_t	Masse volumique totale	[kg/m^3]
σ	Résistivité au passage de l'air	[Pa·s/m^2]
σ_e	Résistivité effective au passage de l'air	[Pa·s/m^2]
σ_p	Résistivité au passage de l'air du modèle de Miki	[Pa·s/m^2]
τ	Facteur de transmission acoustique	[–]
ϕ	Porosité totale	[–]
ϕ_{inter}	Porosité intergranulaire	[–]
ϕ_{intra}	Porosité intragranulaire	[–]
ω	Pulsation	[rad/s]

3.1. Introduction

Les propriétés mécaniques et hygrothermiques des matériaux à base de moelle ont été étudiées et comparées aux propriétés du béton de chanvre dans le chapitre précédent. Un manque d'information sur leur microstructure a été mis en évidence, raison pour laquelle les paramètres géométriques du béton de moelle et de chanvre seront étudiés par la voie acoustique. En effet, des nombreux modèles, parmi eux le modèle Johnson Champoux Allard (JCA) (Cambonie & Gourdon, 2018; Glé, 2013; Gourdon et al., 2015), décrivent les propriétés acoustiques des matériaux poreux à partir des paramètres géométriques de leur microstructure. En inversant ces modèles, des techniques de mesure acoustique comme le tube de Kundt permettent de déterminer des caractéristiques du réseau poreux, ces paramètres étant : la porosité ϕ, la résistivité au passage de l'air σ, la tortuosité α_∞, et les longueurs caractéristiques associées aux phénomènes visqueux Λ et thermiques Λ'.

La caractérisation acoustique des bétons C2-H*, C2-S et C2-H+S, ainsi que celle des agrégats S et H a été réalisée suivant la méthode présentée par Philippe Glé lors de sa thèse de doctorat à l'ENTPE (Glé, 2013). De plus, les résultats obtenus ont été comparés aux résultats obtenus par P. Glé pour les bétons de chanvre H98-G, H98-UK, H98-F, CLIN-UK, CLIN-G et C1-F dans le but d'enrichir la discussion.

Sur la base de cette caractérisation, l'enjeu sera alors d'explorer l'existence potentielle de relations entre les propriétés hygrothermiques étudiées dans le Chapitre 2 et les propriétés géométriques des milieux poreux obtenues par une caractérisation indirecte à l'aide de mesures acoustiques. En effet, les chapitres précédents ont montré que l'évaluation des paramètres hygroscopiques pouvait être particulièrement longue et complexe. Ainsi, la mise au point de moyens permettant d'obtenir rapidement une valeur approchée de ces paramètres est un enjeu important compte tenu des fortes contraintes économiques et temporelles souvent présentes dans les projets de construction.

En outre, indépendamment de leur utilité pour caractériser leur microstructure, les caractéristiques acoustiques des bétons biosourcés sont des données performancielles de premier ordre. En effet l'isolation acoustique des maisons et des bâtiments est indispensable dans un contexte où les bruits des transports, des équipements du bâtiment et de la ville en général font partie du quotidien. Des réglementations comme la NRA 2000 pour le logement collectif établissent les exigences légales en matière d'isolation phonique. Etant donné que les matériaux de construction d'origine végétale ont par nature un effet de masse moins important, l'étude approfondie de leur comportement acoustique est une exigence incontournable.

La performance acoustique des matériaux se décline en deux fonctions principales. D'un côté, la limitation les réflexions sonores, réduisant ainsi les réverbérations. Cette fonction est liée au phénomène d'absorption. D'un autre côté, la capacité à réduire la transmission du son. Cela est lié au phénomène d'affaiblissement acoustique et peut être accompli par trois mécanismes de dissipation d'énergie : les dissipations visqueuses, les

dissipations thermiques et les dissipations structurelles. Quand le matériau est trop lourd ou trop rigide, les ondes acoustiques ne sont pas capables de lui transmettre leurs vibrations et la dissipation structurelle devient négligeable.

3.2. Paramètres géométriques et propriétés acoustiques des matériaux poreux

Dans la présente section, les caractéristiques clés pour comprendre le comportement acoustique des matériaux poreux seront détaillées. Tout d'abord, les paramètres géométriques du réseau poreux seront définis, puisqu'ils conditionnent le passage des ondes acoustiques à travers le matériau. En effet, la quantité de pores et leur disposition, ainsi que la facilité avec laquelle l'air traverse le matériau, sont des paramètres intimement liés aux propriétés acoustiques. Ces dernières sont la capacité du matériau pour absorber les ondes acoustiques et le taux d'affaiblissement de celles-ci au passage à travers le matériau.

3.2.1. Paramètres géométriques

3.2.1.1. Porosité

La porosité totale (ϕ), déjà présentée dans le **Chapitre 1**, représente la relation entre le volume occupé par les espaces vides (pores) et le volume total du matériau. Par conséquent, la porosité est un conditionnant indirect de la surface de contact entre la phase solide et la phase fluide, qui dépendra également de la taille des pores et de leur connectivité.

Porosité totale ouverte

Les bétons étudiés dans cette campagne expérimentale sont constitués de trois éléments différents : le liant, les agrégats et l'eau. Le liant en poudre combiné à l'eau forme une pâte poreuse homogène mais, lorsqu'il est combiné aux agrégats, le mélange est plutôt hétérogène et de nombreux espaces sont créés à l'intérieur. Lors de l'étude de la porosité, il faut tenir compte du fait que les matériaux ont une porosité à grande échelle, qui correspond aux espaces d'air laissés entre plusieurs particules d'agrégats et entre les particules d'agrégats et le liant, et une porosité à petite échelle, qui correspond aux pores à l'intérieur de la pâte de liant et à l'intérieur des agrégats (voir **Figure 3.1**).

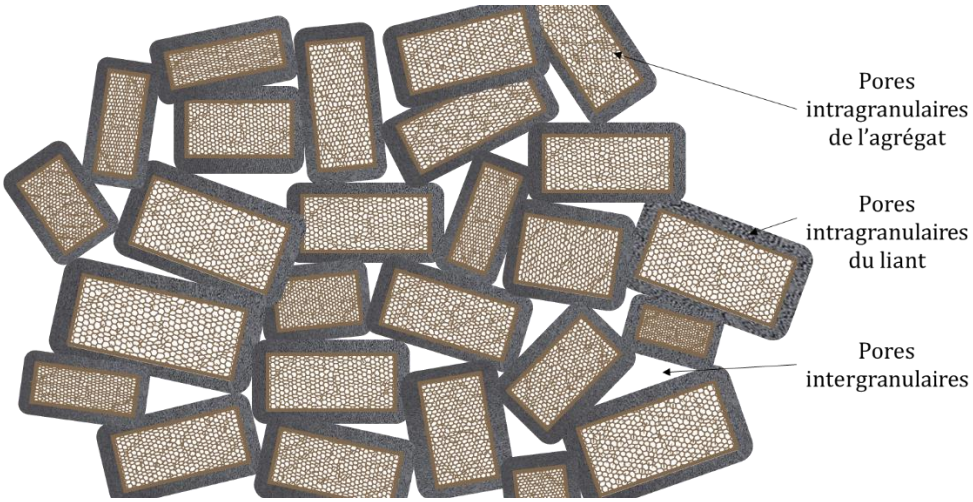


Figure 3.1 - Description des différentes échelles de porosité.

La porosité totale ouverte est supposée être égale à la porosité totale bien qu'il s'agisse d'une approximation, car il y a probablement une certaine fraction des pores qui sont fermés et donc inaccessibles à la technique de mesure de la porosité. En outre, la précision de la mesure de porosité dépendra également du fluide utilisé et de sa viscosité et incompressibilité ; en effet, les pores ne sont accessibles que si la pression du fluide est suffisamment élevée. Pour les fluides visqueux et incompressibles, la pression sera plus élevée, notamment pour les petits pores, ce qui peut endommager le matériau.

Porosité intragranulaire

La porosité intragranulaire ϕ_{intra} peut être calculée à partir de la formule **(1.2)** présentée dans le Chapitre 1, lorsque la méthode d'obtention de ϕ_{inter} sera expliquée dans la **§3.4** de ce chapitre.

3.2.1.2. Résistivité

Définie dans la norme ISO 9053-1:2018 (International Organization for Standardization, 2018), la résistivité au passage de l'air (σ) décrit la capacité d'un matériau à freiner l'écoulement d'un fluide à travers sa structure par unité d'épaisseur et elle est définie par **(3.1)**. Elle est mesurée en Pa·s/m^2.

$$\sigma = \frac{\Delta P \cdot A_e}{q_v \cdot d} \tag{3.1}$$

Avec ΔP [Pa] la différence de pression d'air de part et d'autre de l'éprouvette par rapport à l'atmosphère, A_e [m^2] la section de l'éprouvette perpendiculaire au sens de l'écoulement, q_v [m^3/s] le débit volumétrique d'air qui traverse l'éprouvette et d [m] l'épaisseur de l'éprouvette dans le sens de l'écoulement.

La résistivité est intrinsèquement liée à la dissipation visqueuse entre le fluide et le squelette solide qui est à l'origine de l'absorption acoustique. Elle peut être mesurée grâce à un dispositif expérimental, décrit dans la même norme ISO 9053-1 :2018, qui mesure la chute de pression de l'écoulement au passage par l'éprouvette. Cependant, elle peut

également être estimée en fonction des mesures acoustiques, comme il sera expliqué dans la **§3.4**. Cette deuxième méthode a été appliquée dans ce manuscrit puisque la manipulation requise pour la mesure directe présente le risque d'abîmer les échantillons.

3.2.1.3. Tortuosité

La tortuosité (α_∞) représente la sinuosité de la structure poreuse, c'est-à-dire, le désordre du matériau ou l'élongation de la trajectoire du fluide ou de l'onde par rapport à la trajectoire rectiligne théorique. Elle conditionne la déviation de l'onde acoustique au passage par le matériau et elle est calculée selon **(3.2)** :

$$\alpha_\infty = \frac{\frac{1}{V}\int_V v^2 dV}{\left(\frac{1}{V}\int_V \vec{v} dV\right)^2} \tag{3.2}$$

Où α_∞[-] est supérieur ou égal à 1, V [m^3] correspond au volume et $\vec{v}$ [m/s] correspond à la vitesse de l'écoulement.

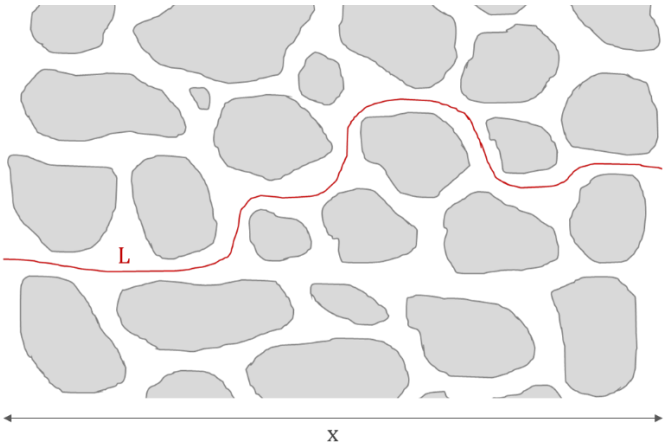


Figure 3.2 - Représentation approximative de la tortuosité. Inspiré de *(O'Connell et al., 2010)*.

Au niveau macroscopique, elle est estimée selon **(3.3)**, dont L (la longueur du trajet poreux moyen) et x (l'épaisseur du matériau dans la direction de propagation) sont représentés dans la **Figure 3.2**.

$$\alpha_\infty \approx \left(\frac{L}{x}\right)^2 \tag{3.3}$$

La tortuosité peut être mesurée à travers la conductivité électrique ou à partir d'ultrasons entre autres méthodes. Concrètement, la caractérisation par ultrasons développée par (Allard et al., 1998; Umnova et al., 2005) est une méthode simple et précise. Elle consiste à mesurer le retard que l'onde acoustique subit dans sa propagation à travers un matériau dans un dispositif expérimental composé d'un cylindre qui héberge l'échantillon, un haut-parleur dans l'extrémité supérieure du cylindre et deux microphones disposés selon le schéma de la **Figure 3.3**. Une onde de fréquence 48 kHz est émise par le haut-parleur et la tortuosité est calculée à partir du retard entre les signaux captés par les microphones selon **(3.4)**.

$$\alpha_\infty = \frac{c_0 \cdot \Delta t}{d} \qquad (3.4)$$

Avec c_0 [m/s] la vitesse du son dans l'air libre, Δt [s] le décalage temporel entre les signaux reçus par les deux microphones et d l'épaisseur de l'échantillon.

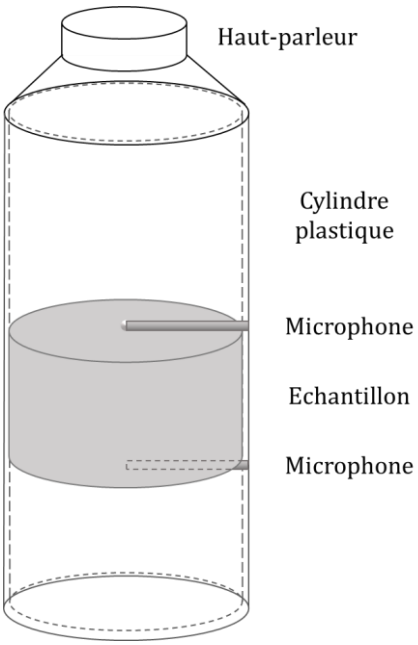


Figure 3.3 - Représentation du dispositif pour mesurer expérimentalement la tortuosité. Inspiré de *(Glé, 2013)*.

La tortuosité peut également être mesurée de façon indirecte, comme il sera détaillé dans la **§3.4**.

3.2.1.4. Longueur caractéristique visqueuse

La longueur caractéristique visqueuse (Λ) est un paramètre géométrique du réseau poreux qui décrit les effets visqueux à des moyennes et hautes fréquences. Il a été présenté par (Johnson et al., 1987) et son expression mathématique est la suivante :

$$\Lambda = 2\frac{\int_V v_{non\ visqueux}^2 dV}{\int_A v_{non\ visqueux}^2 dA} \qquad (3.5)$$

Où $v_{non\ visqueux}$ correspond à la vitesse du fluide dans la surface du pore pour un fluide non visqueux (les forces visqueuses sont considérées négligeables devant les forces inertielles), V est le volume de fluide par unité de volume de matériau, A représente la surface de l'interface fluide – matrice poreuse par unité de volume du matériau et Λ est exprimé en mètres [m]. Dans un milieu poreux typique, les effets visqueux se produisent dans les interconnexions entre pores puisque ce sont les zones avec la plus petite section. Par conséquent, la longueur caractéristique visqueuse est une approximation du rayon des dites interconnexions (voir **Figure 3.4**) sauf quand la valeur du rayon est trop petite. Dans ce cas, la couche limite visqueuse modifie l'écoulement de façon significative.

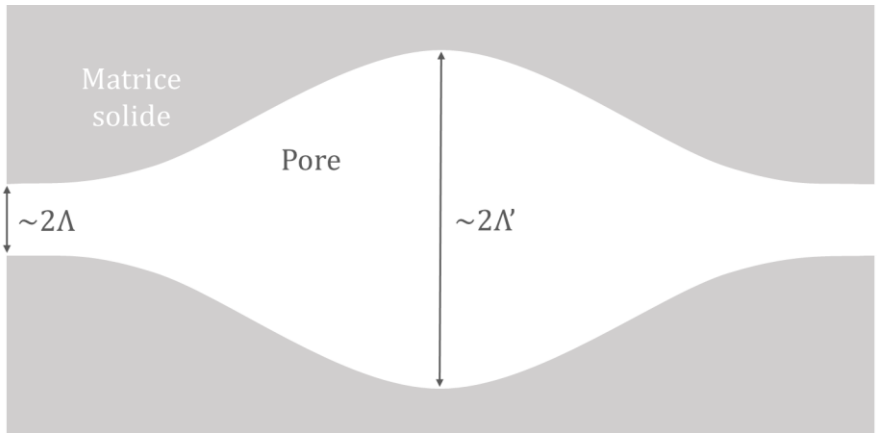


Figure 3.4 - Représentation des longueurs caractéristiques visqueuse et thermique du réseau poreux

3.2.1.5. Longueur caractéristique thermique

La longueur caractéristique thermique (Λ') est un paramètre homologue à la longueur caractéristique visqueuse présenté par (Champoux & Allard, 1991). Il décrit les effets thermiques dans le réseau poreux à moyennes et hautes fréquences. Ces effets sont le résultat des échanges de chaleur entre l'air et la matrice solide, qui produisent une dissipation d'énergie. Son expression mathématique est présentée dans **(3.6)**.

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{\int_{S_p} dS_p}{\int_V dV} \tag{3.6}$$

Avec Λ' exprimé en mètres [m] et S_p [m^2] la surface latérale des pores.

Contrairement aux effets visqueux, les effets thermiques sont localisés au niveau des sections de pores les plus grandes, d'où Λ' correspond approximativement au rayon maximal des pores (voir **Figure 3.4**). Par définition, Λ' est toujours supérieur à Λ. Les pertes issues des effets thermiques sont généralement plus importantes que les pertes par effets visqueux.

3.2.2. Propriétés acoustiques

Dans la propagation des ondes acoustiques, quand une onde plane rencontre un obstacle, une partie de l'onde incidente, caractérisée par sa pression (p_i) et son angle d'incidence θ, est réfléchie sur la surface du matériau générant une onde de pression p_r et d'angle $-\theta$. Une autre partie génère une onde dans le matériau, dont une partie sera dissipée et une autre sera transmise à travers le matériau avec une pression p_t et le même angle θ par rapport à la normale, comme représenté dans la **Figure 3.5**. La proportion de l'énergie réfléchie et dissipée dépend de chaque matériau. Toutes les pressions sont fonction du temps et de la position.

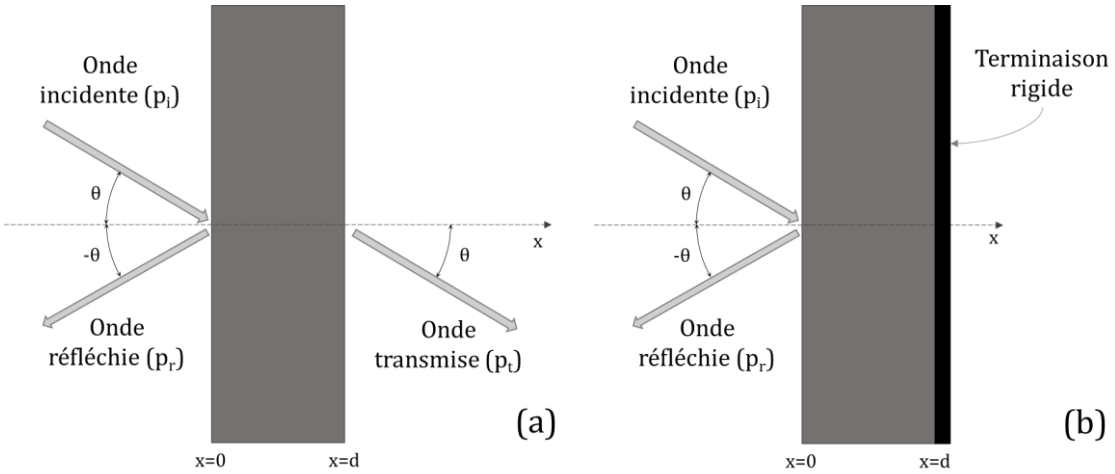


Figure 3.5 - Comportement des ondes acoustiques planes face à un obstacle. Inspiré de *(Glé, 2013)*.

3.2.2.1. Indice d'affaiblissement acoustique

L'indice d'affaiblissement acoustique (TL) est lié à l'isolation acoustique des bâtiments. Un matériau est dit isolant si l'énergie transmise est négligeable ou considérablement réduite par rapport à l'énergie incidente. Il est défini à partir de la **Figure 3.5a** et son expression mathématique est :

$$TL(\theta) = -10 \log \tau(\theta) \tag{3.7}$$

$$\tau(\theta) = \frac{I_t(\theta)}{I_i(\theta)} = \left|\frac{p_t(\theta, x = d)}{p_i(\theta, x = 0)}\right|^2 \tag{3.8}$$

Avec I_t et I_i l'intensité de l'onde incidente et transmise, respectivement et TL exprimé en décibels [dB]. Cette expression peut varier en fonction du type d'exposition aux ondes sonores (champ libre plan, champ diffus, etc.).

3.2.2.2. Coefficient d'absorption acoustique

L'absorption acoustique (α) est liée à la dissipation visqueuse par frottement entre la phase solide et la phase fluide du réseau poreux et à la dissipation thermique entre ces deux phases, raison pour laquelle, elle est favorisée par une grande surface de contact, propre des matériaux très poreux. De plus, la porosité doit être ouverte pour que l'onde puisse pénétrer dans le matériau, les pores fermés ne participant pas au phénomène de dissipation (Perrot, 2006). Ce coefficient est généralement défini pour un matériau positionné juste à côté d'une terminaison rigide dont la fonction est d'imposer une vitesse normale de propagation nulle, comme le montre la **Figure 3.5b**. Pour calculer le coefficient d'absorption (α) il faut passer par le coefficient de réflexion ($\mathcal{R}$) calculé pour la susmentionnée configuration.

$$\mathcal{R}(\theta) = \frac{p_r(\theta, x = 0)}{p_i(\theta, x = 0)} \tag{3.9}$$

$$\alpha(\theta) = 1 - |\mathcal{R}(\theta)|^2 \qquad (3.10)$$

Avec α [-] compris entre 0 et 1 et fonction de la fréquence et $\mathcal{R}$ [-].

Selon (Cérézo, 2005), dans le cas des matériaux à porosité simple, le coefficient d'absorption α augmente régulièrement avec la fréquence, lorsque les matériaux à double porosité présentent des pics d'absorption. Tout comme l'indice d'affaiblissement, l'expression du coefficient d'absorption peut varier en fonction du type d'exposition.

3.3. Modèles acoustiques

Les modèles acoustiques utilisés dans ce travail, qui seront résumés ci-après, sont Zwikker & Kosten (Zwikker & Kosten, 1949) et Johnson-Champoux-Allard (JCA) (Champoux & Allard, 1991; Johnson et al., 1987). D'autres modèles acoustiques parmi les plus significatifs seront décrits dans l'**Annexe E**.

Zwikker & Kosten, 1949

Aussi appelé le « modèle de la fréquence réduite », ce modèle fluide-équivalent traite le problème d'une onde plane qui se propage au sein des pores cylindriques (qui agissent en tant que guides d'onde) non connectés d'un matériau poreux, dans la direction de l'axe du tube.

A partir du modèle de Kirchhoff (voir **Annexe E**), Zwikker et Kosten développent un modèle simplifié (Zwikker & Kosten, 1949) pour une plage de fréquence réduite (en dessous de 10^8 Hz) et une plage de rayons de pores déterminée (à partir de 10µm). Leur modèle permet de calculer de façon découplée les effets visco-inertiels et thermiques ayant lieu entre le fluide et la matrice poreuse. Pour cela, ils calculent comme Kirchhoff deux variables, la densité dynamique $\rho(\omega)$ $[kg/m^3]$ et le module d'incompressibilité dynamique du milieu $K(\omega)$ [Pa] (fonctions complexes qui dépendent de la fréquence), à partir de la fréquence et de la forme du pore, déterminée par la tortuosité α_∞, la résistivité σ et la porosité ϕ.

$$\rho = \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi}\left[1 - \frac{2}{u\sqrt{-j}}\frac{J_1(u\sqrt{-j})}{J_0(u\sqrt{-j})}\right]^{-1} \qquad (3.11)$$

$$K = \frac{\gamma P_0}{\phi}\left[1 + \frac{2(\gamma-1)}{\sqrt{N_{Pr}}u\sqrt{-j}}\frac{J_1\left(\sqrt{N_{Pr}}u\sqrt{-j}\right)}{J_0\left(\sqrt{N_{Pr}}u\sqrt{-j}\right)}\right]^{-1} \qquad (3.12)$$

Avec

$u = \sqrt{\frac{8\omega\rho_0\alpha_\infty}{\sigma\phi}}$

J_0, J_1 : fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1, respectivement [-]

P_0 : pression atmosphérique [Pa]

γ : ratio de chaleur spécifique [-]
N_{Pr} : nombre de Prandtl de l'air [-]

Ils considèrent que, malgré les hypothèses simplistes sur la géométrie des pores, le modèle peut être adapté pour des géométries plus complexes.

Johnson-Champoux-Allard (JCA), 1991

Le modèle JCA est la combinaison de deux travaux : celui de Johnson, Koplik et Dashen (Johnson et al., 1987) et celui de Champoux et Allard (Champoux & Allard, 1991). Il est particulièrement adapté pour décrire le comportement des matériaux fibreux ou les matériaux avec des pores à section irrégulière sans variations importantes de la section.

En ce qui concerne les effets visqueux, (Johnson et al., 1987) définissent la densité dynamique $\rho(\omega)$ à partir de 4 paramètres : la résistivité σ, la porosité ouverte ϕ, la tortuosité α_∞ et la longueur caractéristique visqueuse Λ selon **(3.13)**.

$$\rho(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi}\left[1 + \frac{\sigma\phi}{j\omega\rho_0\alpha_\infty}\sqrt{1 + j\frac{4\alpha_\infty^2\eta\rho_0\omega}{\sigma^2\Lambda^2\phi^2}}\right] \tag{3.13}$$

Avec η la viscosité de l'air.

D'une autre part, les effets thermiques ont été décrits par (Johnson et al., 1987) à partir de 2 paramètres : la porosité ouverte ϕ et la longueur caractéristique thermique Λ'. Le module d'incompressibilité dynamique $K(\omega)$ est alors défini selon **(3.14)**.

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0/\phi}{\gamma - (\gamma - 1)\left[1 - j\frac{8\lambda}{\Lambda'^2 C_p\rho_0\omega}\sqrt{1 + j\frac{\Lambda'^2 C_p\rho_0\omega}{16\lambda}}\right]^{-1}} \tag{3.14}$$

Ce modèle présente l'inconvénient de ne pas être exact au niveau de sa limite à basses fréquences.

3.4. Etude de la morphologie poreuse par les méthodes acoustiques

3.4.1. Matériaux

3.4.1.1. Agrégats végétaux

Dans cette campagne expérimentale, on a étudié la moelle du tournesol et la chènevotte. Alors qu'un seul type de moelle de tournesol (S), d'origine française et provenant de la coopérative agricole Dauphinoise, a été considéré, quatre types différents de chanvre ont été utilisés. Parmi les chènevottes, trois types proviennent du projet de recherche mené par (Glé, 2013) : F, G et UK (CA, CB et CC selon la notation de P.

Glé). Au total, deux chènevottes proviennent de France (F et H, dont H provient du projet IBIS), tandis qu'un troisième provient d'Allemagne (G) et un quatrième, du Royaume-Uni (UK). La chènevotte H est la même que celle du **Chapitre 2**. La masse volumique moyenne et la taille moyenne des grains de chaque agrégat sont indiquées dans le **Tableau 3.1**, ainsi que l'écart type. Ces valeurs ont été calculées comme la masse volumique et la taille moyennes log-normales.

Tableau 3.1 - Masse volumique et taille moyenne des granulats.

Formulation	**H**	**S**	**F**	**UK**	**G**
$\boldsymbol{\rho_{squelette}}$ **[kg/m³]**	769,2±2	1400±1	964±2	1104±7	1213±10
Largeur [mm]	4,1±NA	-	1,30±0,78	1,71±1,00	1,53±1,02
Longueur [mm]	7,6±NA	-	4,61±3,09	6,17±4,07	5,82±4,79
Diamètre [mm]	-	3,73±2,02	-	-	-

3.4.1.2. Liants

Quatre types de liants différents ont été étudiés. Le premier, C2, correspond au liant Calco, est un mélange de chaux hydraulique, de charges calcaires, d'adjuvants hydrophobes et rhéologiques, comme il a été expliqué dans les chapitres préalables. Les trois autres liants proviennent de (Glé, 2013). Le liant H98 (LD pour P. Glé) est une chaux aérienne très pure (95%), lorsque le liant CLIN (LC pour P. Glé) est un ciment Portland sans aluminate tricalcique C3A et très peu d'oxyde d'aluminium A, où A signifie Al_2O_3. Enfin, le dernier, appelé C1 (LA pour P. Glé), est du PF70, un mélange de 75% de chaux aérienne, 15% de chaux hydraulique et 10% de chaux pouzzolanique. Cette variété de matériaux nous permet de tester notre méthode sur des liants classiques et nouveaux, ainsi que sur différents mélanges de chaux aérienne et de chaux hydraulique, qui ont une énergie grise inférieure à celle des liants classiques.

3.4.1.3. Bétons biosourcés

Neuf échantillons différents, dont la composition est décrite dans le **Tableau 3.2**, ont été fabriqués dans des conditions stables de 50 %HR et 23 °C. Tous les échantillons ont une hauteur de 5 cm et un diamètre de 10 cm. Les échantillons C2-H*, C2-S et C2-H+S, comme les échantillons fabriqués par P. Glé, ont été fabriqués dans des moules cylindriques. Comme il sera expliqué ci-dessous, il est impératif que les échantillons aient un très bon état de surface et des dimensions très précises. Pour cette raison, afin de tenir compte des effets de rétraction, les échantillons cylindriques doivent être fabriqués avec un diamètre légèrement supérieur à 10 cm, soit environ 10,5 cm, puis limés soigneusement à l'aide de papier de verre. Le moule doit avoir une hauteur de 5,15 cm. Le C2-S et le C2-H+S ont été projetés tandis que le reste des échantillons ont été coulés. En particulier, le C2-H* a été fabriqué en 6 couches d'environ 5 cm chacune, chaque couche étant compactée à 0,05 MPa selon les règles professionnelles (Association construire en chanvre & Fédération Française du Bâtiment, 2009). Les formulations H98-G, H98-UK, H98-F,

CLIN-UK, CLIN-G et C1-F ont été coulées en une seule couche et ensuite compactées à 0,05 MPa.

Tableau 3.2 - Récapitulatif de la formulation des bétons.

Formulation	**C2-H***	**C2-S**	**C2-H+S**	**H98-G**	**H98-UK**	**H98-F**	**CLIN-UK**	**CLIN-G**	**C1-F**
Ratio massique agrégat/liant [-]	0,33	0,10	0,17 (H) 0,06 (S)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ratio massique eau/liant [-]	0,88	0,80	1,07	1,86	1,64	1,70	1,03	1,09	1,44
$\boldsymbol{\rho_{sec}}$ **[kg/m³]**	600	550	590	353	392	380	401	374	433

Dans la nomenclature utilisée par (Glé, 2013), H98-G correspond à CB-LD ; H98-UK à CC-LD ;H98-F à CA-LD ; CLIN-UK à CC-LC ; CLIN-G à CB-LC et C1-F à CA-LA.

Les principaux paramètres des échantillons de béton, ainsi que ceux des granulats H et S, sont présentés dans le **Tableau 3.3**. Ces paramètres seront exploités dans les prochaines parties du chapitre.

Tableau 3.3 - Récapitulatif des paramètres principaux des bétons et des agrégats étudiés.

Formulation	**C2-H***	**C2-S**	**C2-H+S**	**S**	**H**	**H98-G**	**H98-UK**	**H98-F**	**CLIN-UK**	**CLIN-G**	**C1-F**
$\boldsymbol{\rho_{app}}$ **[kg/m³]**	-	-	-	14	100	-	-	-	-	-	-
$\boldsymbol{\rho_{squelette}}$ **[kg/m³]**	2000	2391	1967	1400	769	1646	1375	1350	1538	2015	1732
$\boldsymbol{MBV_{pratique}}$ **[g/m²·%RH]**	1,63	1,21	1,71	2,60	2,90	6,17	-	-	-	-	-

Figure 3.6 - Aperçu des bétons biosourcés.

La **Figure 3.6** présente les neuf bétons étudiés dans le cadre de cette campagne expérimentale, de haut en bas, de gauche à droite : C2-H*, C2-S, C2-H+S, H98-G, H98-UK, H98-F, CLIN-UK, CLIN-G et C1-F.

3.4.2. Méthode de caractérisation acoustique (tube de Kundt)

Pour la détermination des propriétés acoustiques, un tube d'impédance également connu sous le nom de "tube de Kundt" a été utilisé dans une configuration avec 3 microphones et sans cavité selon la méthode développée par (Iwase et al., 1998). Cette méthode a été utilisée et expliquée dans (Glé, 2013), mais un résumé de la méthode est présenté dans cette section. Comme le montre la **Figure 3.7**, le tube d'impédance est constitué d'un cylindre en acier bloqué par un haut-parleur à une extrémité et par un support rigide en plastique à l'autre. L'échantillon dont on veut mesurer les propriétés acoustiques est placé juste à côté du support à l'intérieur du tube, tandis que les mesures sont effectuées par un certain nombre de microphones dont la position et la quantité dépendent du type de tube et de la mesure souhaitée.

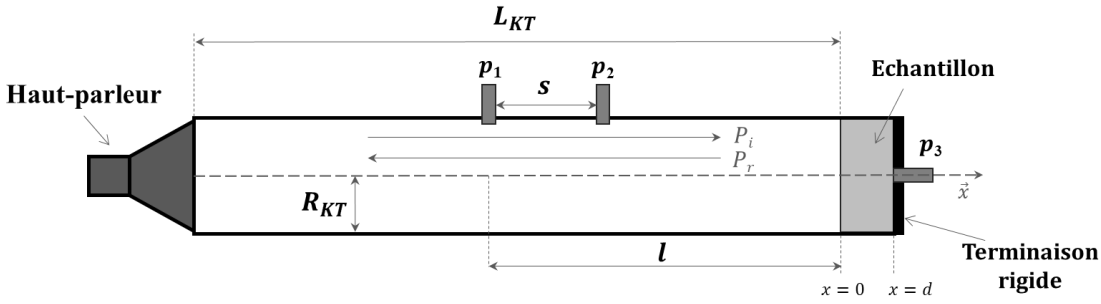


Figure 3.7 - Tube de Kundt avec configuration trois microphones et sans cavité. Inspiré de *(Glé, 2013)*.

Dans le cas de ce projet de thèse, le tube est un B&K Type 4106 de diamètre 100 mm, du groupe Bruel & Kjaer®. Le haut-parleur est alimenté par un amplificateur B&K type 2706, tandis qu'un amplificateur conditionneur B&K type 2690 traite le signal provenant des microphones. Une carte National Instruments NI PXI-1031 génère les signaux sonores. Un support en plexiglas est ajouté à l'extrémité opposée au haut-parleur (terminaison rigide) où l'on loge le troisième microphone. Alors que le coefficient d'absorption acoustique (α) ne nécessite que les deux microphones par défaut placés dans la partie amont du tube, les trois microphones sont nécessaires pour déterminer les paramètres acoustiques intrinsèques, ρ la densité dynamique et K le module d'incompressibilité dynamique. Les dimensions des différents éléments du tube sont spécifiées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 - Dimensions des éléments du tube de Kundt.

Dimensions	$\mathbf{R_{KT}}$	$\mathbf{L_{KT}}$	**l**	**s**	**Fréquence**
B&K 100mm	5 cm	1 m	37 cm	5 cm	100-1950 Hz

Le coefficient d'absorption acoustique (α) représente la partie de l'énergie acoustique d'une onde incidente qui n'est pas réfléchie par le matériau. Il dépend de la fréquence et est déterminé selon la méthode de la fonction de transfert définie dans la norme EN ISO 10534-2 (International Standards Organization 2003) en incidence normale. Pour une onde plane qui se propage dans un tube à ondes stationnaires, la surpression acoustique peut être représentée comme la somme de la pression incidente et de la pression réfléchie :

$$p = p_i + p_r = p_0 e^{j(\omega t - k_{air} x)} + \mathcal{R} p_0 e^{j(\omega t + k_{air} x)} \qquad (3.15)$$

Avec p_0 [Pa] l'amplitude de l'onde incidente, ω la pulsation, $k_{air} = {}^{\omega}/_{c_0}$ [rad/m] le nombre d'onde de l'air et $\mathcal{R}$ [-] le coefficient de réflexion défini dans la **§3.2.2**.

La méthode de détermination de l'absorption consiste à calculer la fonction de transfert complexe H_{12} entre les signaux mesurés par les deux microphones (p_1 pour le microphone 1 et p_2 pour le microphone 2) :

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} \qquad (3.16)$$

$$p_1 = p_0 e^{j(\omega t - k_{air} l)} + \mathcal{R} p_0 e^{j(\omega t - k_{air}(l - s))} \qquad (3.17)$$

$$p_2 = p_0 e^{j(\omega t + k_{aie}(l - s))} + \mathcal{R} p_0 e^{j(\omega t - k_{air} l)} \qquad (3.18)$$

Avec cette information, ainsi que la distance entre les deux microphones (Δx) et la distance entre le microphone numéro 1 et la surface de l'échantillon (l), on peut trouver le coefficient de réflexion $\mathcal{R}$ et α à travers **(3.19)** et **(3.20)**.

$$\mathcal{R} = \frac{H_{12} - e^{-jk_{air}s}}{e^{jk_{air}s} - H_{12}} e^{2jk_{air}l} \tag{3.19}$$

$$\alpha = 1 - |\mathcal{R}|^2 \tag{3.20}$$

De plus, l'impédance de surface du matériau Z_s, qui représente le rapport entre la pression en surface de l'échantillon et la vitesse de l'onde au même endroit, peut être déduite à partir du coefficient de réflexion $\mathcal{R}$:

$$Z_s = \frac{P}{\vec{v} \cdot \vec{n}} = Z_0 \frac{1 + \mathcal{R}}{1 - \mathcal{R}} \tag{3.21}$$

Avec Z_0 l'impédance caractéristique de l'air libre en (Pa·s/m).

Comme expliqué préalablement, la méthode définie par (Iwase et al., 1998) est utilisée pour déterminer les propriétés intrinsèques du matériau, $k(\omega)$ et $Z_c(\omega)$, à l'aide du tube de Kundt.

Dans cet essai, la pression dans le tube peut s'exprimer comme :

$$p = p_0 e^{j(\omega t - k_{air}x)} + \mathcal{R} p_0 e^{j(\omega t + k_{air}x)}, x \leq 0 \tag{3.22}$$

$$p = A e^{j(\omega t - kx')} + B e^{j(\omega t + kx')}, 0 \leq x \leq d \tag{3.23}$$

Avec x' un système de référence auxiliaire avec l'origine placée en $x = d$ (par conséquent, $x' = x - d$). Etant donné que l'échantillon est adjacent à une terminaison rigide dont l'impédance est considérée infinie, la vitesse normale est supposée nulle en $x' = 0$. Cela fait que $A = B$.

Le signal du troisième microphone peut être exprimé comme :

$$p_3 = 2A e^{j\omega t} \tag{3.24}$$

Si l'on considère la continuité des signaux au niveau de $x = 0$, cela donne :

$$p(x = 0) = p_0 e^{j\omega t}(1 + \mathcal{R}) = 2A e^{j\omega t} \cos(kd) \tag{3.25}$$

Grâce à cette relation, on peut déduire le nombre d'onde k :

$$k = \frac{1}{d} \arccos\left(\frac{(1 + \mathcal{R})p_0}{2A}\right) \tag{3.26}$$

Ensuite, Z_c peut être calculé à partir de l'impédance de surface Z_s définie dans **(3.21)** et du nombre d'onde k comme ceci :

$$Z_c = jZ_s \tan(kd) \tag{3.27}$$

Le coefficient d'affaiblissement acoustique (TL) indique la perte d'énergie acoustique lors de la transmission du son d'une face du matériau à l'autre. Comme pour α, le TL dépend de la fréquence. Il représente directement la réduction de l'intensité sonore en décibels. Il peut être mesuré grâce au microphone en troisième position (Chabriac et al., 2016; Glé, 2013) et calculé selon les formules suivantes :

$$TL = -10\log(|Tr|^2) \tag{3.28}$$

$$Tr = \frac{2e^{jk_{air}d}}{2\cos(kd) + j\sin(kd)\left(\frac{Z_c}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z_c}\right)} \tag{3.29}$$

Avec Tr le coefficient de transmission, et Z_0 l'impédance caractéristique de l'air libre. Cette formule est valable pour des matériaux homogènes, isotropes et symétriques.

Une fois les propriétés intrinsèques Z_c et k sont calculées, on peut en déduire la densité dynamique ρ, qui représente les effets visco-inertiels, et le module dynamique volumique K, qui représente les effets thermiques, grâce à **(E.1)** et **(E.2)**, présentées en **Annexe E**. Ce seront ces deux paramètres qui permettront de déduire les paramètres géométriques du réseau poreux grâce à des approximations dérivées de plusieurs modèles acoustiques.

En premier lieu, la résistivité au passage de l'air σ est calculée comme une estimation à basse fréquence de la partie imaginaire de ρ. Cette expression **(3.30)** est proposée par (Panneton & Olny, 2006), qui l'obtiennent à partir du modèle Johnson-Champoux-Allard (JCA) présenté dans la **§3.3**.

$$\sigma = \lim_{\omega \to 0} -\omega\Im(\rho) \tag{3.30}$$

La porosité intergranulaire ϕ_{inter} est supposée être égale à la porosité acoustique effective (Degrave-Lemeurs et al., 2018; Glé et al., 2013). Selon ces travaux, dans les matériaux poreux à double échelle, la différence entre la perméabilité liée aux micropores et celle résultant des mésopores est si importante que les ondes sonores pénètrent à peine dans les micropores. Par conséquent, lors de la mesure de la porosité acoustique effective, il est courant de supposer qu'elle est presque égale à la porosité méso-échelle, qui dans ce cas correspond à la porosité intergranulaire.

Par conséquent, la porosité intergranulaire ϕ_{inter} est calculée par l'inversion de la partie réelle du module d'incompressibilité dynamique K selon le modèle de Zwikker et Kosten (Zwikker & Kosten, 1949) présenté dans la **§3.3** en substituant ϕ par ϕ_{inter}, ce qui donne les expressions suivantes :

$$\phi_{inter} = \lim_{\omega \to 0} \frac{P_0}{\Re(K)} \tag{3.31}$$

$$\phi_{inter} = \lim_{\omega \to \infty} \frac{\gamma P_0}{\Re(K)} \tag{3.32}$$

Ensuite, la tortuosité α_∞ peut être déduite à partir de ρ selon la formule proposée par (Panneton & Olny, 2006), qui découle du modèle JCA :

$$\alpha_\infty = \frac{\phi}{\rho_0}\left[\Re(\rho) - \sqrt{\Im(\rho)^2 - \frac{\sigma^2}{\omega^2}}\right] \tag{3.33}$$

Finalement, les longueurs caractéristiques visqueuse Λ et thermique Λ' peuvent être calculées grâce aux formules proposées par (Panneton & Olny, 2006) et par (Olny & Panneton, 2008), respectivement, dérivées une fois de plus du modèle JCA.

$$\Lambda = \frac{\alpha_\infty}{\phi}\sqrt{\frac{2\rho_0\mu}{\omega\Im(\rho)\left(\rho_0\frac{\alpha_\infty}{\phi} - \Re(\rho)\right)}} \tag{3.34}$$

$$\Lambda' = \delta_t\sqrt{2\left[-\Im\left(\left(\frac{1-\phi K/(\gamma P_0)}{1-\phi K/P_0}\right)^2\right)\right]^{-1}} \tag{3.35}$$

Avec δ_t [m] l'épaisseur de la couche limite thermique définie dans l'**Annexe E**.

Cette méthode est résumée dans la **Figure 3.8**.

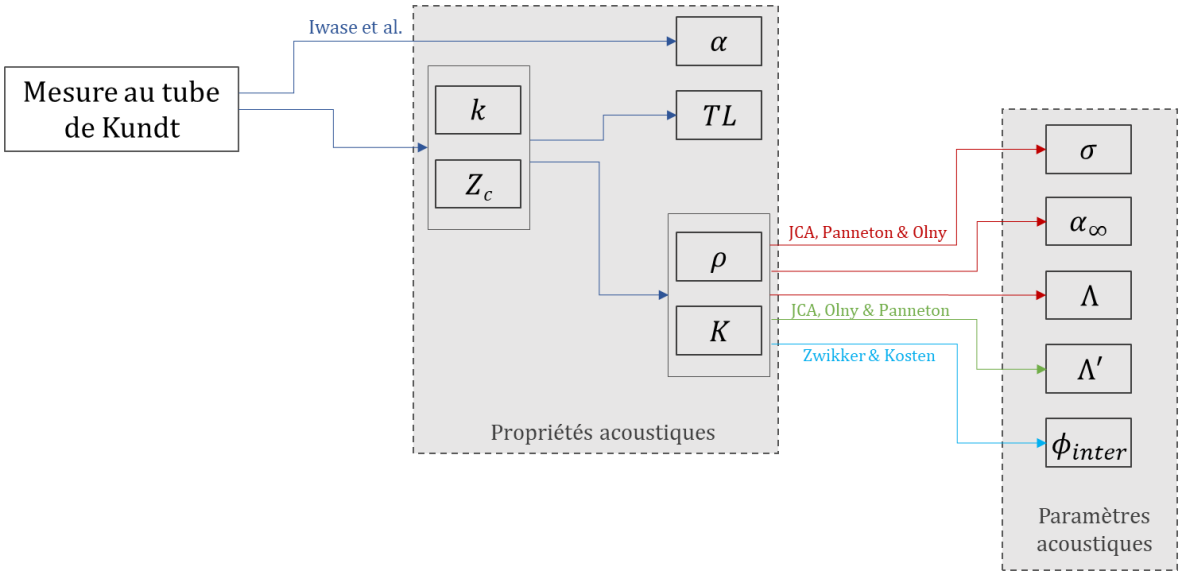


Figure 3.8 - Représentation de la méthode acoustique.

D'autre part, il est important pour le bon fonctionnement de cet essai que tous les échantillons aient un très bon état de surface et qu'ils aient le diamètre exact de l'intérieur du tube de Kundt. Il est essentiel que l'échantillon s'adapte parfaitement au tube et qu'il n'y ait pas de fuites ou de "ponts sonores" entre les deux. Toute fuite peut modifier considérablement le coefficient d'affaiblissement acoustique, étant donné que les bétons ont une résistivité très élevée et qu'une fuite entraînerait un contraste de perméabilité très important, provoquant également des phénomènes acoustiques de diffusion de

pression. Ce type de matériaux est souvent fragile et facilement abîmé, et doit donc être manipulé avec beaucoup de précaution. Si le problème persiste malgré toutes les précautions, l'utilisation de téflon ou d'un matériau malléable tel que la pâte à fixe est conseillée afin de sceller le périmètre de l'échantillon.

3.4.3. Résultats

Pour rappel, les résultats de C2-H*, C2-S, C2-H+S, S et H ont été obtenus dans le cadre de cette thèse, lorsque les autres formulations font partie du projet de recherche de (Glé, 2013). Le **Tableau 3.5** reflète les résultats des mesures acoustiques de la résistivité à l'air et des trois types de porosité : la porosité totale ouverte, la porosité intergranulaire et la porosité intragranulaire, ainsi que la masse volumique de grain des agrégats ρ_{grain}. Cette dernière est obtenue en divisant la masse volumique apparente de l'agrégat en vrac ρ_{app} par $(1-\phi_{inter})$. Concernant la tortuosité α_∞ et les longueurs caractéristiques visqueuse Λ et thermique Λ', les résultats ne sont pas tout à fait satisfaisants car ils varient excessivement entre mesures. Cela est dû à l'imperméabilité des liants, qui produit des mesures bruitées difficilement exploitables pour calculer certains paramètres.

Tableau 3.5 - Caractéristiques du réseau poreux.

Formulation	**C2-H***	**C2-S**	**C2-H+S**	**S**	**H**	**H98-G**	**H98-UK**	**H98-F**	**CLIN-UK**	**CLIN-G**	**C1-F**
σ **[N·s/m⁴]**	11625	36250	14500	2000	4600	200000	270000	160000	16000	14000	83000
$\alpha_\infty[-]$	3,56	3,63	3,44	2,4	2,4	2,25	2,79	3,46	2,06	2,57	1,64
Λ $(\times 10^{-5}$ **m)**	12,00	5,7	10	-	-	1,41	2,42	1,86	3,00	4,25	0,97
$\Lambda'(\times 10^{-5}$ **m)**	31	36	33	-	-	-	-	-	-	-	-
ϕ **[-]**	0,700	0,770	0,700	0,990	0,870	0,786	0,715	0,719	0,739	0,814	0,750
ϕ_{inter} **[-]**	0,41	0,36	0,43	0,76	0,66	0,50	0,53	0,47	0,47	0,49	0,43
ϕ_{intra} **[-]**	0,49	0,63	0,48	0,96	0,61	0,58	0,40	0,47	0,51	0,64	0,56
ρ_{grain} **[kg/m³]**	296	59	-	59	296	460	486	523	486	460	523

La caractérisation acoustique des échantillons montre un large éventail de valeurs de résistivité au passage de l'air, allant des 2 000 à 4 600 N·s/m^4 de la moelle de tournesol et de la chènevotte respectivement aux 270 000 N·s/m^4 de H98-UK. Les agrégats sont nettement moins résistants à l'air que les bétons, puisque la plus petite valeur de résistance des bétons est deux fois et demie plus élevée que la plus grande valeur des agrégats. Toutefois, la différence est beaucoup plus marquée entre les différents types de bétons qu'entre les agrégats et les bétons. Alors que la moelle de tournesol seule présente une résistivité inférieure à celle de la chènevotte, il n'y a pas de tendance claire entre les bétons de moelle et de chènevotte. Dans le même ordre d'idées, le type de liant semble avoir une incidence, puisque C2 et CLIN se situent toujours entre 10 000 et 40 000 N·s/m^4, C1 est autour de 80 000 et H98 est beaucoup plus élevé avec des valeurs comprises entre 160 000 et 270 000 N·s/m^4. Les valeurs de résistivité au passage de l'air ont été validées avec des mesures expérimentales directes.

La porosité ouverte totale est peu variable, oscillant entre 0,7 et 0,99. Les valeurs les plus élevées correspondent à des agrégats, à savoir la moelle du tournesol, qui est extrêmement poreuse. Ni l'agrégat ni le liant ne semblent avoir d'impact sur la porosité totale des bétons. La porosité intergranulaire est légèrement plus variable, allant de 0,36 à 0,76 et, comme pour la porosité totale, la moelle de tournesol présente la valeur la plus élevée, suivie par la chènevotte. Cette tendance ne semble pas s'appliquer aux bétons à base de tournesol et de chanvre, car le type de granulat n'affecte pas visiblement la porosité intergranulaire du béton. Les bétons contenant le même type de liant présentent des valeurs particulièrement proches. Enfin, la porosité intragranulaire se situe entre 0,40 et 0,96, la valeur la plus élevée correspondant une fois de plus à la moelle du tournesol, mais cette fois la deuxième place ne correspond pas à la chènevotte. Comme pour la porosité ouverte totale, l'agrégat et le liant ne semblent pas avoir d'incidence sur les résultats des bétons pour la porosité intragranulaire.

Le **Tableau 3.5** montre également les résultats pour la masse volumique de grain des différents agrégats présents dans chaque béton car il s'agit d'une propriété physique qui découle de la porosité intergranulaire ϕ_{inter} et de la masse volumique apparente de chaque type d'agrégat. Les résultats pour la chènevotte semblent être disparates, alors que la masse volumique du grain de la moelle de tournesol semble raisonnable.

Cependant, les résultats concernant la porosité intergranulaire, la porosité intragranulaire et la masse volumique du grain doivent être utilisés avec prudence car ils sont le résultat de mesures indirectes basées sur l'hypothèse que la porosité intergranulaire ϕ_{inter} correspond à la porosité acoustique effective. Si cette hypothèse n'était pas correcte, la porosité acoustique pourrait également inclure une partie de la porosité intragranulaire.

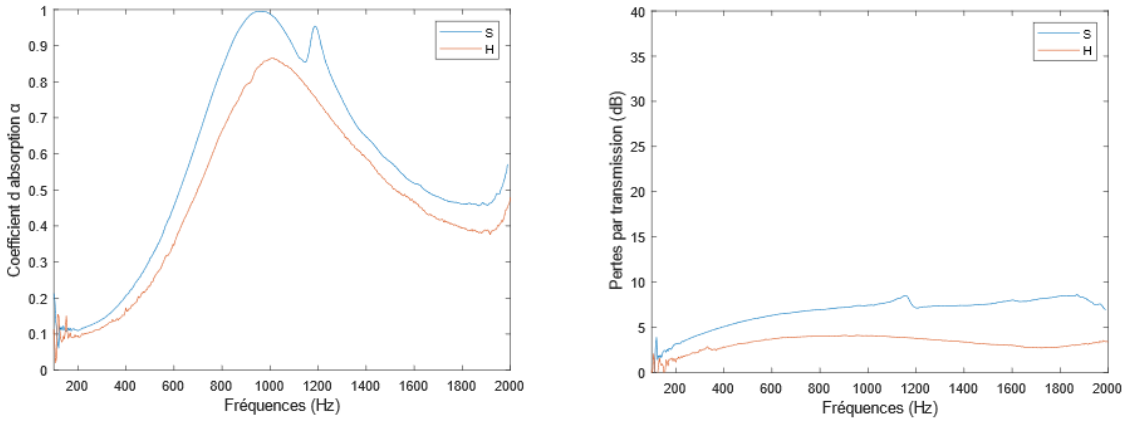


Figure 3.9 - Coefficient d'absorption acoustique (gauche) et pertes par transmission (droite) des agrégats S et H.

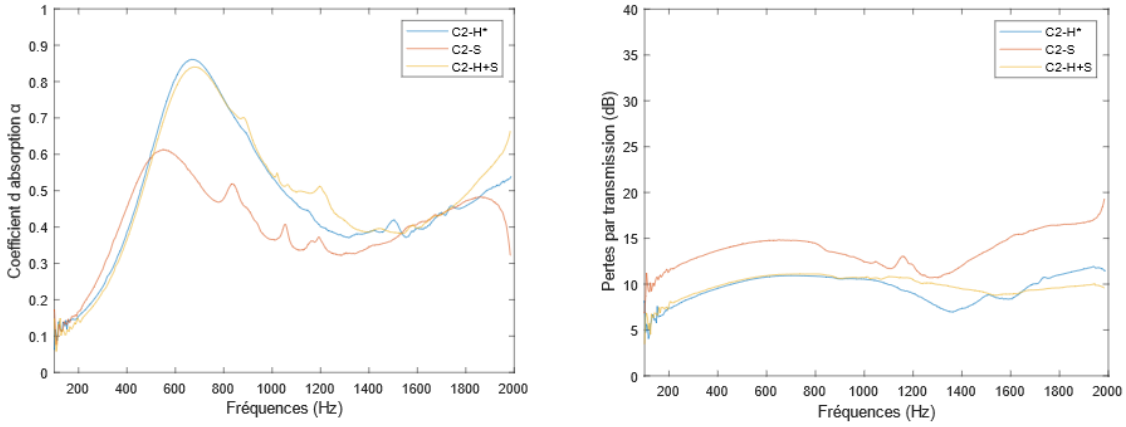


Figure 3.10 - Coefficient d'absorption acoustique et pertes par transmission des bétons C2-H*, C2-S et C2-H+S.

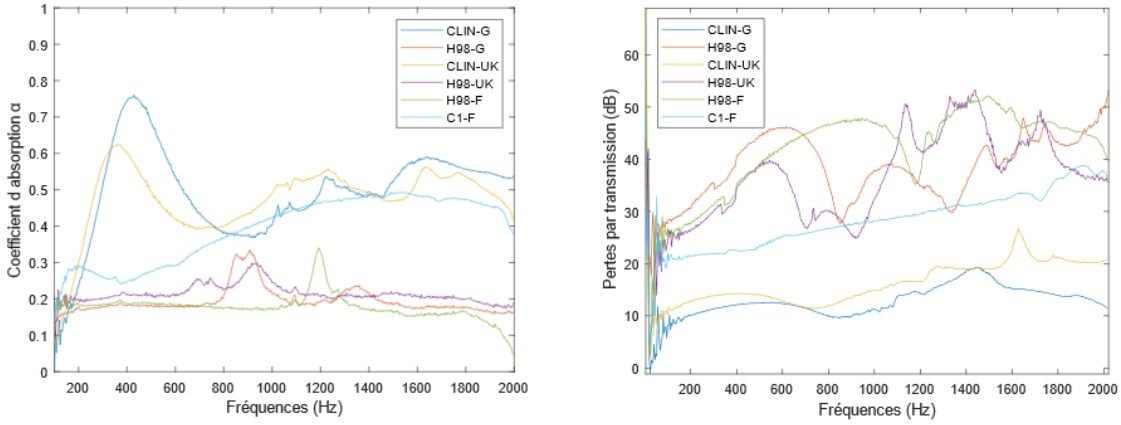


Figure 3.11 - Coefficient d'absorption acoustique et pertes par transmission des bétons CLIN-G, H98-G, CLIN-UK, H98-UK, H98-F et C1-F.

Quant aux propriétés acoustiques des agrégats et des bétons, les résultats d'absorption acoustique et d'affaiblissement acoustique ou pertes par transmission obtenus sont présentés dans la **Figure 3.9** et la **Figure 3.10**. La **Figure 3.11** représente les résultats obtenus dans le projet de recherche lié à la thèse de P. Glé.

Dans la **Figure 3.9**, il peut être observé que la moelle de tournesol est un très bon absorbant acoustique, particulièrement autour de 950 Hz, où elle atteint un coefficient d'absorption de 1 ; et que la chènevotte est presque aussi absorbante des ondes acoustiques. L'échantillon de moelle S présente un deuxième pic d'absorption et d'affaiblissement acoustique à 1200 Hz qui peut être dû à des effets élastiques localisés. Aussi, la moelle de tournesol présente des pertes plus importantes que la chènevotte, restant tout de même réduites. A basses fréquences, les pertes par transmission tendent vers 0-2 dB et, dans la plage de fréquences entre 400 et 2000 Hz, les pertes restent très stables autour de 6 dB pour la moelle et 3 dB pour la chènevotte, ce qui est assez bas pour les matériaux de construction. Cependant, l'épaisseur testée est de 5 cm, ce qui est bien en-dessous des épaisseurs courantes des murs, entre 20 et 30 cm. Lorsque (Glé, 2013)

trouve que, pour un groupe de chènevottes, les plus denses présentent une plus grande absorption et un plus grand coefficient de pertes, les résultats obtenus lors de cette étude ne répondent pas au même principe, car il s'agit de deux agrégats de nature différente.

En ce qui concerne les bétons étudiés dans ce projet de thèse, l'absorption des bétons contenant de la chènevotte (C2-H* et C2-H+S) garde le coefficient d'absorption de la chènevotte seule avec la différence que le pic maximal apparaît autour de 650 Hz au lieu de 950 Hz, mais le béton de moelle présente une absorption maximale de 0,6 à environ 550 Hz, ce qui reste pour autant une absorption acceptable. Cette inversion des performances a également été observée pour la moelle et le béton de moelle dans le **Chapitre 2 §2.3.3** pour la conductivité thermique. Lorsque l'allure du coefficient d'absorption du C2-H* et du C2-H+S sont globalement très proches, ce dernier présente un certain bruit que l'on peut apprécier également pour C2-S. Cette formulation présente le plus grand coefficient de pertes, qui oscille entre 10 et 20 dB. Le coefficient de pertes est également très proche pour C2-H* et C2-H+S et inférieur à celui de C2-S, oscillant entre 5 et 12 dB, ce qui reste bas pour assurer l'isolation acoustique d'un bâtiment (on vise un coefficient de pertes supérieur à 20 dB).

Le C2-H* et le C2-H+S présentent un comportement assez similaire à celui du béton CLIN-G, qui présente le pic d'absorption à environ 400 Hz, et le C2-S, à celui du CLIN-UK, qui présente le pic d'absorption à environ 350 Hz. Le reste des bétons de la **Figure 3.11** présentent une absorption assez pauvre qui forme un plateau à 0,2 et un coefficient de pertes très intéressant malgré le bruit des signaux. On constate que, aux basses fréquences, l'absorption des matériaux tend toujours vers 0,1-0,2.

Une autre considération est que tous les matériaux ne sont pas adaptés aux mesures acoustiques dans le tube de Kundt. Dans le cas de cette étude, quatre formulations ont dû être écartées. Les deux premiers bétons, HB-S et HB-M, étaient constitués d'un liant hydraulique (HB) mélangé à de la moelle de tournesol (S) et de maïs (M) respectivement. Le liant hydraulique est le même que celui décrit dans le **Chapitre 2**. La moelle de tournesol était la même que celle décrite dans la **§3.4.1.1** du présent chapitre, tandis que la moelle de maïs provenait d'une coopérative agricole de l'ouest de la France et avait une masse volumique apparente en vrac de 18 kg/m^3.

Lorsqu'ils ont été soumis au test du tube de Kundt, ces matériaux ont montré un comportement inattendu, comme le montre l'exemple de la **Figure 3.12**. Pour les coefficients d'absorption et de perte de transmission, certaines courbes présentaient plusieurs pics au lieu d'un seul, provoqués par des phénomènes élastiques. En effet, certains liants peuvent conduire à un comportement élastique du béton, qui ne répond pas à l'hypothèse d'un squelette rigide puisque les vibrations acoustiques peuvent être transmises à la matrice solide. Les effets élastiques ont un impact significatif sur les performances acoustiques, ce qui se traduit par un effet local sur l'absorption et un effet global sur la transmission. Comme les équations et les méthodes détaillées dans ce chapitre ne s'appliquent pas aux milieux poreux à structure élastique, les matériaux

présentant un comportement élastique, c'est-à-dire plusieurs pics dans les courbes d'absorption et de transmission, ne peuvent pas être utilisés pour la procédure présentée.

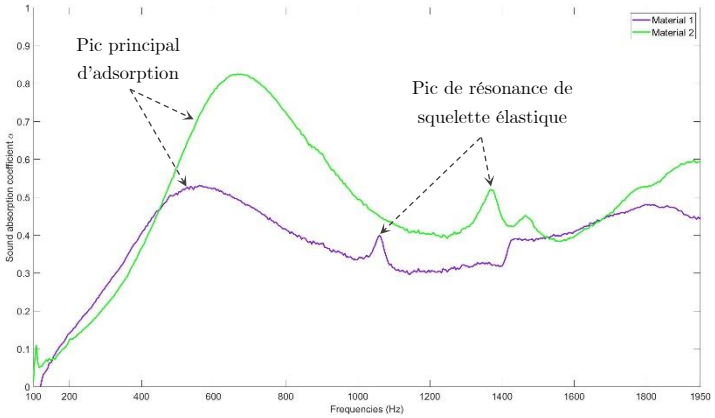


Figure 3.12 - Résultats du tube de Kundt qui montrent des effets élastiques.

En outre, deux formulations légères, C2-S_{light} et C2-H+S_{light}, ont dû être rejetées en raison de leur fragilité. La composition et la formulation étaient très similaires à celles de C2-H* et C2-H+S, à la différence que les formulations légères n'étaient pas compactées. Le problème avec ces matériaux est qu'en raison de leur faible densité, ils étaient friables et extrêmement cassants. La fragilité rendait impossible la mesure de la porosité totale, car la pression appliquée par le pycnomètre provoquait l'apparition de fissures qui augmentaient artificiellement la valeur de la porosité marquée par la machine. Leur friabilité a également provoqué de nombreuses imperfections de surface qui ont donné lieu à des signaux très bruités lors de l'exécution de l'essai au tube de Kundt, comme on peut le voir sur la **Figure 3.13**.

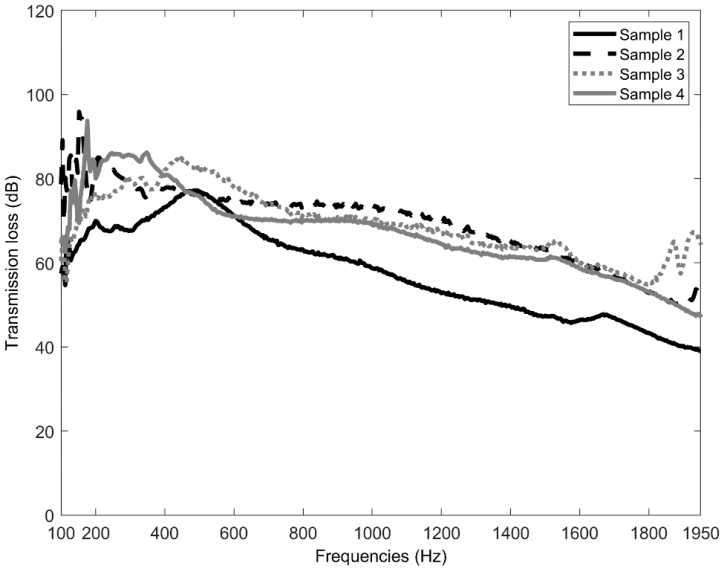


Figure 3.13 - Résultants du tube de Kundt qui montrent l'effet d'une fuite périmétrale sur les pertes par transmission.

3.4.4. Discussion

Pour les bétons à base de liant C2, il est possible de comparer les paramètres géométriques de leur réseau aux propriétés trouvées dans le **Chapitre II**. Même si une étude approfondie est nécessaire pour pouvoir conclure sur la relation entre propriétés (ce qui sera réalisé dans le sous-chapitre suivant), on peut s'apercevoir que les bétons C2-H* et C2-H+S présentent des paramètres géométriques extrêmement proches : résistivités de 11625 et 14500 N·s/m^4, respectivement ; tortuosités de 3,56 et 3,44 et des longueurs caractéristiques et des valeurs des porosités très semblables. Les propriétés trouvées dans le **Chapitre 2** pour ces deux bétons sont également très proches : conductivités thermiques de 150 et 140 mW/m·K ; des coefficients de résistance à la diffusion de la vapeur de 3,9 dans les deux cas et des MBV_{pratique} de 1,63 et 1,71, respectivement. Cela suggère que, pour des bétons (au moins des bétons fabriqués avec le même liant) avec des microstructures semblables, les propriétés macroscopiques sont semblables aussi.

3.5. Lien avec les propriétés hygrothermiques

3.5.1. Matériaux

Les matériaux utilisés dans ce sous-chapitre sont les mêmes que ceux de la **§3.4**, à savoir, sept formulations à base de chènevotte (C2-H*, H98-G, H98-UK, H98-F, CLIN-UK, CLIN-G et C1-F) dont les six dernières font partie du projet de recherche de (Glé, 2013), une formulation à base de moelle de tournesol (C2-S) et une formulation à base de chènevotte mélangée avec de la moelle de tournesol (C2-H+S).

3.5.2. Méthodes

3.5.2.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique des échantillons a été mesurée à l'aide d'un fil chaud FP2C. Les échantillons, qui ont été testés 100 jours après leur fabrication, ont été conservés dans une pièce à 30 °C (±5 °C) et 60 %HR (±5 %HR). Les tests sur la chènevotte et la moelle ont été effectués à l'aide de boîtes en plastique remplies du matériau correspondant, comme décrit par (Magniont, 2010) et dans le **Chapitre 2**. Les conditions d'essai étaient de 23 °C (±1 °C) et 50 %HR (±2 %HR).

3.5.2.2. Perméabilité à la vapeur

La procédure suivie pour déterminer la perméabilité à la vapeur des échantillons de béton est la même que celle décrite dans les sections **§2.2.1.2.4** et **§2.3.3.4** du **Chapitre 2**, à exception de la température de l'essai. En effet, pour évaluer l'effet de la température sur la perméabilité à la vapeur des matériaux, un test est effectué à 20 °C et un second à 40 °C. La température et l'humidité sont contrôlées à la fois dans la chambre climatique et dans les coupelles.

Pour les agrégats, une coupelle avec un fond en forme de tamis a été imprimée à l'aide d'une imprimante 3D pour éviter les agrégats de tomber dans la solution saline, tout en laissant passer la vapeur. Un facteur correctif a été appliqué pour prendre en considération la réduction de la surface à travers laquelle la vapeur peut pénétrer due à la morphologie de la coupelle. Un filet a été positionné en haut de la coupelle en utilisant un élastique afin d'éviter que les particules s'envolent avec la ventilation (voir **Figure 3.14**).

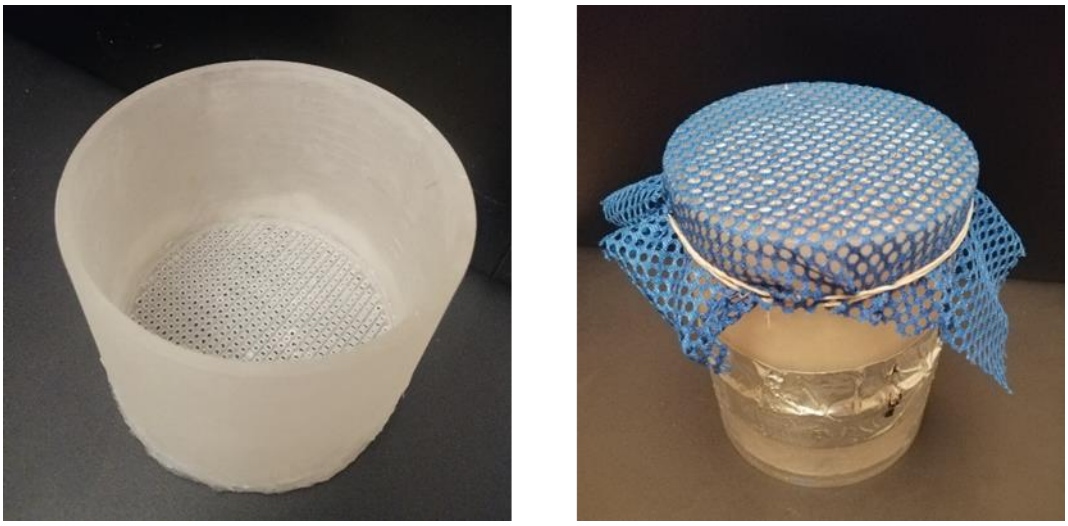


Figure 3.14 - Dispositif de mesure de perméabilité à la vapeur pour les agrégats.

3.5.2.3. Capacité tampon hydrique (MBV)

La mesure du MBV_{pratique} a été effectuée à 23 °C.

3.5.3. Résultats

3.5.3.1. Conductivité thermique

Le **Tableau 3.6** présente les résultats pour la conductivité thermique des agrégats et des bétons.

Tableau 3.6 : Récapitulatif de la conductivité thermique.

Formulation	**C2-H***	**C2-S**	**C2-H+S**	**S**	**H**	**H98-G**	**H98-UK**	**H98-F**	**CLIN-UK**	**CLIN-G**	**C1-F**
λ [W/(m·K)]	0,15 ± 0,01	0,19 ± 0,007	0,14 ± 0,08	0,05 ± 0,001	0,07 ± 0,006	0,095 ± 0,005	0,101 ± 0,008	0,107 ± 0,007	0,084 ± 0,003	0,079 ± 0,005	0,102 ± 0,01

Les matériaux étudiés présentent une large gamme de valeurs de conductivité thermique. Allant de 0,05 W/(m·K) pour la moelle de tournesol à 0,19 W/(m·K) pour C2-S, les résultats inférieurs sont proches des matériaux couramment utilisés comme isolants dans la construction. Par exemple, la laine de roche se situe généralement entre 0,033 et 0,04 W/(m·K), tandis que la laine de verre se situe généralement autour de 0,045

W/(m·K) (ABNT Associaçao Brasileira de Normas Técnicas, 2005). D'autres exemples sont la mousse de polyuréthane, qui a une conductivité d'environ 0,025 W/(m·K), et le polystyrène expansé, dont la conductivité est d'environ 0,036 W/(m·K).

Quant aux valeurs supérieures obtenues, elles sont un ordre de grandeur inférieur à la conductivité des matériaux classiques de structure comme le béton, la terre ou la pierre et peuvent par conséquent donner des résistances thermiques de paroi intéressantes pour la correction thermique. Avec les agrégats, les bétons à base de CLIN présentent des valeurs particulièrement prometteuses, suivis par H98 et C1, et enfin C2. Cela laisse à penser que le liant a probablement un impact sur la conductivité thermique des bétons, alors que le type d'agrégat ne semble pas avoir d'effet évident, probablement parce que chaque formulation a un rapport agrégat/liant différent. Cependant, il est assez surprenant que le tournesol présente la conductivité thermique la plus faible lorsqu'il est en vrac, mais la plus élevée lorsqu'il est en formulation.

3.5.3.2. Propriétés hygroscopiques

Les résultats des paramètres hygroscopiques sont montrés dans le **Tableau 3.7**.

Tableau 3.7 - Récapitulatif des paramètres hygroscopiques

Formulation	C2-H*	C2-S	C2-H+S	S	H	H98-G	H98-UK	H98-F	CLIN-UK	CLIN-G	C1-F
δ_p ($\times 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa))	5,09 ± 0,24	2,84 ± 0,7	5,09 ± 0,67	12,77 ± 1,12	10,86 ± 1,06	2,14 ± NA	1,89 ± NA	2,50 ± NA	3,13 ± NA	4,58 ± NA	1,94 ± NA
$\zeta_{idéal}$ [kg/m³]	6,7	6,9	7,7	4,4	6,4	189,9	207,5	45,0	38,4	42,4	213,0

Les valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau obtenues vont de $1,89 \cdot 10^{-11}$ à $12,77 \cdot 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa). L'agrégat qui présente la valeur la plus élevée, à savoir la moelle du tournesol, est deux fois plus perméable que les bétons. Les bétons constitués de C2 et CLIN sont les plus perméables, tandis que H98 et C1 présentent une faible perméabilité. Malgré le fait que la moelle de tournesol présente la valeur de perméabilité la plus élevée, C2-S a la perméabilité la plus faible parmi les bétons de C2. Quant aux résultats d'autres auteurs, (Bennai et al., 2018) ont rapporté une perméabilité à la vapeur d'eau comprise entre $2,01 \cdot 10^{-11}$ et $3,22 \cdot 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa) pour le béton de chanvre. (Ahmad & Chen, 2020) ont trouvé des valeurs entre $1,19 \cdot 10^{-11}$ et $1,82 \cdot 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa) pour les bétons de tiges de maïs et (Verdier et al., 2020) ont observé $3,5 \cdot 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa) pour la moelle de tournesol.

D'autre part, les capacités de stockage de l'humidité sont extrêmement variables, allant de 4,42 à 213,04 kg/m³, et ne semblent pas suivre de tendances claires. En effet, bien que le type de liant semble jouer un rôle dans la capacité de stockage de l'humidité pour les formulations C2-x (x=H*, S ou H+S) et CLIN-y (y=UK et G) les formulations

H98-z (z=G, UK ou F) apparaissent très variables. En outre, il n'y a aucune preuve d'une influence du type de granulat.

3.5.4. Discussion

3.5.4.1. Relation entre les propriétés thermiques et acoustiques

Puisque plusieurs études ont montré que la porosité est le paramètre le plus influent sur la conductivité thermique des matériaux poreux tels que les roches (Ouali, 2009) ou les composites (Progelhof et al., 1976), le lien entre la conductivité thermique et les différents types de porosité a été examiné. Partant du principe que la corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique est souvent évaluée à travers des relations empiriques (Tinker & Cabrera, 1992), la même méthodologie a été utilisée pour évaluer le lien avec la porosité.

Tout d'abord, il est important de déterminer si les bétons et les agrégats (S et H) peuvent être étudiés par le biais des mêmes modèles. (Carson et al., 2005) ont expliqué la différence entre les matériaux ayant une porosité "interne" et "externe". Le premier groupe est composé de matériaux dans lesquels l'air ou le fluide est "dispersé dans une phase condensée continue", tandis que le second groupe comprend des "matériaux de type particulaire dans lesquels l'air (par exemple) comprend une phase continue". Ils affirment que ces deux groupes ne peuvent pas être étudiés de la même manière car les mécanismes de conduction sont différents.

De plus, les valeurs de conductivité thermique de la moelle de tournesol et de la chènevotte trouvées dans la littérature sont très proches des valeurs trouvées dans cette étude et entre elles, malgré la variabilité de leur porosité. (Magniont, 2010) a trouvé que la conductivité thermique était d'environ 0,054 W/(m·K) pour la chènevotte en vrac et compactés et de 0,051 W/(m·K) pour la moelle de tournesol. (Rahim et al., 2016) ont trouvé une conductivité thermique de 0,052 W/(m·K) pour la chènevotte en vrac. Visiblement, la conductivité thermique des agrégats reste pratiquement stable quelle que soit la valeur de la porosité. Comme la porosité n'a pas d'effet apparent sur la conductivité thermique des agrégats, la corrélation entre λ et la porosité ne sera étudiée que pour les bétons.

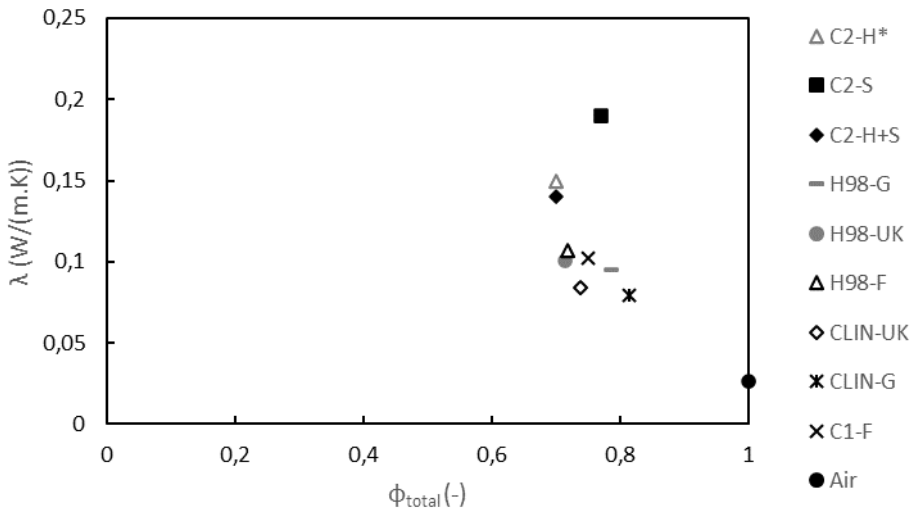


Figure 3.15 - Comparaison de la conductivité thermique et la porosité totale des bétons.

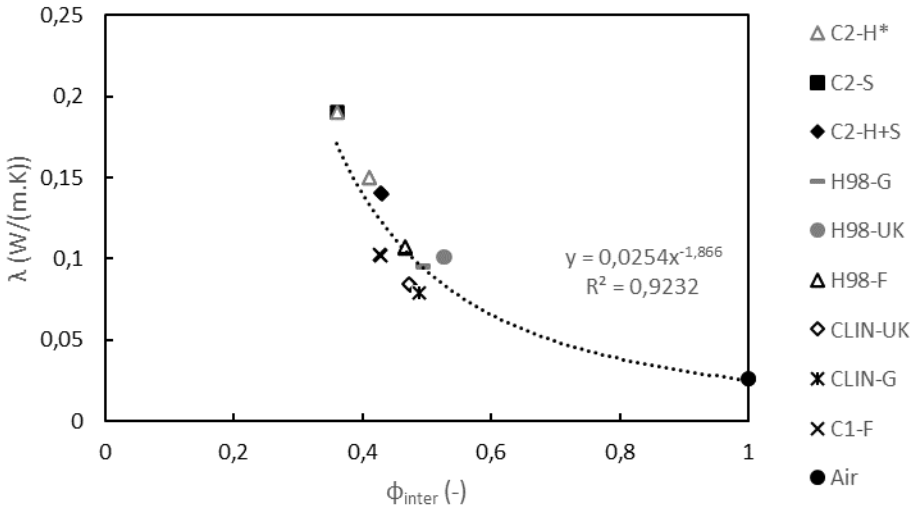


Figure 3.16 - Comparaison de la conductivité thermique et la porosité intergranulaire des bétons.

La **Figure 3.15** et la **Figure 3.16** montrent les résultats expérimentaux pour la conductivité thermique, comparée respectivement à la porosité totale et à la porosité intergranulaire. On peut noter que, bien que la porosité totale ne semble pas avoir un impact évident sur la conductivité thermique, il semble y avoir une corrélation entre λ et ϕ_{inter}. En effet, la conductivité thermique semble diminuer avec l'augmentation de la porosité intergranulaire, ce qui décrit une sorte de courbe ou de parabole. En utilisant l'ajustement des moindres carrés, nous avons trouvé l'approximation dans **(3.36)** satisfaisante, une courbe de loi de puissance avec un coefficient de détermination R^2 de 0,92.

$$\lambda = 0{,}0254 \cdot \phi_{inter}{}^{-1{,}866} \qquad (3.36)$$

La valeur de la conductivité thermique de l'air à 300 K, $\lambda_{air} = 0{,}0262\ \mathrm{W/(m \cdot K)}$ a été ajoutée aux résultats afin que le modèle soit précis pour les porosités élevées.

L'expression de **(3.36)** présente une forte ressemblance avec la formule de Lichtenecker, présentée par (Zakri et al., 1998) appliquée à la permittivité électrique, qui a également été utilisée en physique des sols. Appliquée à la conductivité thermique et compte tenu de la porosité intergranulaire, la formule de Lichtenecker peut être exprimée comme suit :

$$\lambda = (\phi_{inter} \cdot {\lambda_{air}}^{\alpha} + (1 - \phi_{inter}) \cdot {\lambda_{solide}}^{\alpha})^{\frac{1}{\alpha}} \qquad (3.37)$$

Avec λ la conductivité thermique du béton, λ_{solide} la conductivité thermique de la phase solide du béton et α un paramètre entre 1 et -1. Le second terme, $(1 - \phi_{inter}) \cdot {\lambda_{solide}}^{\alpha}$, qui correspond à la partie solide, est négligeable avant le premier terme si $(1 - \phi_{inter})$ est faible et/ou si λ_{solide} est significativement plus grand que λ_{air}, puisque le module de l'exposant α est par définition inférieur à 1. λ_{solide} est un paramètre qu'il est impossible de déterminer empiriquement car il n'est pas possible de supprimer toute la porosité, mais nous supposons qu'il est effectivement beaucoup plus grand que λ_{air}. Par conséquent, nous pouvons exprimer λ comme :

$$\lambda \cong \phi_{inter}^{\frac{1}{\alpha}} \cdot \lambda_{air} \qquad (3.38)$$

Qui correspond à la contribution de la phase gazeuse (air) exclusivement. Si l'on compare **(3.36)** et **(3.38)**, on peut noter que le coefficient 0,0254 est en effet très proche de $\lambda_{air\,300K} = 0{,}0262\ W/(m \cdot K)$ et que $\alpha \approx -0{,}54$, ce qui répond à la condition $-1 < \alpha < 1$. (Zakri et al., 1998) présentent un mélange hétérogène multiphasique composé d'inclusions ellipsoïdales dans un milieu homogène, ce qui correspond à une représentation commune des bétons à base d'agrégats végétaux (Boutin & Geindreau, 2010; Carson et al., 2005). Selon cet article, α représente l'orientation des pores dans le béton. α est égal à 1 lorsque tous les pores sont parallèles au champ, qui serait le champ thermique dans le cas de cette étude, et α est égal à -1 lorsque les pores sont perpendiculaires au champ. Dans notre cas, la valeur de α indiquerait une orientation des pores plutôt perpendiculaire au champ, ce qui est cohérent avec le fait que la plupart des échantillons de la campagne expérimentale ont été compactés pendant la fabrication et contiennent des fibres de chènevotte, qui sont plutôt élancées. Il en résulte une structure laminée dans laquelle les réseaux de pores sont perpendiculaires à la force de compactage selon (Nozahic et al., 2012).

En résumé, une corrélation empirique entre la conductivité thermique et la porosité intergranulaire des bétons a été trouvée et non entre la conductivité thermique et la porosité totale. Cette corrélation correspond à la représentation de la conductivité thermique d'un béton dérivée des formules de Lichtenecker mais uniquement en ce qui concerne la contribution de l'air dans les pores intergranulaires. De plus, la valeur trouvée pour le paramètre α est cohérente avec la structure des bétons. Ces résultats contrastent avec les modèles qui représentent la conductivité thermique d'un milieu poreux à travers la conductivité thermique de la phase solide, comme le modèle de percolation (Sellitto et

al., 2016) ou la relation de Loeb (Loeb, 1954). D'autre part, les modèles prédisant la conductivité thermique à partir de la porosité du matériau (Bauer, 1993) ne précisent généralement pas le type de porosité à utiliser. Une explication plausible du fait que la conductivité thermique semble être liée à la porosité intergranulaire est que pour les bétons biosourcés étudiés, qui sont connus pour avoir une porosité à double échelle, seuls les pores à grande échelle ont une influence sur les propriétés thermiques. Ce comportement serait un parallélisme des conclusions de (Glé, 2013) pour le domaine acoustique. La relation possible entre la conductivité thermique et le type de liant dont il est question dans la **§3.5.3.1** de ce chapitre doit être due au fait que chaque liant est associé à un type de microstructure et donc à une certaine gamme de porosité intergranulaire, qui peut être légèrement affectée par le type de granulat.

Toutefois, la corrélation suggérée n'est qu'un premier pas vers l'élaboration d'une loi plus générale. Pour ce faire, des matériaux plus variés devraient être testés (à savoir d'autres matériaux biosourcés à double échelle de porosité) afin de vérifier si la corrélation de l'équation **(3.36)** est toujours applicable avec une marge d'erreur réduite et si elle est vérifiée pour diverses conditions expérimentales (principalement l'humidité et la température).

3.5.4.2. Relation entre les propriétés hygroscopiques et acoustiques

Perméabilité à la vapeur et à l'air

Il est également intéressant d'étudier la possible corrélation entre les propriétés hygroscopiques et acoustiques de ces matériaux, car les tests hygroscopiques sont très coûteux en temps et en ressources. Toutefois, un niveau trop élevé d'humidité peut entraîner des pathologies du matériau. La **Figure 3.17** montre une relation apparente entre la perméabilité à l'air k_a, obtenue à partir des résultats empiriques pour la résistivité au passage de l'air σ, et la perméabilité à la vapeur d'eau δ_p, une tendance exponentielle décrite dans **(3.39)** avec un coefficient de détermination R^2 de 0,86. Pour ρ_{air}, on considère la valeur à 20 °C, 1,2 kg/m^3.

$$k_a = \frac{\rho_{air}}{\sigma} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot e^{3 \cdot 10^{10} \cdot \delta_p} \qquad (3.39)$$

Les trois bétons contenant le liant H98 ont été exclus car, en raison de sa rhéologie, le liant a tendance à former une porosité fermée, notamment en surface, ce qui donne lieu à des bétons imperméables d'un point de vue acoustique. L'absorption acoustique ne pouvant être correctement mesurée, la méthode proposée dans ce chapitre ne peut être appliquée.

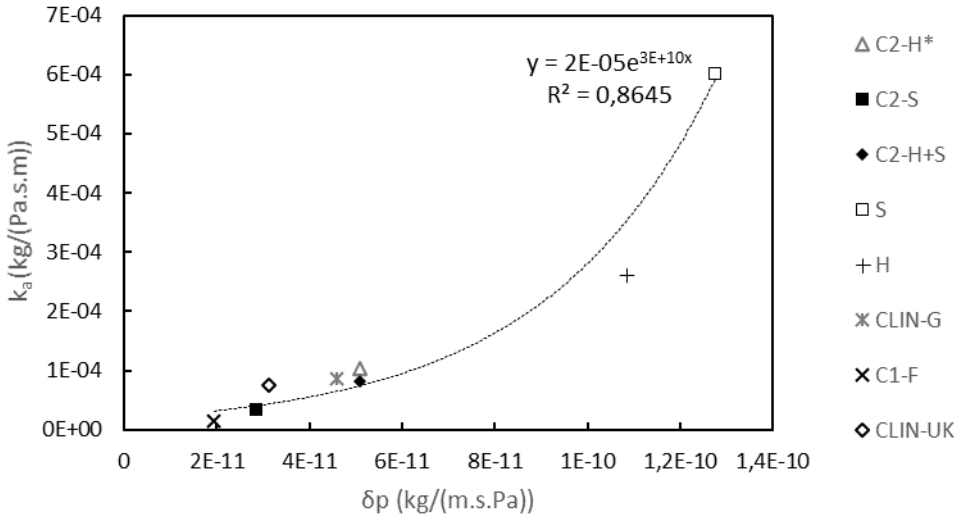


Figure 3.17 - Relation empirique entre la perméabilité à l'air et à la vapeur.

Étant donné que le flux d'air est engendré par une différence de pression d'air et que le transport de vapeur d'eau se produit en présence d'une différence de pression de vapeur, il semble légitime de penser que les deux grandeurs peuvent être liées. En outre, les deux grandeurs dépendent des caractéristiques de la microstructure telles que la porosité, la tortuosité (Latif et al., 2014) ou la connectivité des pores. (Mukhopadhyaya et al., 2011) ont étudié la relation entre la perméabilité à la vapeur d'eau et la perméabilité à l'air pour les matériaux de construction en se basant sur deux décennies de données recueillies en Amérique du Nord et ont trouvé une corrélation linéaire pour les matériaux d'isolation et les membranes avec une perméabilité à la vapeur d'eau dépendante de l'humidité relative, le bois, les panneaux de revêtement, le stuc, les plaques de plâtre, les bardages et les plaques de ciment, mais pas pour le béton ou le ciment, qui sont les matériaux étudiés les plus proches des bétons végétaux faisant l'objet de la présente étude. Néanmoins, le ciment et les bétons biosourcés ne sont pas tout à fait identiques en ce qui concerne la perméabilité. Les matériaux à base de ciment n'ont qu'une porosité simple (Quenard & Sallee, 1992), alors que les bétons biosourcés comme le béton de chanvre ont une porosité à double échelle. Selon (R. Walker et al., 2014), la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux est largement influencée par les caractéristiques des macropores. Le même phénomène a été observé par (Olny & Boutin, 2003) concernant la perméabilité à l'air des matériaux poreux à double échelle. Il convient de noter que l'article de (Mukhopadhyaya et al., 2011) n'a recherché que des relations linéaires et non exponentielles. (Boutin & Geindreau, 2010) ont trouvé une corrélation entre le coefficient de diffusion effectif sans dimension et la porosité, et entre la perméabilité intrinsèque sans dimension et la porosité dans les milieux poreux, les deux relations étant non linéaires, ce qui nous permet de conclure qu'il existe une corrélation entre le coefficient de diffusion effectif sans dimension et la perméabilité intrinsèque sans dimension qui serait également non linéaire.

Visiblement, il existe un certain parallélisme entre le flux d'air et le flux de vapeur d'eau à travers le matériau. Cependant, il existe certaines dissemblances entre les deux

processus. Le flux d'air est décrit par la loi de Darcy, tandis que le flux de vapeur est décrit par la loi de Fick. Comme cela est suggéré par (Boutin & Geindreau, 2010), la non linéarité de la relation obtenue pourrait s'expliquer par cette dissemblance.

Ces résultats ne sont valables que pour la moelle de tournesol, la chènevotte et les bétons dérivés, et aux conditions d'humidité et de température de l'essai, puisque celles-ci affectent la perméabilité à la vapeur d'eau (Latif et al., 2014; McLean et al., 1990). La recherche de cette relation n'a été effectuée qu'à des fins exploratoires et les résultats prometteurs ont motivé une future campagne de recherche visant à clarifier les raisons de ce lien entre les propriétés et à définir une corrélation finale qui serait valable pour un éventail plus large de matériaux.

Capacité de stockage d'humidité et propriétés acoustiques

La capacité idéale de stockage de l'humidité $\xi_{idéal}$ est comparée aux trois types de porosité présents dans cette étude, c'est-à-dire la porosité totale, intergranulaire et intragranulaire, comme le montrent la **Figure 3.18**, la **Figure 3.19** et la **Figure 3.20**, respectivement.

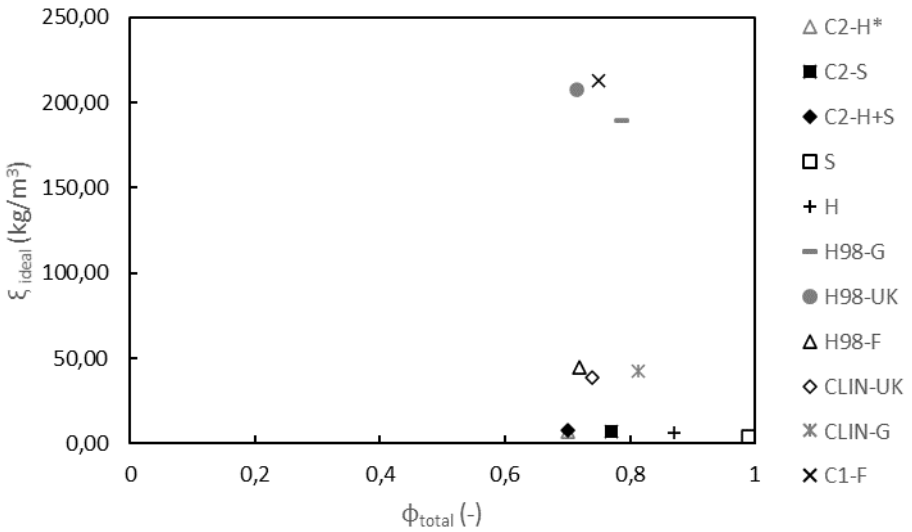


Figure 3.18 - Comparaison de la capacité de stockage d'humidité idéale et la porosité totale des matériaux étudiés.

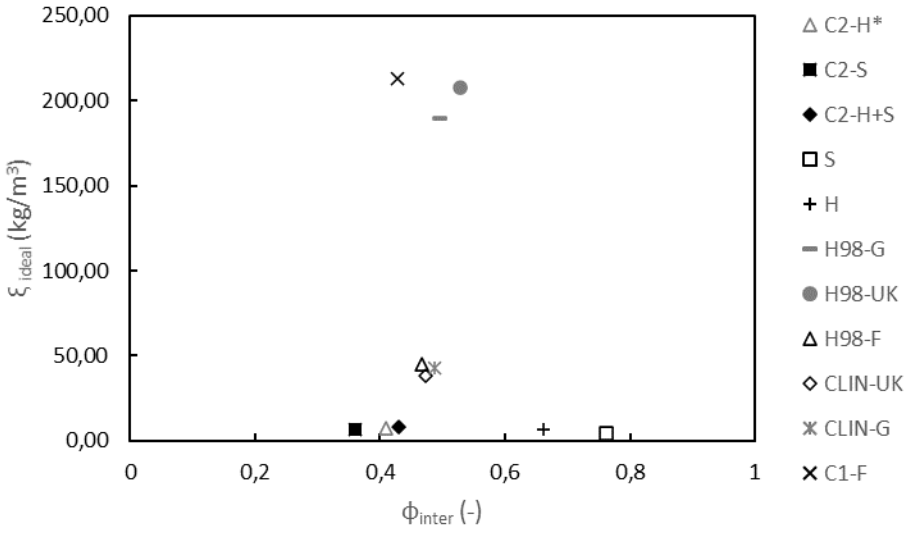


Figure 3.19 - Comparaison de la capacité de stockage d'humidité idéale et la porosité intergranulaire des matériaux étudiés.

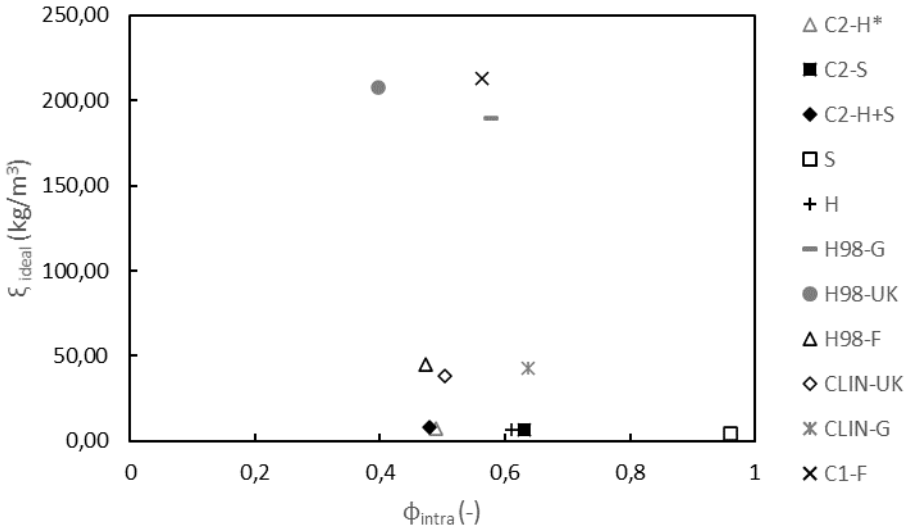


Figure 3.20 - Comparaison de la capacité de stockage d'humidité idéale et la porosité intragranulaire des matériaux étudiés.

Dans les trois cas, il semble qu'il n'existe aucune corrélation entre la capacité du matériau à stocker l'eau et sa porosité, ce qui est un résultat assez surprenant, car l'eau est stockée dans les pores des matériaux. Cette absence de relation entre les paramètres susmentionnés pourrait s'expliquer par la complexité de la structure interne des matériaux. En effet, il existe trois types de pores dans les bétons biosourcés, comme le montre la **Figure 3.21**, qui illustre la microstructure d'un béton de moelle de tournesol et chaux. Les trois types de pores sont l'intergranulaire, l'intragranulaire de l'agrégat et l'intragranulaire du liant. Bien que l'étude statistique du diamètre des différents types de pores n'entrât pas dans le cadre de cette étude, quelques observations MEB isolées ont été effectuées (voir **Figure 3.21** et **Figure 3.22**), dans lesquelles les pores

intergranulaires variaient approximativement de 1 mm à 1 cm, tandis que les pores à l'intérieur de la chènevotte

étaient d'une largeur d'environ 10 à 60 µm et les pores à l'intérieur du liant, d'environ 1 µm. Les pores intragranulaires du tournesol ont été estimés à un diamètre de 80 à 100 µm, comme le montre l'exemple de la **Figure 3.22**.

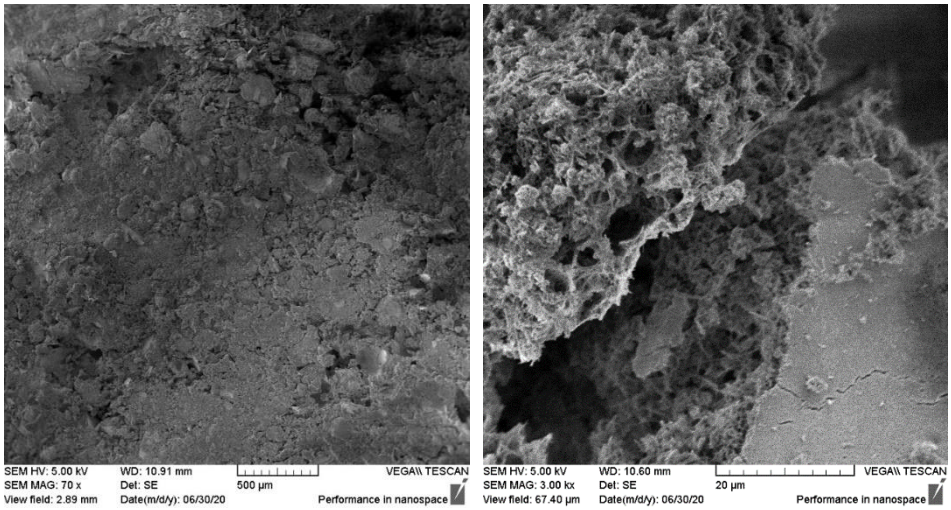


Figure 3.21 - Image de la microstructure du béton HB-S capturée à l'aide d'un MEB.

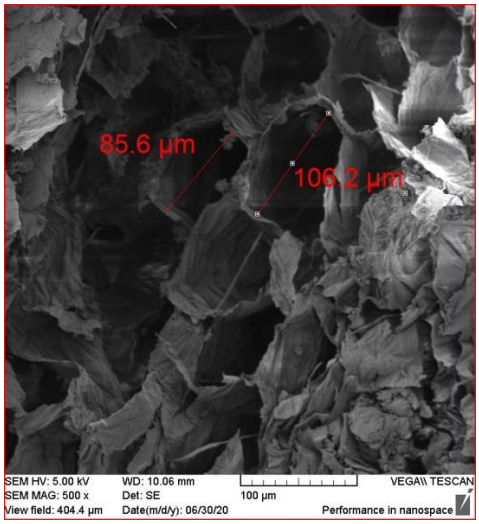


Figure 3.22 - Image de la microstructure de la moelle de tournesol capturée à l'aide d'un MEB.

Ces approximations sont conformes à la littérature, puisque (Lenormand et al., 2017) ont trouvé un diamètre de 100 µm pour les pores intragranulaires du tournesol et (Cérézo, 2005) a trouvé 10-40 µm pour les pores de la chènevotte, tandis que (Samri, 2008) a déterminé qu'un liant composé principalement de chaux aérienne avait des pores intragranulaires entre 400 et 700 nm. Comme il a déjà été mentionné dans la **§3.2.1.1** du présent chapitre, les bétons biosourcés présentent deux échelles de porosité différenciées. La première comprend la porosité intergranulaire et se situe dans la gamme du mm-cm, tandis que la seconde englobe la porosité intragranulaire du liant et de

l'agrégat et se situe entre le nm et le µm. La porosité à double échelle et l'hétérogénéité, ainsi que les interactions probables entre les agrégats et le liant (Viel et al., 2017) font qu'une étude approfondie est nécessaire afin d'expliquer correctement la cause et les facteurs influençant le stockage de l'humidité à l'intérieur des matériaux.

Enfin, $\xi_{idéal}$ a été comparé à la résistivité au passage de l'air et aucune corrélation n'a été trouvée, ce qui nous amène à conclure que, à ce stade, il n'y a pas de lien direct entre la capacité idéale de stockage de l'humidité $\xi_{idéal}$ et les propriétés acoustiques des bétons biosourcés.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, les paramètres acoustiques et géométriques de plusieurs bétons de chanvre et de moelle ont été déterminés. A partir de ces résultats et des propriétés hygrothermiques des bétons, notamment la conductivité thermique et la perméabilité à la vapeur, une contribution à la caractérisation indirecte de ces propriétés est proposée à partir des mesures acoustiques.

D'une part, la conductivité thermique est généralement déterminée à l'aide d'un fil chaud, d'un plan chaud ou d'un ruban chaud. Ces trois procédés sont assez rapides mais nécessitent des appareils spécifiques coûteux. D'autre part, ces techniques mesurent souvent une surface réduite de l'échantillon et ne sont pas nécessairement représentatives. En revanche, la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau ne prend pas moins de deux semaines, puisque la teneur en eau du matériau doit se stabiliser, et peut être effectuée à l'aide d'une enceinte climatique ou d'une boîte à sel ventilée. L'inconvénient de la première est son coût considérable, tandis que la seconde est très sensible aux variations de la température ambiante et de l'humidité relative. En contraste, les mesures acoustiques sont rapides, elles exigent peu d'équipements qui sont relativement peu coûteux, et qui peuvent être utilisés pour mesurer d'autres caractéristiques, et sont beaucoup moins influencés par la teneur en eau du matériau, sauf dans des conditions extrêmes.

Une corrélation a été trouvée entre la conductivité thermique et la porosité intergranulaire des bétons étudiés. Le fait que cette relation soit établie avec la porosité intergranulaire et non avec la porosité totale reflète une certaine similitude avec le comportement acoustique. En outre, l'expression correspond à la partie des formules de Lichtenecker qui est liée à l'air, pour un béton à structure laminaire provoqué par le compactage lors de la fabrication. Ce résultat est des plus surprenants puisque les modèles de conductivité thermique simplifiés qui travaillent avec la conductivité thermique d'une seule phase ont tendance à retenir la conductivité de la matrice solide plutôt que celle de l'air.

Une relation exponentielle entre les perméabilités à la vapeur d'eau et à l'air des échantillons a été trouvée. Ce sont deux phénomènes régis par les différences de pression

et par les caractéristiques des macropores. Cependant, nous n'avons trouvé aucune relation entre la capacité de stockage de l'humidité et les propriétés acoustiques, car l'adsorption de la vapeur d'eau dans des matériaux tels que les bétons biosourcés, qui sont hétérogènes et ont une porosité à double échelle, est un phénomène complexe.

Cela mène à penser que peut-être seuls les phénomènes qui sont régis par les caractéristiques des macropores peuvent être liés au domaine acoustique, mais une étude complémentaire est nécessaire pour confirmer cela. Des travaux de recherche supplémentaires sont également nécessaires pour généraliser les corrélations qui ont été trouvées afin qu'elles soient applicables à davantage de matériaux, étant donné que les deux expressions ont été trouvées à partir d'un groupe plutôt réduit de matériaux et de formulations. D'autre part, les résultats de l'étude acoustique ont permis de conclure que le béton de moelle est un matériau prometteur en termes acoustiques, car il présente un comportement isolant considérable même à faible épaisseur et un coefficient d'absorption tout de même acceptable même si les propriétés de la moelle se voient atténuées en présence du liant. L'étude a permis également de caractériser la microstructure des bétons, dont les résultats suggèrent que, pour des microstructures similaires, les matériaux présentent des propriétés hygrothermiques macroscopiques très semblables.

Chapitre 4 : Impact de la teneur en eau sur les propriétés hygrothermiques

Table des matières

4.1 Introduction 151
4.2 Matériaux et méthodes 153
4.2.1 Matériaux 153
4.2.2 Méthodes 154
4.3 Résultats 157
4.3.1 Impact de la teneur en eau sur la conductivité thermique 157
4.3.2 Impact de la teneur en eau sur l'effusivité thermique . . . 159
4.3.3 Impact de la teneur en eau sur la chaleur spécifique . . . 160
4.3.4 Impact de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur 161
4.4 Discussion 161
4.4.1 Impact de la teneur en eau sur la conductivité thermique 161
4.4.2 Impact de la teneur en eau sur l'effusivité thermique . . . 165
4.4.3 Impact de la teneur en eau sur la chaleur spécifique . . . 166
4.4.4 Impact de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur 168
4.5 Conclusion 175

4.1. Introduction

Dans les chapitres précédents, les propriétés physiques des matériaux ont été quantifiées, sinon à l'état sec, du moins à une teneur en eau fixée. Or, les paramètres clés que sont la conductivité thermique, l'effusivité thermique, la chaleur spécifique et la perméabilité à la vapeur sont connues pour être significativement influencées par la présence d'humidité dans les matériaux (Houngan et al., 2015; Rahim et al., 2016; B Seng et al., 2017). Il est donc important de s'assurer qu'elles restent dans une plage acceptable pour toutes les conditions d'humidité plausibles et de connaitre précisément leurs variations afin de modéliser correctement la réponse hygrothermique des matériaux.

L'impact de la teneur en eau sur les propriétés hygrothermiques des matériaux de construction a déjà été étudié par plusieurs auteurs. La valeur des quatre propriétés augmente globalement avec la teneur en eau, mais la façon dont elles le font peut changer radicalement d'un matériau à l'autre.

(Kočí et al., 2017) ont examiné trois types de matériaux porteurs (béton cellulaire autoclavé, béton hautes performances et brique pleine en terre cuite) et ont constaté que la conductivité thermique augmente avec la teneur en eau de différentes manières selon la structure des pores et les propriétés de la matrice solide. Pour le béton à hautes performances, la corrélation décrit une sorte d'exponentielle, alors qu'elle est linéaire pour le béton cellulaire autoclavé et presque parabolique pour la brique en terre cuite. En outre, l'amplitude de l'augmentation est très différente selon le matériau. La brique triple sa conductivité thermique à sec pour une teneur volumétrique en eau de 25 %, tandis que celle du béton autoclavé est multipliée par 8 tout en restant relativement faible. Ils ont également étudié l'évolution de la chaleur spécifique avec des résultats tout aussi disparates.

Dans le même sens, (Anh Dung Tran Le, 2010) a noté que la conductivité thermique et la teneur en eau décrivent une tendance linéaire pour plusieurs types de béton, y compris le béton de chanvre. Ce dernier avait la plus faible pente et semblait avoir une faible effusivité thermique.

Les composites biosourcés ont également fait l'objet de plusieurs études portant sur les propriétés hygrothermiques et la teneur en eau. (Boukhattem et al., 2017) ont noté une tendance exponentielle entre la conductivité thermique des composites de fibres de palmier dattier et leur teneur en eau, comme l'ont fait (Taoukil et al., 2013) pour les bétons de bois et (Belkharchouche & Chaker, 2016) pour les bétons de grignons d'olive. Quant à l'effusivité thermique des matériaux biosourcés, (Houngan et al., 2015) ont étudié la dépendance entre la teneur en eau et l'effusivité thermique tangentielle pour deux types de bois et ont trouvé une augmentation presque linéaire avec des pentes très similaires pour les deux types de bois. (Bouguerra et al., 1998) sont arrivés au même résultat pour des bétons à base de ciment et bois, en observant une pente positive presque constante entre les deux grandeurs.

Les bétons à base de chanvre sont peut-être les mieux documentés et il n'y a pas d'exception en ce qui concerne l'influence de la teneur en eau sur les propriétés hygrothermiques. (Collet & Pretot, 2014) ont constaté que la conductivité thermique de différents bétons de chanvre augmente de façon linéaire avec la teneur en eau. (Etienne Gourlay et al., 2017) et (Bennai et al., 2018) ont trouvé des tendances très similaires pour la conductivité thermique, mais la chaleur spécifique est plus controversée. Alors que (Bennai et al., 2018) ont rapporté une augmentation significative de la chaleur spécifique avec la teneur en eau pour le béton de chènevotte, (Etienne Gourlay et al., 2017) ont trouvé une augmentation presque linéaire pour les formulations de chanvre en paille défibrée mais une chaleur spécifique presque constante pour les formulations avec de la chènevotte contenant des fibres. (P. De Bruijn & Johansson, 2013) ont observé une augmentation plus légère à la fois pour la conductivité thermique et la chaleur spécifique d'un béton de chaux-chanvre. L'étude du C_p des bétons de chanvre a également été abordée par (R. Walker et al., 2014), qui a constaté que le type de liant n'a pas un impact clair sur la capacité thermique, mais qu'il existe une tendance qui suggère que l'hydraulicité du liant donne des valeurs C_p plus élevées et des conductivités thermiques plus faibles. D'autre part, (Etienne Gourlay et al., 2017) ont noté que la nature des copeaux de chanvre a un impact significatif sur la capacité thermique spécifique.

De nombreux auteurs ont constaté que la perméabilité à la vapeur d'eau change lorsqu'elle est mesurée avec les méthodes de la coupelle sèche ou de la coupelle humide. (Latif, Lawrence, et al., 2015) ont comparé le facteur de résistance à la diffusion de vapeur obtenu par les deux méthodes pour un mur chaux-chanvre, une plaque de plâtre et deux planches de laine de bois et, dans tous les cas, les résultats de la coupelle humide et de la coupelle sèche ont été sensiblement différents, les résultats de la coupelle humide étant supérieurs à ceux de la coupelle humide. (Thibaut Colinart et al., 2013) ont également trouvé des valeurs assez disparates de la coupelle sèche et de la coupelle humide pour un mur en béton de chanvre, tout comme (Bennai et al., 2018). Dans tous les cas, le transfert d'humidité semble impliquer à la fois le transport de vapeur et de liquide. Pour cette raison, la coupelle sèche donne des valeurs de perméabilité plus faibles. (Ouméziane et al., 2012) ont effectué plusieurs tests en coupelle humide sur un mur en béton de chanvre à différents couples d'humidité et ont constaté que la perméabilité à la vapeur d'eau augmente avec la teneur en eau, décrivant la loi de puissance suivante :

$$\delta_p = 3.67 \times 10^{-10} (u)^{0.488} \qquad (4.1)$$

Où δ_p représente la perméabilité à la vapeur en kg/(m·s·Pa) et u est la quantité d'eau adsorbée en kg/kg.

En ce qui concerne les composites de moelle, il y a très peu d'informations disponibles. (Brouard, Belayachi, Hoxha, et al., 2017) et (Brouard, Belayachi, Ranganathan, et al., 2017) se sont concentrés sur l'étude des composites argile-tournesol et paille de colza. Ils ont constaté que, comme pour les autres composites biosourcés, la conductivité thermique

augmente avec la teneur en eau. La tendance qu'ils ont trouvée était très similaire à celle de (J. P. Laurent & Guerre-Chaley, 1995) à 20-30°C.

Cette étude se concentre sur l'étude de bétons de tournesol, de maïs et de chènevotte, ainsi que sur le possible impact de la teneur en eau sur les propriétés hygrothermiques susmentionnées, en les comparant à d'autres bétons de chanvre et à d'autres matériaux de construction étudiés dans la littérature. La conductivité thermique et l'effusivité thermique seront mesurées respectivement à l'aide d'un fil chaud et d'un dispositif à plan chaud, tandis que la perméabilité à la vapeur d'eau sera évaluée de deux manières différentes. Les résultats obtenus à l'aide de la méthode coupelle humide et coupelle sèche seront comparés afin de déterminer si la teneur en eau a un impact sur la perméabilité à la vapeur d'eau des bétons à base de moelle et si les deux méthodes sont équivalentes en ce qui concerne ces bétons.

4.2. Matériaux et méthodes

4.2.1. Matériaux

Les bétons étudiés seront HB-S, C1-H, C2-H*, C2-S et C2-H+S, dont la composition et la masse volumique sont rappelées dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 - Récapitulatif de la composition et masse volumique des bétons.

Type de liant	**HB**		**C1**	**C2**		
Type d'agrégat	S	M	H	H*	S	H+S
Appellation	HB-S	HB-M	C1-H	C2-H*	C2-S	C2-H+S
Chènevotte/ liant [-]**	0	0	0,33	0,33	0	0,17
Moelle/liant [-]**	0,20	0,16	0	0	0,10	0,06
Eau/liant [-]**	2,92	2,92	0,81	0,88	0,80	1,07
Proportion massique de chènevotte [-]	0	0	0,15	0,15	0	0,07
Proportion massique de moelle [-]	0,05	0,04	0	0	0,05	0,03
$\boldsymbol{\rho_{sec}}$ **[kg/m³]**	150 ± 4	160 ± 5	470 ± 5	600 ± 10	550 ± 5	590 ± 6

** correspond au ratio de masse entre constituants

Les échantillons utilisés dans les essais thermiques (conductivité, effusivité et chaleur spécifique) ont 10 cm de diamètre et 4 cm d'épaisseur. Les échantillons utilisés dans les essais de perméabilité à la vapeur ont également 10 cm de diamètre, mais trois épaisseurs sont utilisées pour chaque essai : 2, 4 et 6 cm.

4.2.2. Méthodes

4.2.2.1. Variation de la conductivité thermique et de l'effusivité thermique avec la teneur en eau

La conductivité thermique (λ) du HB-S et du C1-H à différentes valeurs de teneur en eau a été mesurée à l'aide de la méthode bien connue du fil chaud. L'appareil FP2C a été utilisé conformément à la norme ISO 8894-2 (International Organization for Standardization, 2007). L'effusivité thermique (e) des deux mêmes matériaux est mesurée par la méthode du plan chaud, qui est réalisée à l'aide du même appareil FP2C avec une sonde de type plan chaud. Un flux de chaleur constant est imposé en positionnant la plaque chauffante mince et plate entre deux échantillons cylindriques superposés.

Les échantillons ont été testés 6 mois après leur fabrication, période pendant laquelle ils ont été stockés dans une pièce à 23 °C (± 5 °C) et 50 %HR (± 5 %HR). Juste avant les tests, les échantillons ont été séchés à l'étuve à 50°C, HR < 5% jusqu'à stabilisation et leur masse a été mesurée. On considère que l'échantillon s'est stabilisé si la variation de masse entre deux mesures effectuées avec une différence de 24 heures est inférieure à 1%, ce qui peut prendre plusieurs jours.

Afin d'atteindre différents niveaux de teneur en eau, les échantillons conditionnés ont été placés dans des boîtes à sel ventilées, une boîte pour chaque valeur cible d'humidité relative, qui était de 3, 23, 34, 43, 54, 63, 75, 85, 94 et 99 %HR dans cette étude. Chacune de ces valeurs est atteinte en utilisant une solution saline différente. Deux échantillons de chaque formulation sont placés dans chaque boîte à sel jusqu'à ce qu'ils se stabilisent, ce qui peut prendre plusieurs semaines, voire plusieurs mois. La durée élevée de l'essai est la raison pour laquelle différents conditionnements d'humidité sont effectués en parallèle et donc, un nombre important d'échantillons est nécessaire.

Une fois que la teneur en eau des échantillons placés dans chaque boîte à sel s'est stabilisée, le FP2C est introduit à l'intérieur de la boîte et la conductivité thermique et l'effusivité thermique sont mesurées trois fois pour chaque deux échantillons en plaçant la sonde entre eux. La température ambiante est de 23 ± 1 °C. Les résultats donnés pour la conductivité thermique et l'effusivité sont la moyenne arithmétique des trois mesures et sont exprimés en mW/(m·K) et J/(m^2·K·s$^{1/2}$), respectivement.

4.2.2.2. Chaleur spécifique

Mesure indirecte

Deux méthodes ont été utilisées pour la détermination de la capacité thermique spécifique (C_p). La première méthode consiste à obtenir C_p à partir des mesures de la conductivité thermique et de l'effusivité thermique détaillées dans **§4.2.2.1**, puisque les trois propriétés sont liées par la relation :

$$\rho C_p = \frac{e^2}{\lambda} \qquad (4.2)$$

Où e est l'effusivité thermique exprimée en J/(m²·K·s$^{1/2}$), λ est la conductivité thermique exprimée en W/(m·K), ρ est la masse volumique du matériau en kg/m³ et C_p est la chaleur spécifique en J/(kg·K). Le produit ρC_p représente la capacité thermique volumique en J/(m³·K).

Mesure par calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

La deuxième méthode que nous avons utilisée pour déterminer la capacité thermique spécifique est la calorimétrie différentielle à balayage (DSC pour ses sigles en anglais), expliquée dans (Grenet & Legendre, 2010) ainsi que les différentes techniques pour effectuer la mesure. Parmi celles-ci, nous avons choisi la mesure de la capacité calorifique spécifique isobare. Nous saisissons deux valeurs de température dans le dispositif SENSYS, ainsi que la valeur de la pente de l'augmentation linéaire de la température en fonction du temps (β) entre les deux valeurs de température constante. Nous avons établi une première température constante de 25 °C, une vitesse de chauffage de 5 °C/minute et une seconde température constante de 45 °C. L'appareil doit mesurer la réponse d'un échantillon à la succession de la période isotherme, du balayage de température à vitesse constante et de la deuxième période isotherme à pression constante et calculer la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température de l'échantillon. L'échange de chaleur pendant les phases isothermes doit être nul et égal à βC_p pendant la phase de chauffage.

Nous effectuons une première mesure de tare sur le porte-échantillon seul, sans échantillon. Ensuite, nous effectuons une deuxième mesure sur un échantillon d'un matériau de référence de masse connue m_{ref} que nous avons préalablement déterminé, pour calibrer le dispositif, en utilisant les mêmes paramètres. Nous avons choisi du sable de quartz, qui a une valeur théorique connue $C_{p\,ref\,th}$ de 830 J/(kg·K), puisque l'échantillon de saphir proposé par Grenet et Legendre n'était pas disponible. Le dispositif détermine la capacité thermique spécifique expérimentale du matériau de référence, $C_{p\,ref\,exp}$, à l'aide de l'équation suivante, où Y représente le signal mesuré :

$$C_{p\,ref\,exp} = \frac{Y_{sable} - Y_{tare\,1}}{m_{ref}\,\beta} \qquad (4.3)$$

Il la compare ensuite à la valeur théorique attendue pour le matériau de référence et obtient le coefficient d'étalonnage $K(T)$ selon **(4.4)**. Bien que ce coefficient soit fonction de la température, une valeur moyenne K est couramment utilisée.

$$K(T) = C_{p\,ref\,th}(T)/C_{p\,ref\,exp}(T) \qquad (4.4)$$

Une autre mesure de la tare est effectuée car l'appareil est très sensible et pourrait avoir subi une perturbation depuis la dernière tare. Ensuite, on effectue une dernière

mesure sur le matériau que l'on veut caractériser, après avoir préalablement déterminé sa masse $m_{échantillon}$, et on obtient sa capacité thermique spécifique.

$$C_{p\,sample}(T) = K\frac{Y_{échantillon}(T) - Y_{tare\,2}(T)}{m_{échantillon}\,\beta} \qquad (4.5)$$

Le dispositif SENSYS utilise (4.5) afin d'obtenir la capacité thermique spécifique du matériau à 25°C.

4.2.2.3. Perméabilité à la vapeur

Les méthodes de coupelle sèche et coupelle humide expliquées dans le **Chapitre 1** ont été utilisées pour déterminer la perméabilité à la vapeur des échantillons de C2-H*, C2-H+S, C2-S, HB-S et HB-M. Les échantillons sont testés 6 mois après leur fabrication et sont stockés à 23°C (± 5 °C) et 50 %HR (± 5 %HR) pendant cette période. Avant l'essai, les échantillons ont été séchés dans une étuve à 50 °C jusqu'à stabilisation de la masse (variation de moins de 5% entre deux pesées écartées de 24 heures) pour avoir un état initial, dans l'occurrence, l'état hydrique sec, pour tous les tests.

Tableau 4.2 - Récapitulatif des couples d'humidité testés pour chaque formulation.

	C2-H*	**C2-H+S**	**C2-S**	**HB-S**	**HB-M**
Coupelle sèche	3/54 %HR	3/54 %HR	3/54 %HR	3/23 %HR	3/23 %HR
	23/71 %HR	23/71 %HR	23/71 %HR	23/63 %HR	63/85 %HR
	-	-	-	33/68 %HR	75/85 %HR
Coupelle humide	85/54 %HR	85/54 %HR	85/54 %HR	93/23 %HR	63/33 %HR
	85/71 %HR	85/71 %HR	85/71 %HR	75/63 %HR	75/63 %HR
	-	-	-	85/63 %HR	-

Plusieurs couples d'humidité relative, repérés dans le **Tableau 4.2**, ont été testés pour chaque échantillon à l'aide de solutions salines, de sel uniquement (pour 23 %HR et 33 %HR) ou à l'aide de silica gel, dans le cas de 3%HR. Pour les coupelles sèches, du sel sans eau a été ajouté à l'intérieur de la coupelle afin de préserver une épaisseur minimale de la couche d'air, qui mesure 3 cm au début du test (voir **Figure 4.1**). Trois échantillons d'épaisseurs 2, 4 et 6 cm de chaque formulation ont été testés pour chaque couple d'humidité, afin d'appliquer la correction β expliquée dans le **Chapitre 1**. La correction de la couche d'air et ISO ont également été appliquées. Les tests ont été effectués dans une seule boîte à gants ventilée à l'intérieur de laquelle la température est de 23 ± 0,5 °C. La ventilation de la boîte assure que la vitesse de l'air au-dessus de chaque échantillon soit d'au moins 2,2 m/s. Chaque ensemble échantillon-gobelet a été pesé toutes les 24 heures pour suivre le transfert de masse. Alors que la masse des assemblages coupelle humide diminue, celle des assemblages coupelle sèche augmente. Après une période initiale de stabilisation, un débit massique constant est atteint, ce qui signifie qu'une fonction linéaire met en corrélation la variation de masse et le temps. Lorsque le test est

terminé, les échantillons sont pesés sans la coupelle, le silicone et le scotch aluminium afin de déterminer leur teneur en eau, puis ils sont séchés à 50°C dans une étuve jusqu'à stabilisation de la masse, à la suite de quoi leur masse sèche est mesurée. L'humidité et la température à l'intérieur des coupelles et à l'intérieur de la boîte à gants ont été contrôlées en continu pour vérifier qu'elles restent constantes.

Figure 4.1 - Aperçu des coupelles sèches avec silica gel (gauche) et coupelles humides avec solution saline (droite).

4.3. Résultats

4.3.1. Impact de la teneur en eau sur la conductivité thermique

L'impact de la teneur en humidité sur la conductivité thermique des bétons HB-S et C1-H a été évalué. Ces deux bétons ont été choisis en raison de leurs valeurs de masse volumique dissemblables et car ils contiennent des agrégats différents : chènevotte et moelle de tournesol. Comme le montre la **Figure 4.2**, l'augmentation de la teneur en humidité (exprimée en taux de saturation) entraîne une augmentation de la conductivité thermique des bétons (exprimée comme le ratio entre la conductivité et la conductivité à l'état sec), ce qui est cohérent puisque l'air à l'intérieur des pores du matériau est progressivement remplacé par de l'eau à l'état gazeux ou liquide. Pour rappel, le taux de saturation (ou degré de saturation), noté Sr, est défini comme le ratio entre le volume d'eau et le volume de pore. Dans le cas d'un milieu indéformable, il est reliable aux teneurs en eau massiques et volumiques via les relations :

$$Sr = \frac{V_w}{V_{pores}} = \phi\theta = \frac{\rho_{sec}}{\rho_w}\phi\, u = \frac{\phi w}{\rho_w} \qquad (4.6)$$

Comme expliqué par (Brouard, Belayachi, Hoxha, et al., 2017), la vapeur d'eau forme des ménisques dans les pores au-dessus d'un certain seuil d'humidité relative, générant des ponts thermiques. L'eau liquide a une conductivité thermique environ 25 fois supérieure à celle de l'air à température ambiante, alors que la vapeur d'eau a une

conductivité thermique équivalente à celle de l'air à 2 °C selon (Bouguerra, 1999), mais cette valeur devient 20 fois supérieure à 60 °C.

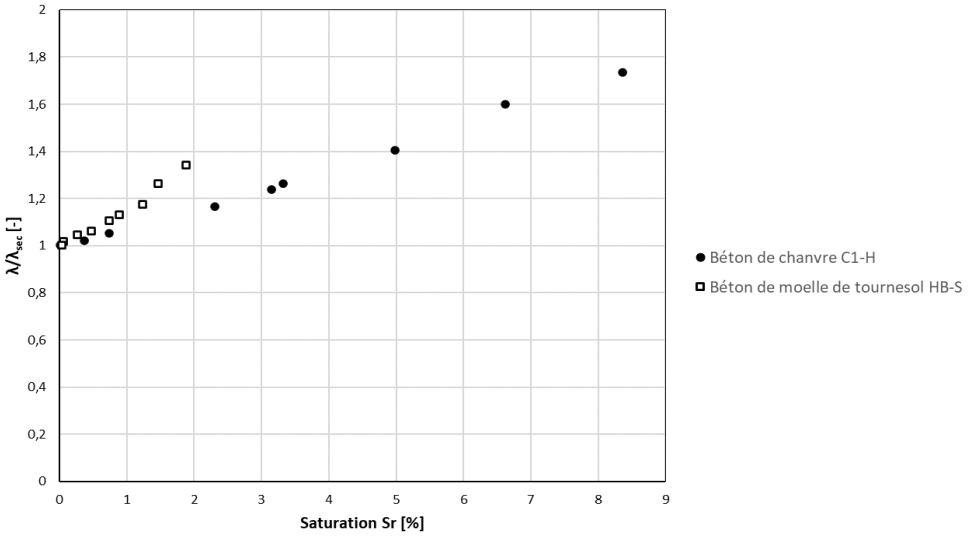


Figure 4.2 - Evolution de la conductivité thermique avec le taux de saturation pour C1-H et HB-S.

Pour l'humidité relative maximale (97 %HR, voir **Figure 4.3**), C1-H est plus saturé que HB-S, ce qui est conforme aux résultats obtenus dans le **Chapitre 2**. En ce qui concerne leur comportement thermique, HB-S présente un λ inférieur à celui de C1-H dans toute la gamme d'humidité, avec des conductivités thermiques sèches de 57,5 mW/(m·K) pour HB-S et de 97 mW/(m·K) pour C1-H. On peut observer que l'évolution de λ est pratiquement linéaire pour les deux bétons, l'augmentation étant plus marquée pour HB-S.

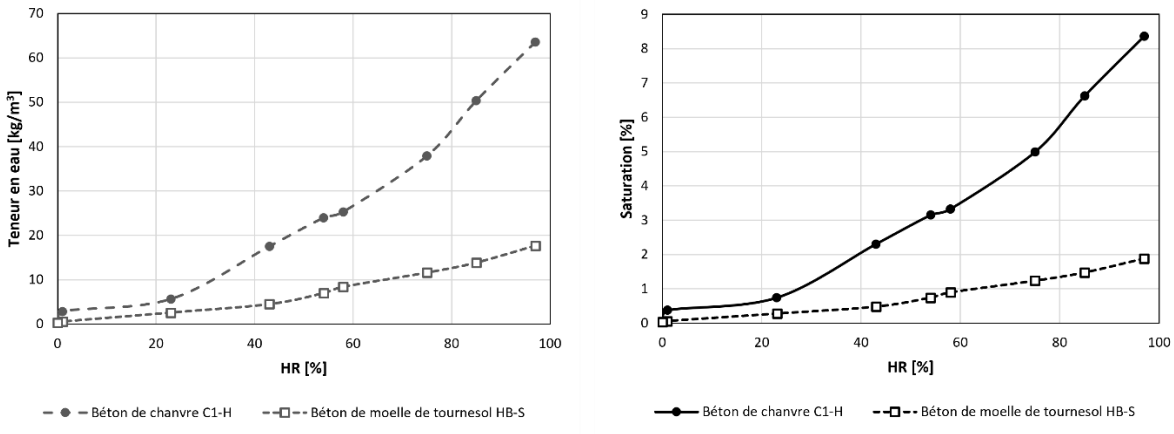


Figure 4.3 - Relation entre la teneur en eau et l'humidité relative (gauche) et relation entre la saturation et l'humidité relative (droite) trouvées pour C1-H et HB-S lors des essais de conductivité et d'effusivité thermique.

4.3.2. Impact de la teneur en eau sur l'effusivité thermique

La **Figure 4.4** illustre l'évolution de l'effusivité thermique du béton de moelle de tournesol HB-S et du béton de chanvre C1-H avec le taux de saturation. Le premier présente une effusivité thermique sèche de 95,5 J/(m^2·K·s$^{1/2}$) et le second, de 233 J/(m^2·K·s$^{1/2}$). La différence entre les deux est probablement la quantité d'agrégat que contient chaque béton, HB-S ayant sensiblement plus de moelle (en proportion volumique) que C1-H a de la chènevotte. L'effusivité des deux augmente avec le taux d'humidité, comme attendu (Antczak et al., 2003), puisque l'effusivité thermique de l'eau est environ 270 fois supérieure à celle de l'air (Bouguerra et al., 1998). Comme l'expliquent Bouguerra et al. l'effusivité dépend de la facilité avec laquelle la chaleur est transmise à travers le matériau poreux. Par conséquent, la constrictivité - qui est la réduction de la section du chemin par lequel la chaleur circule - et la tortuosité des chemins de chaleur se traduisent par une faible effusivité. À l'état sec, la chaleur circule principalement à travers la matrice solide mais, en présence d'eau, la chaleur peut circuler à travers les deux phases. À faible teneur en humidité, l'eau forme un film à la surface des pores, ce qui élargit la section des éventuels chemins des lignes de flux de chaleur. De plus, lorsque la teneur en humidité dépasse un certain seuil, la phase liquide à l'intérieur du matériau est considérée comme continue et la tortuosité des lignes de flux de chaleur commence à diminuer. Dans les deux cas, le phénomène se traduit par une augmentation de l'effusivité thermique.

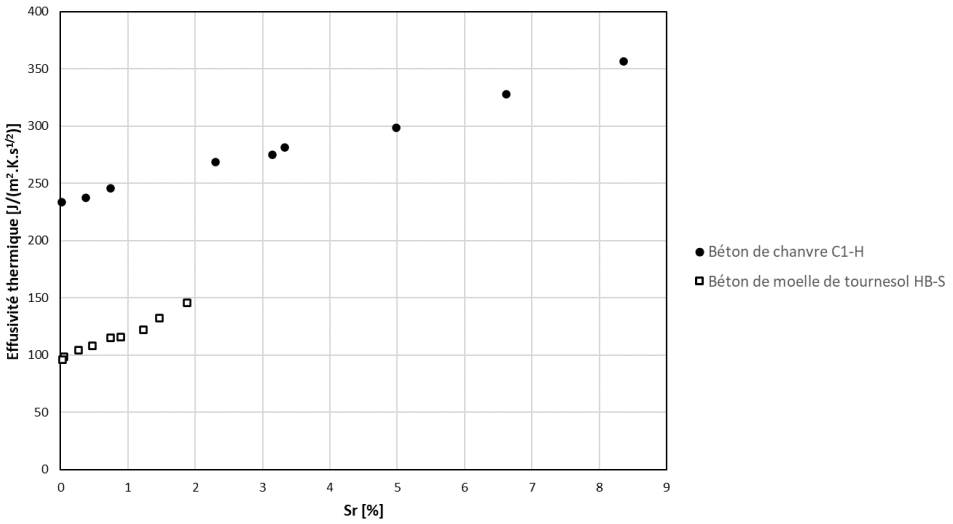


Figure 4.4 - Evolution de l'effusivité thermique avec le taux de saturation pour C1-H et HB-S.

Tant pour HB-S que pour C1-H, l'augmentation de l'effusivité thermique est presque linéaire. L'effusivité thermique de HB-S est inférieure à celle de C1-H dans toute la gamme d'humidité, et la pente qu'il décrit est légèrement plus raide.

4.3.3. Impact de la teneur en eau sur la chaleur spécifique

L'évolution de la chaleur spécifique C_p de C1-H et HB-S avec la teneur en eau massique est représentée dans la **Figure 4.5**. A l'état sec, C_p vaut 1190 J/(kg·K) pour le béton de chènevotte et 1055 J/(kg·K) pour le béton de moelle de tournesol.

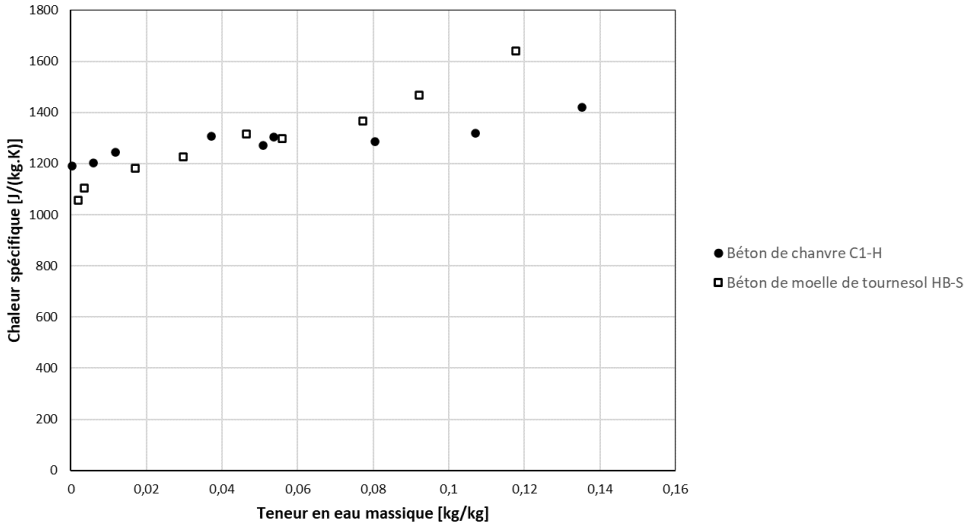


Figure 4.5 - Evolution de la chaleur spécifique avec le taux de saturation pour C1-H et HB-S.

Pour les deux bétons, la chaleur spécifique augmente avec la présence d'humidité, ce qui est cohérent avec le fait que l'eau remplace progressivement l'air. Lorsque la contribution de l'air est négligeable à cause de sa masse volumique très réduite, ce n'est pas le cas de l'eau, raison pour laquelle la chaleur spécifique du béton augmente avec la teneur en eau. La tendance des deux matériaux est presque linéaire pour les deux bétons, mais le C_p de HB-S augmente plus sensiblement.

Les valeurs trouvées par la méthode DSC sont 1213 J/(kg·K) pour C1-H et 1094 J/(kg·K) pour HB-S, ce qui est très proche des valeurs trouvées par la méthode indirecte, sachant que la teneur en eau pendant la mesure DSC est censée être proche de 0.

4.3.4. Impact de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur

Les résultats de perméabilité à la vapeur δ_p à différents niveaux de saturation pour C2-H*, C2-H+S, C2-S, HB-S et HB-M sont montrés dans la **Figure 4.6**.

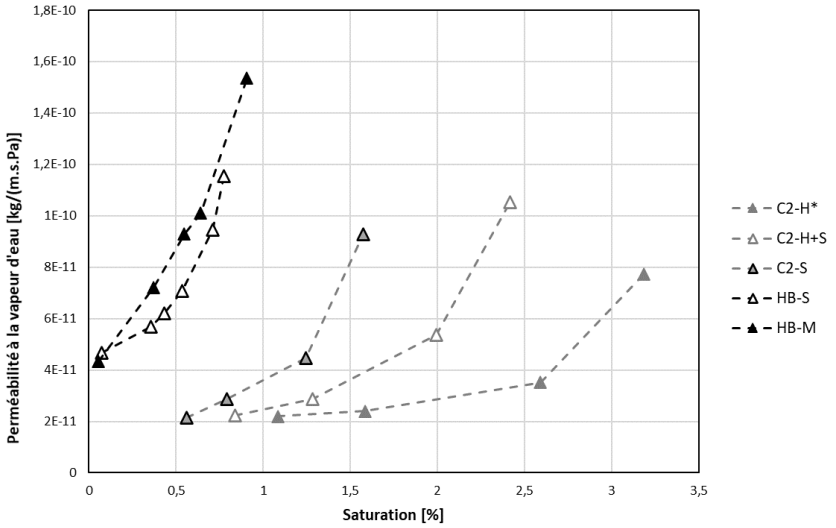


Figure 4.6 - Evolution de la perméabilité à la vapeur avec la saturation.

Pour toutes les formulations, la perméabilité à la vapeur augmente avec la saturation. Le liant semble influencer fortement la tendance perméabilité – saturation, puisque l'on distingue deux groupes de courbes : un premier, constitué par HB-M et HB-S, avec une perméabilité à faible humidité autour de $4{,}5 \cdot 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa) et une augmentation d'environ 300 % pour les valeurs de saturation maximales ; puis un deuxième groupe constitué par C2-S, C2-H+S et C2-H*, qui présente une perméabilité minimale d'environ $2{,}2 \cdot 10^{-11}$ kg/(m·s·Pa) et une augmentation d'environ 400 %.

4.4. Discussion

Alors que certains matériaux sont testés pour toute la gamme de teneur en eau, du matériau sec à la saturation, les bétons étudiés dans cette campagne expérimentale n'ont été testés que pour la gamme de teneur en eau pouvant être induite par l'humidité relative ambiante (0-97 %HR), qui est beaucoup plus limitée. La raison de cette prémisse est que ces matériaux sont destinés à un usage intérieur et, par conséquent, aucune source d'humidité autre que l'humidité de l'air ne les affectera.

4.4.1. Impact de la teneur en eau sur la conductivité thermique

Alors que de nombreux auteurs signalent que la conductivité thermique augmente de manière linéaire avec la teneur en humidité pour plusieurs matériaux de construction (Collet & Pretot, 2014; Etienne Gourlay et al., 2017; Hall & Allinson, 2009; Real et al., 2016; Troppová et al., 2015; Yu et al., 2011), d'autres ont trouvé une corrélation exponentielle (Belkharchouche & Chaker, 2016; Boutin, 1996; Taoukil et al., 2013) entre

les deux magnitudes. Cependant, la température joue un rôle majeur dans la forme du graphique et doit être prise en compte, tout comme la section du graphique (par exemple, on ne peut pas conclure que la corrélation est linéaire ou exponentielle en regardant exclusivement la plage de faible teneur en humidité).

Certains documents fournissent des informations très complètes sur ces facteurs et étudient la conductivité thermique dans toute la gamme des teneurs en eau (du matériau sec à la saturation à 100 %) et évaluent l'impact de la température. On peut citer par exemple (J. P. Laurent & Guerre-Chaley, 1995), qui examinent le comportement thermique du béton cellulaire autoclavé, et (Bouguerra, 1999), qui traite des bétons de bois, argile et ciment. Les deux articles expliquent que, pour des températures inférieures à 20 °C, la conductivité thermique augmente de façon presque linéaire avec le degré de saturation et que, au-dessus de cette température, la relation devient plus curviligne. La différence réside dans les phénomènes d'évaporation et de condensation expérimentés par l'eau, l'augmentation la plus importante de la conductivité thermique se produisant à un degré de saturation compris entre 0 et 50 % pour (Bouguerra, 1999) et entre 20 et 40 % pour (J. P. Laurent & Guerre-Chaley, 1995). La section à faible humidité des graphiques curvilignes peut en effet être interprétée comme une fonction exponentielle, mais les graphiques complets à haute température présentent plutôt une forme de "S".

En comparant ces résultats à ceux d'autres auteurs, on peut remarquer que tous les matériaux semblent présenter ces deux comportements pour la relation entre la conductivité thermique et la teneur en humidité : une croissance linéaire à basse température et une relation en forme de "S" à des températures plus élevées, mais le seuil de température est différent pour chaque matériau. L'eau, qu'elle soit à l'état liquide ou gazeux, présente une conductivité thermique plus élevée à des températures plus élevées. De plus, à des températures plus élevées, les interactions entre l'eau, l'air et la matrice changent, ce qui pourrait induire une morphologie de répartition des phases différente en fonction de la température. Ces deux phénomènes favorisent des valeurs de conductivité thermique plus élevées du matériau humide à haute température. Les non-linéarités pour des températures supérieures à la température ambiante ($T > 20$ °C) sont, d'après (Bouguerra, 1999) et (J. P. Laurent & Guerre-Chaley, 1995), provoquées par des phénomènes d'évaporation-condensation, dont la présence augmente avec la teneur la teneur en agrégats végétaux.

En outre, (Boukhattem et al., 2017) constatent pour une température donnée que la présence de fibres végétales diminue la conductivité thermique des composites dans toute la gamme de teneur en eau par rapport au mortier d'origine, mais que cette diminution est plus importante à l'état sec, car le caractère isolant des fibres hydrophiles se dégrade en présence d'eau. Les résultats trouvés dans cette étude sont donc cohérents avec cette analyse, le HB-S ayant une forte teneur en agrégat végétal hydrophile, ce qui explique à la fois la faible conductivité thermique à l'état sec et son augmentation très marquée en présence d'eau.

La **Figure 4.7** illustre l'évolution de la conductivité thermique de HB-S et de C1-H et de plusieurs matériaux biosourcés tirés de la littérature avec le taux de saturation. Les matériaux peuvent être organisés en groupes séparés, le premier étant les bétons à base de chanvre, représentés par des points dans la figure. Les résultats du C1-H sont comparés à ceux de (Collet & Pretot, 2014), qui ont étudié trois formulations de chaux-chanvre avec des masses volumiques différentes allant de 390 à 463 kg/m^3. Les trois bétons présentent une augmentation linéaire de λ avec Sr et une conductivité thermique sèche légèrement supérieure à celle du C1-H. On remarque que la pente de chaque composite est différente et, après vérification, on constate que la pente augmente progressivement avec la masse volumique du matériau.

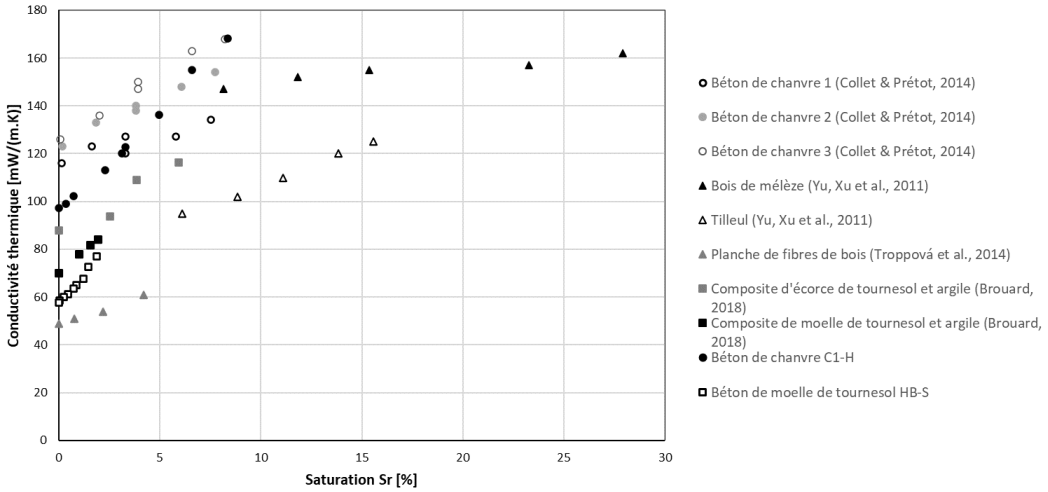


Figure 4.7 - Evolution de la conductivité thermique avec le taux de saturation pour plusieurs matériaux provenant de la littérature et de la présente étude.

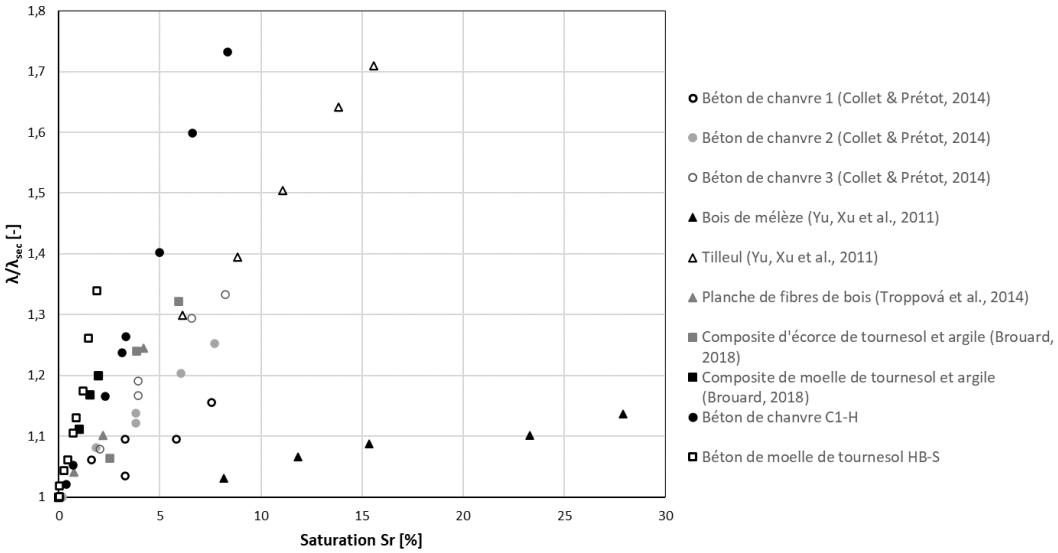


Figure 4.8 - Evolution de la conductivité thermique rapportée à la conductivité thermique sèche avec le taux de saturation pour plusieurs matériaux provenant de la littérature et de la présente étude.

Le deuxième groupe de matériaux est le bois et les dérivés du bois, représentés par des triangles. (Yu et al., 2011) étudient le bois de mélèze et le tilleul, deux types de bois aux tendances $\lambda - Sr$ différentes. Contrairement aux composites de chanvre mentionnés ci-dessus, ces deux types de bois ont des anatomies très différentes entre eux. Alors que le bois de mélèze est composé de trachéides (cellules étroites, courtes et tubulaires) orientées dans la direction du tronc et à parois épaisses (Liu et al., 2019), le tilleul présente des vaisseaux (pores larges, longs et tubulaires) de 50 µm de diamètre et à parois minces, entourés de trachéides (Gao et al., 2020).

Selon (Yu et al., 2011), la différence de structure des deux bois peut expliquer la différence de tendance $\lambda - Sr$ puisqu'elle entraîne une répartition différente de l'eau. Par ailleurs, ces auteurs ont étudié la conductivité thermique sèche de plusieurs types de bois et ont conclu qu'elle est conditionnée par leur masse volumique, ce qui explique la conductivité thermique sèche plus élevée, que l'on peut déduire par extrapolation, du bois de mélèze par rapport au tilleul (672,8 contre 456 kg/m^3), et qui est en accord avec les résultats trouvés dans le **Chapitre 2** pour les matériaux biosourcés. Le dernier élément de ce groupe est constitué par les panneaux de fibres à base de bois étudiés par (Troppová et al., 2015), qui sont des panneaux légers (avec une masse volumique de 243 kg/m^3) composés presque entièrement de fibres végétales. Ainsi, leur conductivité thermique est très faible, présentant une conductivité thermique à sec d'environ 50 mW/(m·K).

Enfin, le troisième groupe de matériaux est constitué de composites de tournesol, représentés par des carrés. Deux matériaux étudiés par (Brouard, 2018) sont comparés au HB-S, le premier matériau étant un composite d'argile et d'écorce de tournesol avec une masse volumique de 512 kg/m^3 et le second, un composite d'argile et de moelle de tournesol dont la masse volumique est de 235 kg/m^3. Là encore, les conductivités thermiques à sec augmentent avec la masse volumique sèche. Les valeurs de HB-S et du composite de moelle de tournesol de Brouard sont très proches dans toute la plage de saturation, les deux présentant une pente prononcée.

Une explication possible de cette augmentation soudaine de la conductivité thermique est que les particules de moelle de tournesol adsorbent l'eau en raison de leur nature hydrophile, car la moelle peut absorber jusqu'à 917 % de son poids, tandis que la chènevotte en absorbe jusqu'à 300 %, selon (Magniont et al., 2012). Ainsi, les propriétés isolantes des particules de moelle seraient considérablement diminuées et, avec elles, la nature isolante du composite, puisque l'on considère que les particules de moelle forment un réseau connecté (elles représentent pratiquement la moitié du volume de l'échantillon) à travers lequel la chaleur se transmet en présence d'humidité.

La **Figure 4.8** montre les mêmes résultats en divisant la conductivité de chaque matériau à chaque saturation par la conductivité du matériau à sec. On peut voir ainsi que les composites de moelle augmentent plus rapidement que les autres matériaux.

En conclusion, la comparaison de l'évolution $\lambda - Sr$ de HB-S et C1-H avec celle d'autres matériaux biosourcés issus de la littérature montre que la structure, la masse volumique et la nature de chaque matériau jouent un rôle majeur sur sa réponse thermique en présence d'humidité. En particulier, la structure conditionne la répartition de l'eau au sein du matériau, l'eau se trouvant majoritairement dans les petits pores (Boutin, 1996). C1-H et HB-S présentent tous deux des résultats proches de ceux d'autres bétons de chanvre et de moelle de tournesol issus de la littérature, et leurs valeurs de conductivité thermique sont inférieures à 170 et 80 mW/(m·K), respectivement, dans toute la gamme d'humidité relative, ce qui représente un bon comportement isolant par rapport à d'autres matériaux de construction, traditionnels (Breuer et al., 2020; Côté & Konrad, 2005) et biosourcés (Haba et al., 2017; Khedari et al., 2001).

4.4.2. Impact de la teneur en eau sur l'effusivité thermique

Plusieurs auteurs ont observé que l'effusivité thermique augmente de façon presque linéaire avec le taux d'humidité, comme (Aubert, 2013) pour la terre crue, (Arnaud Evrard, 2008) pour le béton de chanvre ou (Houngan et al., 2015) pour deux types de bois. L'évolution de certains de ces matériaux peut être observée sur la **Figure 4.9**, ainsi que les résultats obtenus dans cette campagne expérimentale. Bien que peu de travaux abordent la variation de l'effusivité thermique des matériaux de construction avec l'humidité, il a été choisi de comparer les résultats de cette étude uniquement à des travaux dans lesquels l'apport d'humidité est le résultat de l'humidité ambiante, et non d'une exposition directe à l'eau liquide.

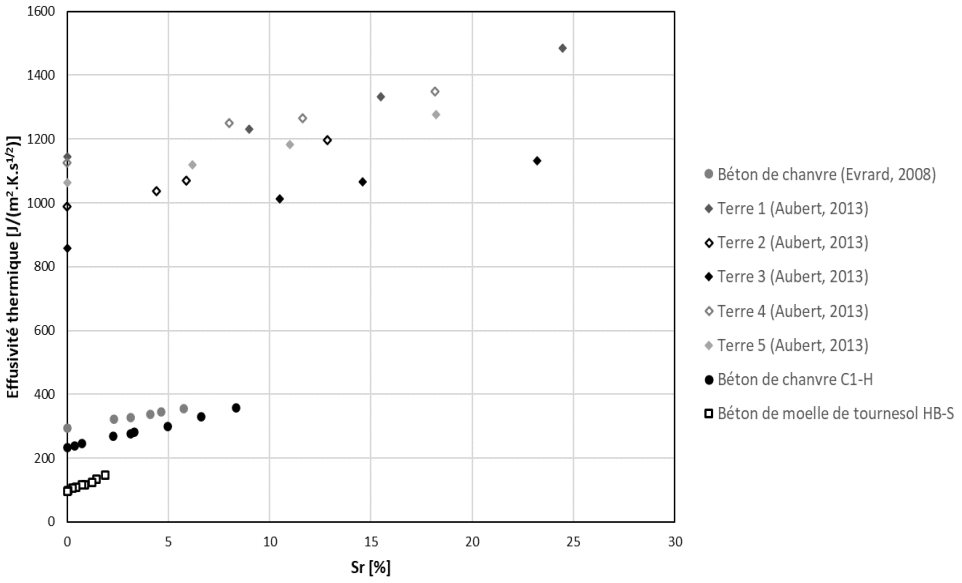


Figure 4.9 - Evolution de l'effusivité thermique avec le taux de saturation pour plusieurs matériaux provenant de la littérature et de la présente étude.

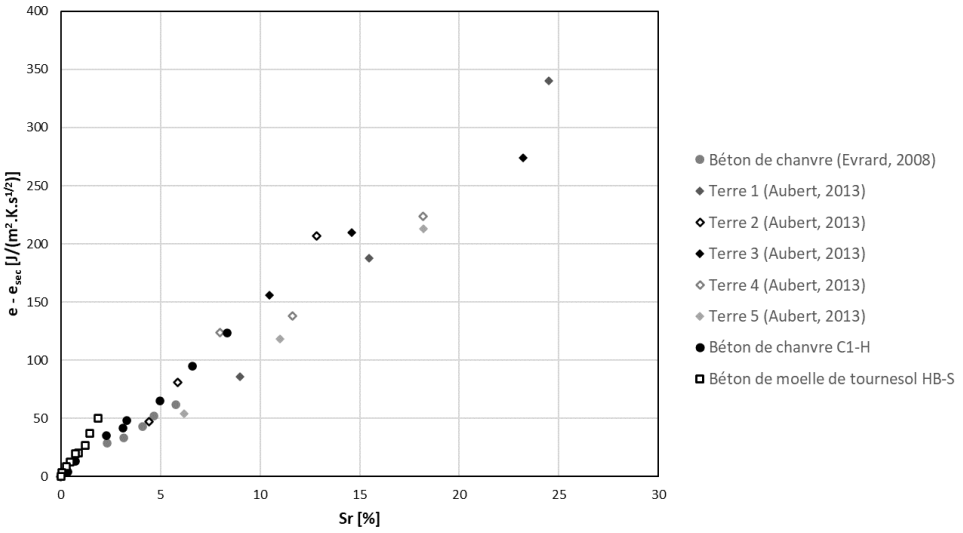


Figure 4.10 - Evolution de l'augmentation de l'effusivité thermique en relation à l'effusivité à l'état sec avec le taux de saturation pour plusieurs matériaux provenant de la littérature et de la présente étude.

Les échantillons de terre crue d'Aubert présentent des valeurs d'effusivité thermique relativement élevées, entre 850 et 1500 J/(m^2·K·s$^{1/2}$), tandis que les bétons de chanvre et de tournesol présentent des valeurs inférieures à 400 J/(m^2·K·s$^{1/2}$), mais ils sont également plus denses et moins poreux que les bétons végétaux de la figure. Le C1-H est très proche du béton de chanvre d'Evrard, tandis que le HB-S a une effusivité thermique plus faible. Il est intéressant de noter que tous les matériaux présentent approximativement la même pente (voir **Figure 4.10**), ce qui suggère que l'humidité (présentée comme taux de saturation) a le même effet sur l'effusivité de tous les matériaux. En résumé, le HB-S et le C1-H présentent tous deux une effusivité thermique très faible pour toutes les valeurs d'humidité relative et sont donc intéressants pour une utilisation en intérieur. Par exemple, le béton a un e de 2167 J/(m^2·K·s$^{1/2}$), le plâtre a un e de 743 et le bois a un e de 399, selon (Wastiels et al., 2012).

4.4.3. Impact de la teneur en eau sur la chaleur spécifique

Selon plusieurs études (Allam et al., 2018; P. De Bruijn & Johansson, 2013; Jerman & Černý, 2012), l'humidité a un effet très important sur la capacité thermique spécifique des matériaux de construction, puisque le C_p de l'eau est 4 à 5 fois supérieur au C_p du matériau sec (Jerman & Černý, 2012). Contrairement à l'effet de l'eau sur les propriétés de transport de la chaleur, la présence d'humidité dans le matériau est bénéfique en termes de capacité thermique, car elle améliore la capacité du matériau à stocker la chaleur. La relation entre la capacité thermique de la matière humide et la teneur en eau **(4.7)** est couramment utilisée pour prédire le C_p des sols (Abu-Hamdeh, 2003; Alnefaie & Abu-Hamdeh, 2013; De Vries, 1963).

$$C_{p,h} = \frac{\rho_{sec}}{\rho_h}\left(C_{p,sec} + u \cdot C_{p,eau}\right) \qquad (4.7)$$

Où $C_{p,sec}$ et $C_{p,h}$ sont les valeurs de chaleur spécifique du matériau sec et humide en J/(kg·K), ρ_{sec} et $\rho_h = \rho_{sec}(1+u)$ [kg/m³] sont les masses volumiques sèche et humide dudit matériau, u est la teneur en humidité massique en kg/kg et $C_{p,eau}$ est la capacité thermique spécifique de l'eau. Le développement mathématique de **(4.7)**, qui est notamment expliqué dans (Alnefaie & Abu-Hamdeh, 2013), suppose que les capacités thermiques des phases gazeuses (air sec et vapeur) sont négligeables et que celle de l'eau et de son substrat ne varient pas avec son état d'adsorption.

(Jerman & Černý, 2012) utilisent cette expression pour prédire la capacité thermique spécifique de plusieurs matériaux de construction, mais les valeurs expérimentales ne sont pas fournies. Cependant, (Glass & Zelinka, 2010) étudient la capacité thermique spécifique du bois et concluent que le C_p du matériau humide peut être exprimé selon **(4.7)** en rajoutant un terme additionnel qui doit être inclus pour prendre en compte l'énergie de la liaison entre l'eau et le bois lorsque la teneur en eau est inférieure au point de saturation des fibres - un terme utilisé pour décrire un seuil d'humidité au-delà duquel les propriétés physiques et mécaniques du bois changent substantiellement (Siau, 1984).

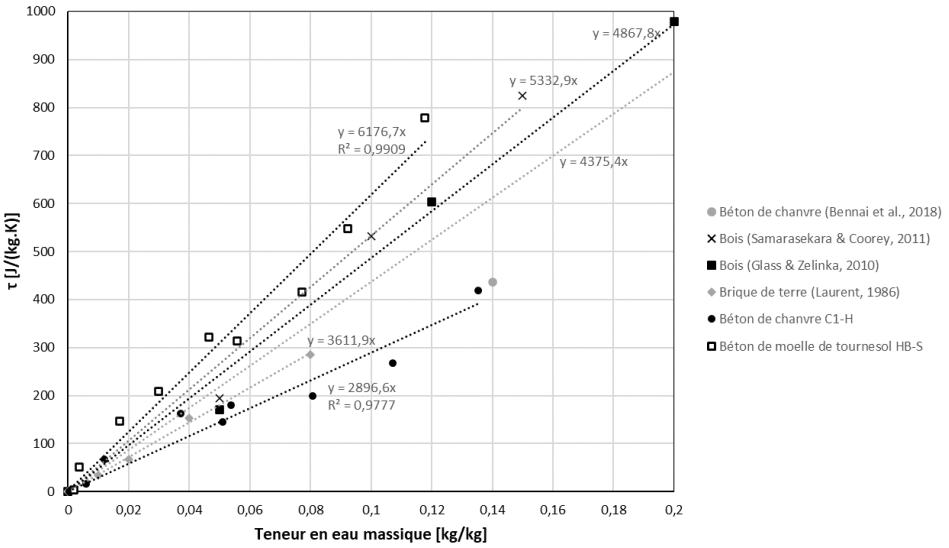


Figure 4.11 - Evolution de la chaleur spécifique avec la teneur en eau massique pour plusieurs matériaux provenant de la littérature et de la présente étude.

La **Figure 4.11** illustre l'augmentation de $\tau = \frac{(\rho_h \cdot C_{p,h} - \rho_{sec} \cdot C_{p,\mathrm{sec}})}{\rho_{sec}}$ de plusieurs matériaux de construction avec la teneur en eau massique, ainsi que la pente de la tendance pour chaque matériau et le coefficient de détermination R^2 pour C1-H et HB-S. Selon **(4.6)**, la tendance devrait être linéaire, et sa pente devrait être d'environ 4185 J/kg·K, la valeur du C_p de l'eau liquide. La pente des matériaux de la **Figure 4.9** présente une certaine variabilité, allant de 2896,6 à 6176,7 J/kg·K. Le béton de chanvre de Bennai et al. (Bennai et al., 2018), qui a été testé pour des teneurs en eau entre 0 et

1,33 [kg/kg] en immergeant le béton, montre la valeur la plus proche de $C_{p,eau}$, 4375,4 J/kg·K, car, pour cette plage de valeurs, l'eau libre représente une partie importante de l'eau dans le matériau. Cependant, quand on s'intéresse à la plage de teneurs en eau entre 0 et 0,15, qui est la teneur en eau maximale trouvée pour le reste des matériaux, la valeur de la pente du béton de chanvre de Bennai et al. devient 3120,4 J/kg·K. Le béton de chanvre C1-H présente néanmoins une valeur de pente très proche, 2898,6 J/kg·K, lorsque le béton de moelle de tournesol HB-S et le bois étudié par (Samarasekara & Coorey, 2011) et le bois étudié par (Glass & Zelinka, 2010) montrent des valeurs de pente supérieures à $C_{p,eau}$, 6176,7 J/kg·K, 5332,9 J/kg·K et 4867,8 J/kg·K, respectivement. La brique de terre étudiée par (J.-P. Laurent, 1986) montre une valeur légèrement inférieure à $C_{p,eau}$: 3611,9 J/kg·K.

A faible teneur en eau, l'eau adsorbée dans le matériau présente des interactions avec celui-ci qui ne sont pas négligeables. Ces interactions peuvent entraîner une énergie additionnelle, comme dans le cas du bois (Glass & Zelinka, 2010) et, probablement, du béton de moelle. Cette énergie additionnelle serait une enthalpie d'interface liée à un processus endothermique. D'un autre côté, les bétons de chanvre et la brique de terre présentent des pentes trop faibles à faible teneur en eau, comportement qui pourrait être expliqué par la diminution de la chaleur spécifique de l'eau adsorbée évoquée par (Mercury et al., 2001) et (Ransom & Helgeson, 1994). En effet, l'eau adsorbée subirait un changement de phase progressif et acquerrait des propriétés proches à la glace.

4.4.4. Impact de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur

De nombreux auteurs ont remarqué l'influence du transport de l'eau liquide sur les résultats de la perméabilité à la vapeur, comme (Antonin Fabbri, 2017), qui a expliqué qu'il y a probablement un effet de couplage entre la migration de l'eau et de la vapeur. Par conséquent, le test de la coupelle humide et sèche mesureraient le transfert d'humidité (liquide et vapeur) et pas seulement le transfert de vapeur (Philip & De Vries, 1957). Autrement dit, cet essai ne donnerait pas accès directement à δ_p mais à un coefficient k_m, égal à :

$$k_m = \delta_p + k_l^* \tag{4.8}$$

Avec k_l^* une forme du coefficient de perméabilité à l'eau liquide, dont l'expression est développée en **Annexe H**.

Certains auteurs établissent un lien entre l'augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau avec l'humidité relative et la condensation capillaire (Carmeliet et al., 1999; Kari et al., 1991; Pavlík et al., 2012). Plus précisément, (Carmeliet et al., 1999) ont souligné que, dans les matériaux hygroscopiques poreux et capillaires avec une large distribution de la taille des pores, les principaux mécanismes de transfert d'humidité sont les effets capillaires et la sorption de l'eau, ce qui exclut le transport de vapeur. Ils ont illustré qu'à faible humidité relative, l'eau liquide n'est présente que sous la forme d'un film très mince

d'eau adsorbée, son épaisseur étant d'à peine quelques molécules, qui est fortement lié à la surface des pores et ne contribue donc pas au transport de l'humidité. À ce stade, le transfert d'humidité est régi par le transfert de vapeur, plus précisément par la diffusion de vapeur moléculaire et par la diffusion de Knudsen. Lorsque la saturation en humidité augmente, la condensation capillaire se produit dans les plus petits pores et des îlots d'eau liquide apparaissent, ce qui augmente localement la perméabilité à l'humidité, puisque le transfert d'eau est plus efficace que le transfert de vapeur. Avec l'augmentation de la saturation, ces îlots liquides prolifèrent et finissent par converger les uns avec les autres jusqu'à un seuil au-dessus duquel un réseau d'eau liquide connecté est établi dans la structure poreuse. À ce stade, on observe une augmentation notable de la perméabilité à l'humidité. Il a également été observé que la forme des pores et, indirectement, l'hystérésis, ont un impact sur la perméabilité à l'humidité, comme l'expliquent Carmeliet et al.

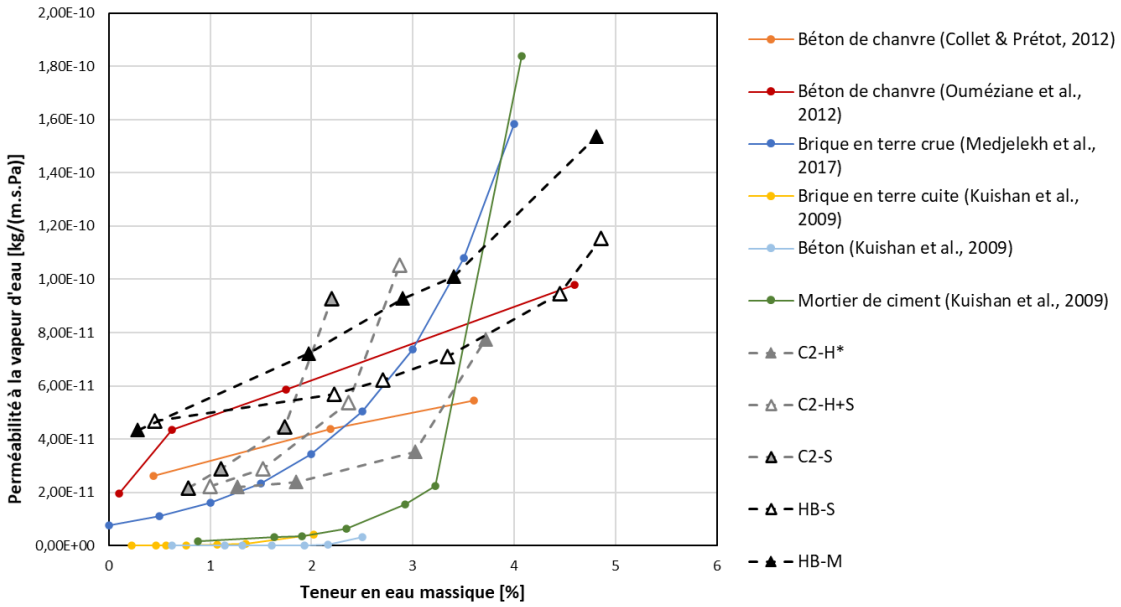


Figure 4.12 - Evolution de la perméabilité à la vapeur apparente avec la teneur en eau massique des bétons de cette étude et de matériaux de la littérature.

La **Figure 4.12** présente un récapitulatif des résultats de perméabilité des bétons qui font l'objet de cette étude, accompagnés de plusieurs matériaux de construction répertoriés dans la littérature. Elle représente la variation avec la teneur en eau massique car les données de saturation des matériaux de la littérature ne sont pas disponibles. Dans un premier lieu, (Collet & Pretot, 2012) et (Ouméziane et al., 2012) étudient la variation de la perméabilité avec l'humidité relative et la teneur en eau, respectivement, de deux bétons de chanvre, en orange et rouge sur la figure. Les résultats d'humidité relative de Collet & Prétot ont été transformés en teneur en eau à l'aide de l'isotherme d'adsorption fournie, car les essais de perméabilité ont été menés en adsorption. Ensuite, les résultats de (Medjelekh et al., 2017) pour la brique en terre crue sont représentés en bleu foncé et, dans un troisième lieu, les résultats de (Kuishan et al., 2009) pour la brique

en terre cuite, le béton et le mortier de ciment apparaissent en jaune, bleu clair et vert, respectivement. Lorsque la perméabilité du béton classique et de la brique en terre cuite de Kuishan et al. est considérablement plus basse, tous les autres matériaux présentent des valeurs de perméabilité dans la même plage.

Pour tous les matériaux, la perméabilité mesurée, qui est en réalité, comme cela est mentionné plus haut, la perméabilité à l'humidité, augmente avec la teneur en eau car le transport de liquide est beaucoup plus efficace que celui de la vapeur. Cette augmentation peut être plus ou moins rapide en fonction de la répartition de l'eau dans le matériau. Pour les matériaux de la présente étude (voir **Figure 4.6**), cette répartition est conditionnée par deux facteurs : le liant et la présence de moelle. Etant donné que les résultats pour les deux familles de matériaux (C2 et HB) sont bien distincts, le type de liant semble être le conditionnant principal. Cela pourrait être expliqué par l'influence de la forme des pores sur la perméabilité évoquée par Carmeliet et al. Ensuite, les bétons qui contiennent de la moelle montrent une augmentation de la perméabilité avec la saturation plus importante. L'hypothèse formulée pour expliquer la hausse de la conductivité thermique des bétons de moelle avec la teneur en eau est également valable pour la perméabilité : la moelle, qui est très hydrophile, adsorbe de l'eau même à faible saturation. Il est supposé qu'elle forme des chemins connexes, étant donné qu'elle représente une partie importante du volume. Ces chemins connexes serviraient au transport d'eau liquide d'une part à l'autre de l'échantillon, faisant augmenter significativement la perméabilité mesurée. Les bétons HB-S, HB-M et C2-S contiennent pratiquement la même proportion de moelle, lorsque C2-H+S en contient moins et est mélangé avec des particules de chènevotte qui gêneraient la formation de chemins connexes de moelle.

Une autre explication pourrait provenir des distributions des tailles de micropores mesurées par la méthode BJH et présentés au **Chapitre 2**. En effet, l'observation des formulations C2-H*, C2-H+S et C2-S tend à montrer que le remplacement progressif de la chènevotte par de la moelle aurait tendance à étaler la distribution des tailles de pore dans la gamme comprise entre 1 et 20 nm. Cet étalement pourrait suggérer une meilleure connectivité des micropores et ainsi une percolation plus aisée de la phase liquide aux faibles saturations.

En général, tous les matériaux présentent une augmentation de type exponentiel, à l'exception du béton de chanvre de Collet & Prétot et de celui de Ouméziane et al. Pour le premier, la croissance est pratiquement linéaire. Pour le deuxième, la tendance décrit une courbe concave, contrairement aux courbes des autres matériaux, qui sont convexes.

Cependant, la méthode utilisée dans ces deux travaux n'est pas tout à fait la même que la méthode utilisée dans ce projet de thèse. Ces auteurs font l'hypothèse que l'humidité relative moyenne dans l'échantillon correspond à la moyenne arithmétique de l'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur de la coupelle. A partir de celle valeur, Ouméziane et al. utilisent l'isotherme d'adsorption pour déterminer indirectement la

teneur en eau des échantillons, séchés préalablement. Ce même principe a été appliqué pour transformer les résultats d'humidité relative de Collet & Prétot en teneur en eau. Pour évaluer la pertinence de cette méthode, on compare ci-dessous la teneur en eau expérimentale à celles qui correspondent respectivement à l'isotherme d'adsorption, à l'isotherme de désorption et à la moyenne de sorption-désorption pour les formulations C2-H*, C2-H+S, C2-S, HB-S et HB-M.

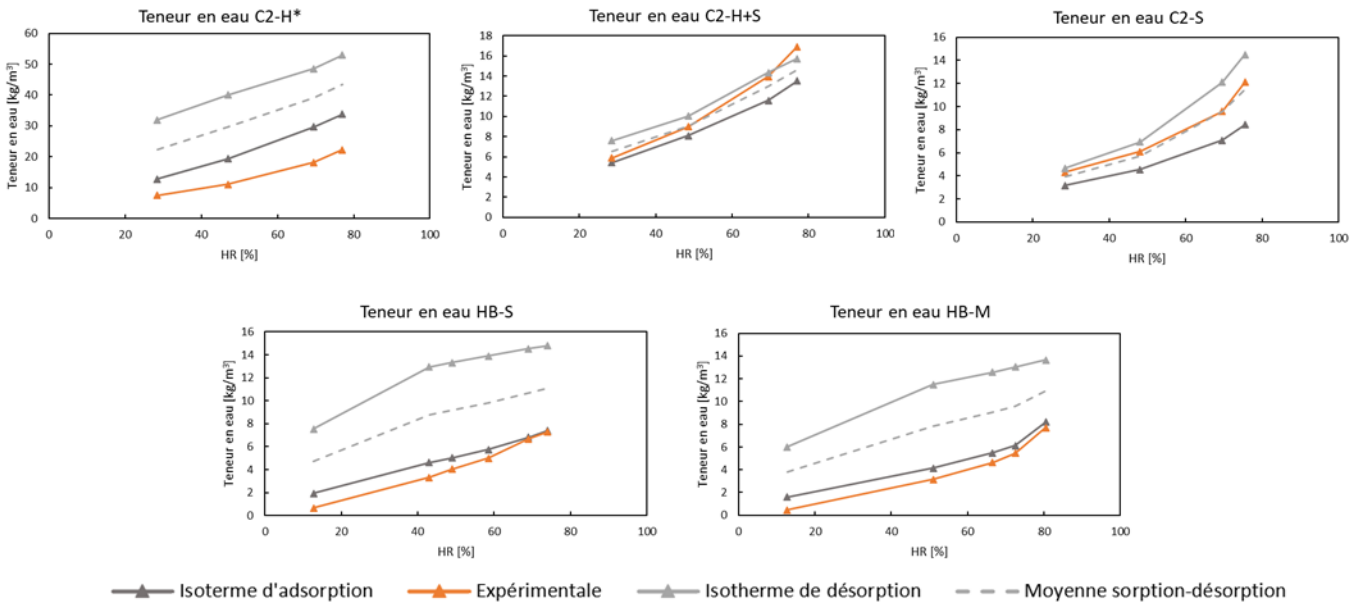


Figure 4.13 - Comparaison de la teneur en eau expérimentale avec la teneur en eau correspondante à la courbe d'adsorption, de désorption et à la moyenne entre les deux.

Les résultats de la **Figure 4.13** sont disparates. Lorsque la teneur en eau expérimentale se rapproche de la moyenne entre adsorption et désorption pour C2-H+S et C2-S, elle est proche de la courbe d'adsorption pour HB-S et HB-M. Cependant, dans le cas de C2-H*, la détermination expérimentale donne des valeurs significativement plus basses que l'adsorption. Par conséquent, la méthode utilisée par Collet & Prétot et par Ouméziane et al. ne peut pas être appliquée de façon généralisée pour les matériaux de cette campagne expérimentale.

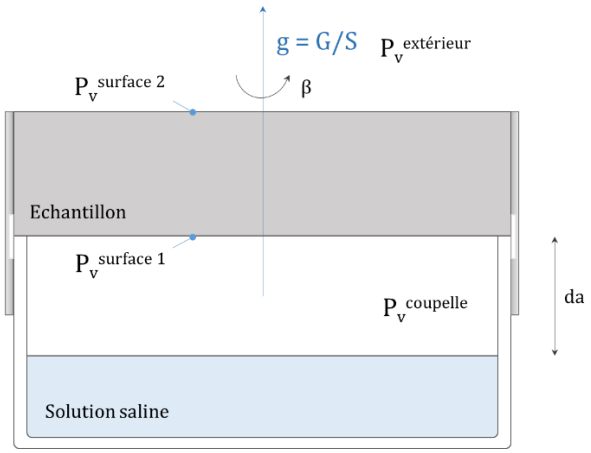


Figure 4.14 - Représentation de la coupelle humide.

Une deuxième approche est de calculer la moyenne entre l'humidité relative à la surface supérieure et inférieure de l'échantillon, qui peuvent être calculées en utilisant la correction β, selon **(4.9)** et **(4.10)** :

$$\frac{G}{S} = \delta_a \frac{P_v^{coupelle} - P_v^{surface\,1}}{da} \tag{4.9}$$

$$\frac{G}{S} = \beta\left(P_v^{surface\,2} - P_v^{extérieur}\right) \tag{4.10}$$

Où G est le flux total d'humidité en [kg/s], S est la surface de l'échantillon en [m^2], δ_a est la perméabilité à la vapeur de l'air en [kg/(m·s·Pa)], da est l'épaisseur de la couche d'air en [m], β est le coefficient de transfert surfacique de la vapeur d'eau en [kg/(m^2·s·Pa)] et $P_v^{coupelle}$, $P_v^{surface\,1}$, $P_v^{surface\,2}$ et $P_v^{extérieur}$ sont les pressions de vapeur représentées dans la **Figure 4.14**.

Ces valeurs seraient plus exactes, car elles reflèteraient les vraies conditions d'humidité aux limites de l'échantillon. La **Figure 4.15** illustre la teneur en eau correspondante à la courbe d'adsorption et de désorption, ainsi celle correspondante à la moyenne des deux, pour la valeur moyenne des humidités de surface.

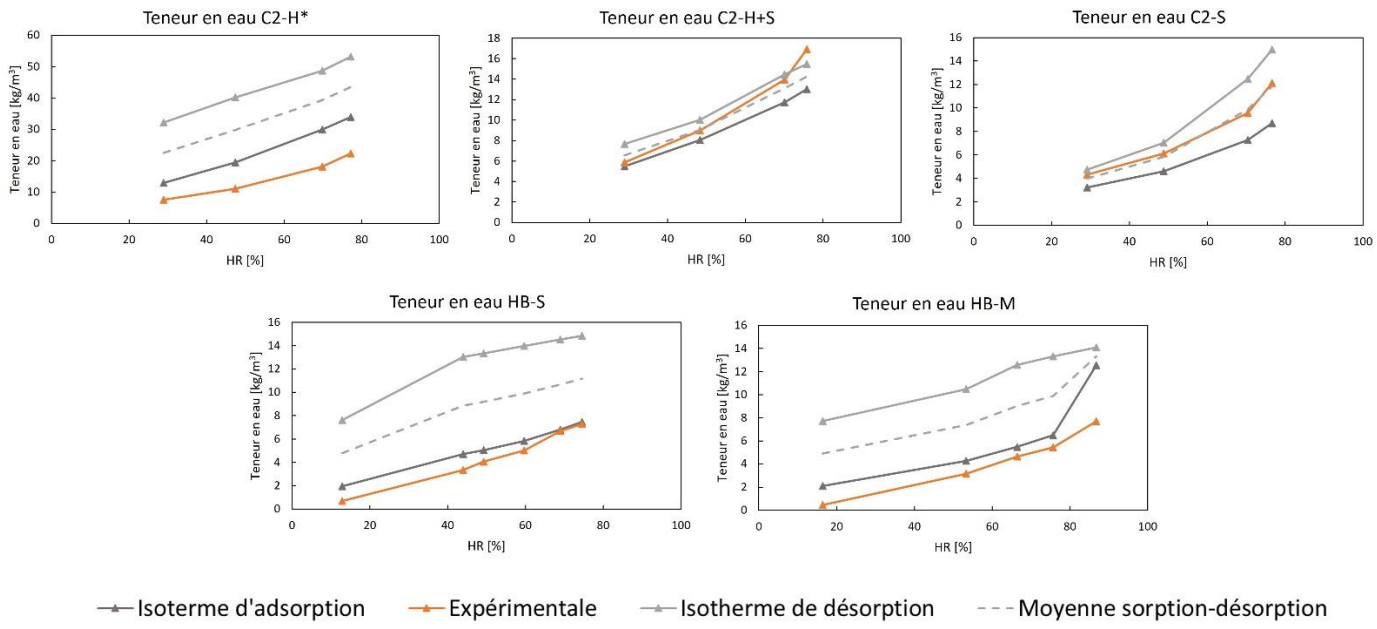


Figure 4.15 - Comparaison de la teneur en eau expérimentale avec la teneur en eau (calculée à partir de la moyenne entre les humidités relatives de surface) correspondante à la courbe d'adsorption, de désorption et à la moyenne entre les deux.

Les différences avec la **Figure 4.13** sont à peine appréciables, les moyennes d'humidité relative à la surface étant très proches des moyennes d'humidité relative dans l'air environnant. Par conséquent, cette démarche, comme la démarche préalable, ne peut pas être appliquée de façon généralisée.

Ces deux méthodes supposent que la pression de vapeur suit une variation linéaire le long de l'épaisseur de l'échantillon, avec des valeurs maximale et minimale qui correspondent aux valeurs de pression de vapeur imposées à l'intérieur et à l'extérieur de la coupelle humide, ou à l'inverse pour la coupelle sèche (ou les P_v de surface calculées grâce à la correction β). Grâce à cette supposition, la valeur moyenne de la teneur en eau, qui est une fonction de la pression de vapeur, peut être calculée comme la teneur en eau correspondante à la moyenne arithmétique des valeurs d'humidité relative aux limites. Pour évaluer la validité de cette supposition, à la fin de l'essai de perméabilité, un échantillon d'épaisseur 6 cm de chaque formulation a été perforé 3 fois sur un même demi-plan vertical, comme le montre la **Figure 4.16**, pour mesurer l'humidité relative au centre de l'échantillon à plusieurs épaisseurs à l'aide d'un capteur ROTRONIC d'humidité et de température. La position A se trouve à 1,5 cm de la surface supérieure, la position B se trouve à 3 cm de la surface supérieure et la position C se trouve à 1,5 cm de la surface inférieure. Le capteur est introduit dans les positions A, B et C, l'une après l'autre.

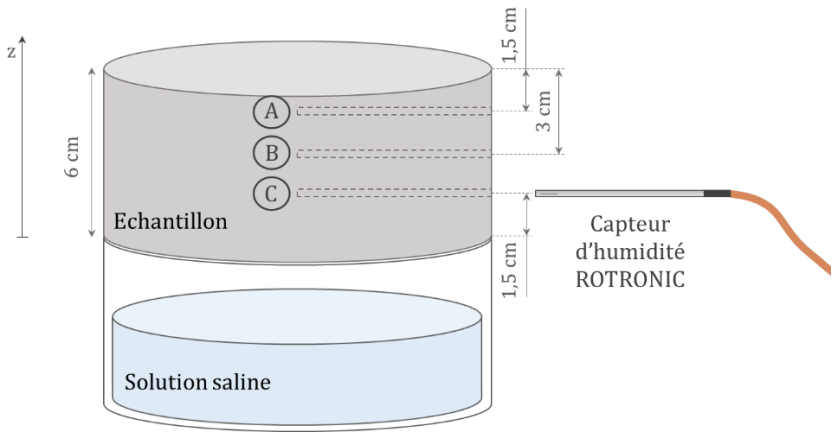


Figure 4.16 - Représentation du dispositif de mesure de la variation verticale de l'humidité relative.

Les résultats de ce dernier essai sont représentés dans la **Figure 4.17**. La valeur d'humidité à z = 0 cm correspond à l'humidité à la surface inferieure calculée par le biais de la correction β, la valeur à z = 1,5 cm correspond à la position C, celle à z = 3 cm correspond à la position B, z = 4,5 cm correspond à la position A et, finalement, z = 6 cm correspond à la valeur d'humidité à la surface supérieure calculée par le biais de la correction β. Pour chaque formulation, un seul couple d'humidité a été sélectionné, à l'exception de HB-S, pour lequel une coupelle sèche et une coupelle humide ont été testées.

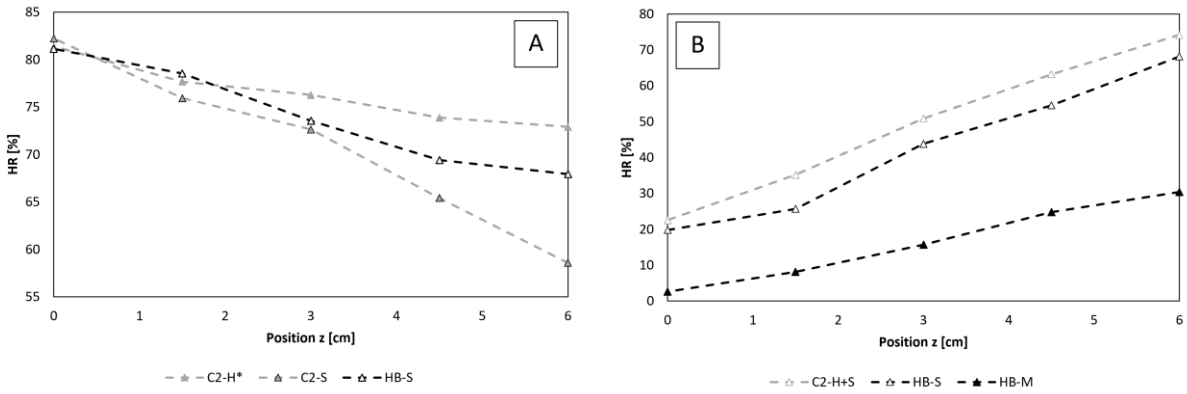


Figure 4.17 - Variation de l'humidité relative selon l'épaisseur des coupelles humides (A) et des coupelles sèches (B).

Pour tous les échantillons testés, la variation de l'humidité selon l'épaisseur est pratiquement linéaire, ce qui valide l'hypothèse qui nous permet de calculer la teneur en eau moyenne de l'échantillon en passant par la moyenne arithmétique des humidités relatives aux limites. D'après les résultats de la **Figure 4.17**, le choix de calculer la moyenne des humidités de surface s'avère plus judicieux que la moyenne des humidités à l'intérieur et à l'extérieur de la coupelle. Bien que l'humidité varie de façon linéaire dans l'axe vertical, une hétérogénéité au niveau de la distribution radiale de l'humidité a été remarquée, le centre de l'échantillon étant plus humide que les bords.

Par conséquent, la teneur en eau expérimentale devrait se trouver entre l'isotherme d'adsorption et l'isotherme de désorption de chaque matériau. L'écart trouvé pour certains matériaux dans la **Figure 4.15** peut être dû au vieillissement des matériaux.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, la variation des propriétés hygrothermiques avec la teneur en eau a été analysée pour des bétons à base de moelle de maïs, de moelle de tournesol et de chanvre. Cette information permet d'enrichir les bases de données existantes et d'alimenter ainsi les modèles de transferts hygrothermiques afin d'améliorer leur prédiction. En effet, les modèles négligent souvent l'influence de l'humidité sur les propriétés des matériaux. Dans la plupart des cas, les essais ont montré une réponse des matériaux très semblable à celle des matériaux de la littérature, cependant, le béton de moelle de tournesol HB-S a montré une sensibilité particulière à l'humidité en ce qui concerne la conductivité thermique et la perméabilité à la vapeur apparente.

Etant donné que l'étude présentée dans ce chapitre a été menée après le chapitre qui concerne la modélisation numérique, les résultats sur la variation de la conductivité, la chaleur spécifique et la perméabilité à la vapeur avec la teneur en eau n'ont pas pu être intégrés dans les simulations qui seront présentées dans le chapitre suivant, mais leur intégration est prévue dans un modèle postérieur à ce projet de thèse. De la même manière, il a été mis en évidence que le transport d'eau liquide, dénommé k_l, a un rôle non négligeable dans les transferts qui ont lieu au sein du matériau. Ce résultat sera également pris en compte dans le futur modèle.

Partie II : Propriétés du béton de moelle et de chanvre à l'échelle de la paroi

Chapitre 5 : Etude numérique des transferts hygrothermiques

Table des matières

5.1 Introduction 178
5.2 Modélisation des transferts hygrothermiques 178
5.2.1 Définition des modèles mathématiques existants 178
5.2.2 Définition du modèle utilisé 181
5.2.3 Définition des conditions aux limites 183
5.2.4 Code de calcul 194
5.3 Validation du modèle 196
5.3.1 Validation numérique 196
5.3.2 Validation expérimentale 201
5.4 Analyse critique et mise en œuvre de la simulation 206
5.4.1 Définition des études de cas 206
5.4.2 Implémentation numérique 211
5.4.3 Résultats et discussion 214
5.5 Conclusion 226

5.1. Introduction

L'impact du couplage entre le transfert d'humidité et le transfert de chaleur, qui est souvent ignoré pour les matériaux de construction classiques tels que le béton et la pierre, peut devenir particulièrement important pour les bétons biosourcés. Afin de quantifier l'ordre de grandeur de couplage en fonction des caractéristiques des matériaux, des assemblages et des sollicitations, un modèle mathématique a été proposé et implémenté dans le code éléments finis *COMSOL Multiphysics*. Ce modèle est inspiré de celui présenté dans la thèse de M.Y. Ferroukhi (Ferroukhi, 2015) et il a été utilisé afin de prédire la réponse hygrothermique de trois ensembles bicouches composés de béton classique et bétons biosourcés en isolation intérieure et soumis à différentes sollicitations intérieures et extérieures.

5.2. Modélisation des transferts hygrothermiques

5.2.1. Définition des modèles mathématiques existants

Comme nous l'avons précédemment évoqué, le milieu poreux dans lequel se produisent les phénomènes hygrothermiques est multiphasique, car il est composé d'un squelette solide et d'un réseau poreux au sein duquel se trouvent les phases fluides (eau liquide, plus ou moins adsorbée sur les parois des pores, vapeur d'eau et air sec). La modélisation hygrothermique repose alors sur le développement des équations de conservation des masses fluides et de l'enthalpie du système.

A titre d'exemple, un certain nombre de modèles hygrothermiques classiquement utilisés et cités dans la littérature sont présentés dans le **Tableau 5.1**, ainsi que dans l'**Annexe F** de façon plus détaillée. Notons que ce tableau n'a pas vocation à présenter l'ensemble des modèles existants. Néanmoins il permet d'identifier les hypothèses classiquement mises en avant afin de bâtir le système d'équations visant à modéliser le couplage hygrothermique.

La première remarque qu'il est possible de formuler suite à l'analyse de ce tableau est que l'approche générale consiste à utiliser les outils de la mécanique et de la thermodynamique des milieux continus (Rebaia Remache, 2011). En d'autres termes, tous les modèles référencés considèrent un milieu homogène équivalent. En effet, l'assimilation des matériaux de construction à des milieux poreux avec une structure microscopique hétérogène rendrait la description des phénomènes physiques très complexe, voire impossible, si toutes les hétérogénéités sont considérées (Daïan, 2013; Mchirgui, 2012). Pour ce faire, deux approches sont classiquement utilisées (Ben Mabrouk, 1999; Ferroukhi, 2015; Soudani, 2016). La première est l'approche dite par homogénéisation et changement d'échelle microscopique-macroscopique ou macroscopisation (notée H dans le **Tableau 5.1**). L'idée est de considérer les phénomènes physiques qui se déroulent à l'échelle microscopique et de quantifier leurs impacts sur les flux macroscopiques par construction d'un milieu homogène équivalent via des techniques

d'homogénéisation spatiale (moyenne, périodique, statistique...) (Ben Mabrouk, 1999). La seconde est une approche phénoménologique macroscopique ou axiomatique (notée P dans le **Tableau 5.1**). Le milieu poreux est alors d'emblée considéré comme un milieu homogène où les principes fondamentaux de la thermodynamique s'appliquent, modélisé comme la superposition de milieux continus, où chaque milieu a sa propre cinématique qui peut interagir avec celle des autres. Les hypothèses les plus communes adoptées dans ces modèles sont les suivantes :

- La phase solide est composée du matériau sec, considéré comme homogène et indéformable i.e. les propriétés sont les mêmes en tout point et ne dépendent pas d'un repère spécifique – cela revient à définir un volume élémentaire représentatif (VER) caractéristique de la matrice poreuse mais assez grand devant l'échelle moléculaire ;
- La phase gazeuse est composée de vapeur d'eau et d'air, considérés comme des gaz parfaits i.e. l'échelle correspond à l'échelle où le résultat du bilan statistique de quantité de mouvement est réalisé sur un nombre suffisant de molécules ;
- La phase liquide est composée d'eau considérée incompressible i.e. le volume est considéré constant quelle que soit la pression subie ;
- La température du matériau reste supérieure à la température du gel de l'eau : sinon il y aurait de nouvelles phases dont il faudrait tenir compte ;
- Les réactions chimiques du matériau sont négligées (milieu non réactif) ;
- L'équilibre thermodynamique local est atteint pour chaque phase, ce qui a pour conséquence de lier la pression de vapeur à la pression d'eau liquide au travers de la loi de Kelvin. Ainsi, malgré la présence de 3 phases fluides (eau liquide, vapeur d'eau et air sec), le système peut se réduire à deux équations de conservation de la masse (par exemple, eau totale et air sec) et une équation de conservation de l'enthalpie.
- L'effet de la gravité sur les transferts de masse est négligé.

Nous repartirons donc également de ces hypothèses afin de bâtir le modèle hygrothermique macroscopique qui sera utilisé dans ce mémoire.

Comme cela a déjà été souligné par (Daïan, 2013; Kazeoui et al., 2014), les différences principales entre les modèles hygrothermiques phénoménologiques référencés sont:

- Les choix du potentiel moteur pour modéliser le transfert d'eau (liquide, vapeur ou total). Suivant les modèles, le potentiel moteur peut être la pression de vapeur, la pression capillaire, l'humidité relative ou la teneur en eau. Selon (Funk & Ghazi Wakili, 2008), quel que soit le choix du potentiel moteur, les résultats obtenus restent similaires car ils sont tous liés entre eux sous l'hypothèse de l'équilibre dynamique local. Cependant, le choix de la teneur en eau en tant que moteur de transfert est discuté. En effet, étant une variable discontinue et indirecte (Künzel, 1995), elle implique des difficultés de résolution notamment dans le cas de paroi multicouche (Qin et al., 2008, 2009). L'**Annexe G** fourni une étude plus

approfondie des différentes causes et influences des transports de masse et de chaleur.

- La manière de calculer le terme associé à la chaleur latente de changement phase.
- La prise en compte de la variabilité des paramètres matériaux avec la température et la teneur en eau.
- La prise en compte ou non des termes d'advection et de convection de chaleur et de masse. A titre d'exemple, la plupart des modèles ne prennent pas en compte le flux d'air engendré par les gradients de pression d'air total au sein du milieu poreux, et donc l'advection de vapeur d'eau qui en résulte.

Tableau 5.1 - Récapitulatif des modèles mathématiques.

Modèle	**Variable de chaleur**	**Variable de masse**	**Approche**		**Phénomènes pris en compte**	**Commentaires**
			P[1]	H[2]		
Philip et De Vries (1957)	T [°C]	Teneur en eau	x		Forces de gravité **Masse** : vapeur d'eau (diffusion moléculaire), écoulement liquide (diffusion) **Chaleur** : conduction et transfert de chaleur latente portée par la vapeur (changement de phase)	Transferts convectif et radiatif négligés à l'extérieur du matériau, ainsi qu'effusion et diffusion mixte (Mchirgui, 2012). L'advection thermique liée au gradient de pression n'est pas considérée. Le cas multicouche est compliqué à traiter. La teneur en eau est une variable discontinue aux limites des couches qui compliquent les calculs (Künzel, 1995). Modèle spécifiquement adapté aux expériences isothermes.
Krischer (1962)	T [°C]	Humidité relative		x	**Masse** : liquide (diffusion capillaire), vapeur, (concentration en vapeur) **Chaleur** : Changement de phase, diffusion	Le modèle de Krischer est une combinaison des modèles Série et Parallèle. La prise en compte de la structure interne par l'intermédiaire d'un paramètre f permet d'estimer l'impact de cette structure sur la conductivité thermique équivalente.
Luikov (1966)	T [°C]	Teneur en eau	x		**Masse** : vapeur (diffusion), écoulement liquide (diffusion), pression **Chaleur** : Changement de phase (introduction d'un nouveau paramètre)	Transferts convectif et radiatif négligés. Pression non négligée mais difficulté de définition des paramètres (Trabelsi, 2010). La teneur en eau est une variable discontinue aux limites des couches qui compliquent les calculs (Künzel, 1995).
Duforestel (1992)	T [°C]	Pression de vapeur	x		**Masse** : stockage, évaporation/condensation, sorption/désorption **Chaleur** : conduction, évaporation, diffusion	Diffusion surfacique, et termes de transport de chaleur sensible négligés. Complexité dans la détermination expérimentale des coefficients de transfert. Seule une petite couche du matériau est affectée par l'humidité de l'air ambiant (Anh Dung Tran Le, 2010).
Kunzel (1995)	T [°C]	Humidité relative	x		**Masse** : vapeur d'eau (diffusion), pression, écoulement liquide (diffusion) et conduction **Chaleur** : conductivité	Modèle fickien qui ne prend pas en compte le phénomène d'adsorption retardée.
Hagentoft et al (2004)	T [°C]	Pression capillaire	x		**Masse** : adsorption, conductivité hydraulique, diffusion et convection **Chaleur** : conduction, convection	Gravité négligée, pas de transfert de liquide sous gradient thermique, pas de transfert radiatif.

[1] Phénoménologique

[2] Homogénéisation

Champs (2007)	T [°C]	Teneur en eau	x		**Masse** : vapeur d'eau (diffusion/convection), liquide (convection), la sorption, l'évaporation (respectivement la condensation) **Chaleur** : la conduction de la chaleur.	Les équations de Champs sont définies à partir des flux de transferts de diffusion, et de convection.
Qin (2009)	T [°C]	Teneur en vapeur d'eau (eq. à HR)		x	**Masse** : Diffusion, évaporation **Chaleur** : conduction, thermogradient, changement de phase	L'idée avec ce modèle est de résoudre les difficultés des modèles de Luikov et Philip et De Vries.
Abahri (2012)	T [°C]	Teneur en eau ET pression totale		x	**Masse** : vapeur (diffusion), écoulement liquide (diffusion), pression **Chaleur** : Changement de phase (introduction d'un nouveau paramètre)	Inspiré de l'approche de Luikov. Ce modèle prend en compte l'advection de vapeur par le transport d'air.

Cette étude bibliographique a permis de mettre en évidence que si un large panel de modèles hygrothermiques existe, ils sont tous basés sur les mêmes concepts physiques fondamentaux, représentés schématiquement dans la **Figure 5.1**. Les différences observées sont principalement dues aux hypothèses simplificatrices et au potentiel moteur pour le transfert d'eau qui sont formulés en fonction du cadre d'application des modèles.

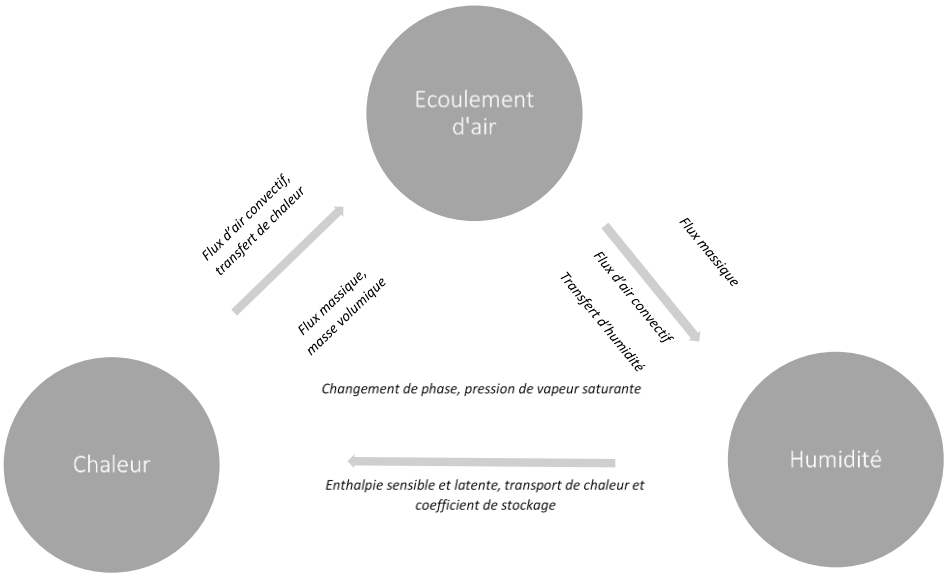


Figure 5.1 - Interactions hygrothermiques inspiré de (Janssens et al., 2008; Tariku et al., 2010).

5.2.2. Définition du modèle utilisé

Sur la base de cette analyse, l'approche retenue dans le cadre de cette thèse a été de s'inspirer du modèle présenté dans la thèse de de M.Y. Ferroukhi (Ferroukhi, 2015) (lui-même basé sur la théorie de Luikov) et de l'adapter en considérant les hypothèses complémentaires suivantes pouvant être formulées compte tenu des matériaux étudiés et des sollicitations considérées. On choisira ainsi la pression de vapeur pour le transfert de

masse et la température pour la chaleur. Le choix de la pression de vapeur comme moteur de transfert d'humidité a été fait pour éviter les discontinuités à l'interface entre matériaux et d'éviter d'introduire des conditions aux limites supplémentaires entre les couches de la paroi. En effet, la température et la pression partielle de vapeur d'eau représentent des variables d'état qui ne dépendent pas de la nature microstructurale du matériau poreux.

Les hypothèses complémentaires utilisées sont les suivantes :

- L'air ambiant est supposé à pression constante et homogène (égale à 100 kPa). Ainsi les transports d'air au sein du réseau poreux ne sont pas considérés dans les équations de conservation. Il en découle que l'advection de vapeur due au transfert d'air n'est pas considérée. En effet, comme cela est discuté en **Annexe H**, ce terme d'advection commence à être important dans le cas où de forts gradients de pression d'air existent au sein du matériau, ce qui est peu probable dans le cas d'un enduit biosourcé rapporté sur un mur quasi-imperméable.
- L'hystérésis entre les phénomènes d'adsorption et de désorption est négligée.
- La variation de la teneur en eau avec la température à humidité relative constante est négligée.
- La masse volumique du gaz est considérée négligeable devant celle de l'eau liquide, ce qui revient notamment à négliger la variation de masse de la vapeur d'eau dans les pores.
- Les transferts de chaleur par radiation sont négligés au sein du matériau.
- Les transferts d'eau liquide dus aux gradients de température à pression de vapeur constante sont négligés. La justification de cette hypothèse est présentée en annexe.

Sur la base de ces hypothèses, ainsi que celles formulées dans **§5.2.1**, les équations de couplage se réduisent au système de deux équations à deux inconnues (P_v et T) suivant :

Bilan massique

$$\xi \times \frac{1}{P_{v,sat}(T)}\left(\frac{\partial P_v}{\partial t}\right) = div\left(k_m\,\vec{\nabla}(P_v)\right) + \gamma\frac{\partial T}{\partial t} \tag{5.1}$$

Bilan de chaleur

$$C_p\,\frac{\partial T}{\partial t} = \mathrm{div}\left(\lambda\,\vec{\nabla}(T)\right) + L_v\,div(\delta_p\,\vec{\nabla}(P_v)) \tag{5.2}$$

Avec $\xi = \rho_{\sec}\frac{\partial u}{\partial HR}$ la pente de la courbe de sorption (en [kg/m^3]), $k_m = \delta_p + k_l{}^*$, le coefficient de perméabilité à l'eau (vapeur + liquide) en [kg/(m·s·Pa)], δ_p étant celui à la vapeur et $k_l{}^*$ celui à l'eau liquide, $\gamma = \xi\frac{P_v}{P_{v,sat}(T)}\frac{L_v}{RT^2}$ le coefficient traduisant la variation de teneur en eau avec la température à pression de vapeur constante en [kg/(m^3·K)] et L_v [J/kg] la chaleur latente de changement de phase.

5.2.3. Définition des conditions aux limites

Dans le **Chapitre 1**, il a été défini les caractéristiques physiques et hygrothermiques des matériaux poreux. Cependant, pour que la modélisation soit représentative, une description précise du milieu environnant et des facteurs entrant en jeu est nécessaire (Feng & Janssen, 2016). A cet effet, (Kalamees et al., 2008) écrivent que dans de nombreux cas, les conditions aux limites peuvent fortement influencer les résultats des simulations hygrothermiques. Ils ajoutent que l'influence des conditions climatiques extérieures et intérieures sur les résultats des simulations hygrothermiques est comparable (parfois même supérieure) à l'influence des propriétés du matériau. En effet, selon (Lozano, 2007) les transferts thermo-hygriques sont la conséquence des déséquilibres thermodynamiques engendrés par le milieu extérieur au matériau.

Les conditions aux limites permettent donc d'intégrer et de mettre en exergue le rapport du matériau à son milieu. Elles permettent de faire le lien entre le niveau microscopique et macroscopique (Ferroukhi, 2015). L'article de (Janssen, Blocken, & Carmeliet, 2007) ajoute que ces sujets sont cruciaux pour approfondir la précision et l'efficacité de la modélisation numérique : la fiabilité des évaluations hygrothermiques des composants du bâtiment ne peut être garantie sans une description complète et précise des phénomènes à l'interface entre les couches.

5.2.3.1. Les conditions aux limites et d'interface dans la littérature

L'analyse des conditions aux limites concerne différentes variables (résumées sur la **Figure 5.2**) parmi lesquelles les flux convectifs, la taille de l'échantillon (Woloszyn et al., 2006), le rayonnement (Künzel, 1995), l'impact de la pluie ou du vent sur la paroi (Abuku et al., 2008; H. Hens, 2008), ou encore l'occupation des habitants (Kalamees et al., 2008). D'autre part, des conditions de symétrie, d'axisymétrie, de pression constante ou encore de conditions périodiques ou cycliques peuvent être étudiées.

Les équations des conditions aux limites sont explicitées dans les paragraphes ci-dessous. Dans un premier temps les facteurs extérieurs entrant en jeu sont listés, puis les facteurs intérieurs et pour finir ceux à l'interface entre couches dans le cas d'une paroi multicouche.

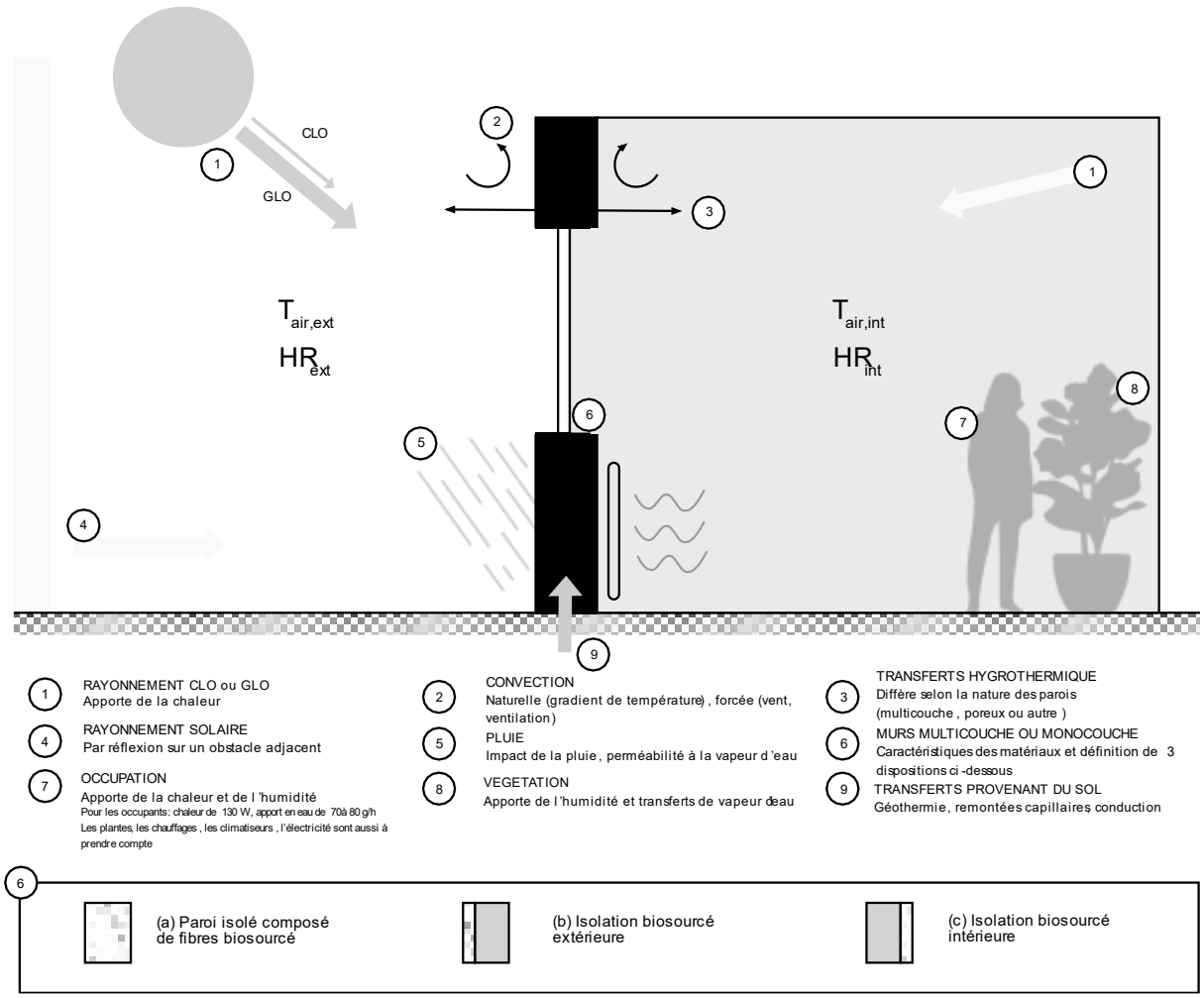


Figure 5.2 - Caractérisation des paramètres entrant en jeu et des transferts au sein d'une paroi, figure inspirée de (Ferroukhi, 2015; Lelièvre, 2015; Qin et al., 2006).

Pour compléter cette image, un schéma de l'ensemble des composantes de l'équilibre thermique sur une surface opaque a été défini :

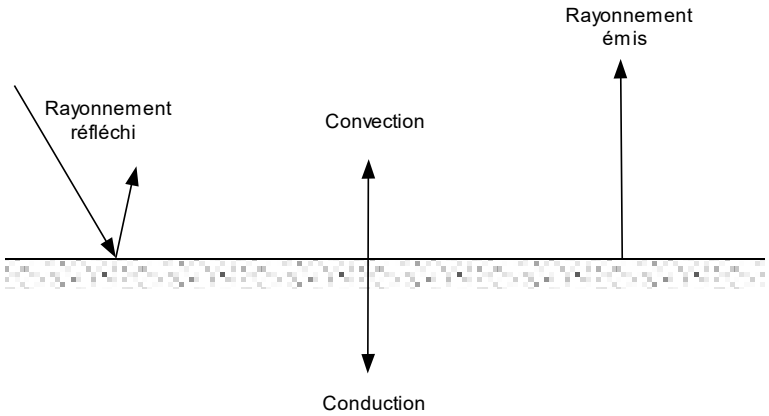


Figure 5.3 - Composantes de l'équilibre thermique sur une paroi.

Ces composantes correspondent aux phénomènes de transports de chaleur et de masse au niveau de la paroi. Dans sa thèse (Samri, 2008) dresse une description plus détaillée

de l'ensemble de ces phénomènes : convection (de masse ou de chaleur) due à des gradients de pression ou de température, rayonnement CLO (courte longueur d'onde) ou GLO (grande longueur d'onde), conduction (phase solide, liquide ou gazeux), évaporation-condensation, diffusion de la vapeur d'eau.

5.2.3.1.1. Facteurs extérieurs

Plusieurs auteurs se sont penchés sur la création de bases de données ou de méthodes pour définir les caractéristiques climatiques. En effet, les bilans d'humidité et thermique sur la surface externe sont principalement constitués de ces variables (précipitations, échange de vapeur, échange de chaleur convectif, transfert de chaleur dû aux précipitations, rayonnement). Il est donc important de savoir les quantifier. (Sanders, 2008) ajoute qu'avec le changement climatique les statistiques du climat passé sont plus compliquées à utiliser et à analyser. Il est désormais généralement admis que le climat de la Terre évolue plus rapidement que jamais (GIEC, 2019b, 2019a). Le sujet de création de base de données est donc d'actualité.

Les variables entrant ici en jeu ont été restreintes à : la pluie, le vent et le rayonnement, certaines pouvant être couplés (cas de la pluie et du vent).

La pluie

La pluie est l'une des sources d'humidité les plus importantes pour les façades des bâtiments et est donc une préoccupation en science du bâtiment[3]. Voici quelques auteurs qui étudient le sujet :

- (Janssen, Blocken, & Carmeliet, 2007) définissent les paramètres pouvant impacter la réponse des composants du bâtiment par rapport à la pluie ou le vent. Parmi ces paramètres il y a, les caractéristiques géométriques du bâtiment, la topographie de l'environnement, la position sur le bâtiment, la vitesse du vent, la direction du vent, les précipitations horizontales et la distribution de la taille des gouttes de pluie ;
- L'article de (Abuku et al., 2008) dans l'Annex 41 de l'IEA cite différentes études sur l'impact des gouttes d'eau poussées par le vent sur les murs (diamètres, vitesses d'impact, angles d'impact). Ce phénomène est noté WDR pour « Wind-driven rain ». Parmi ces études il y a (Abuku et al., 2009; Blocken & Carmeliet, 2004; Choi, 1993; H. Hens, 2008; Sanders, 1996). Ce paramètre est selon (Abuku et al., 2008) une condition aux limites si compliquée que lors de simulation numérique elle est souvent simplifiée[4] sous forme de flux d'humidité moyenné dans l'espace et le temps (C. E. Hagentoft et al., 2004; Künzel, 1994) ;

[3] L'humidité dans les enveloppes du bâtiment est une problématique récurrente du fait des pathologies qui peuvent en découler.

[4] (Abuku et al., 2008) expliquent que cette approche est trop loin de la réalité. Elle peut conduire à une différence significative entre le modèle et la réalité.

- (Blocken & Carmeliet, 2004) quant à eux proposent trois catégories de méthodes pour la quantification des charges de pluie induites par le vent : les mesures, les formules semi-empiriques et les méthodes de simulation numérique basées sur la CFD (Computational Fluid Dynamics). Leur analyse est basée sur la caractérisation selon six paramètres spécifiques : la géométrie du bâtiment, la position du vent sur la façade, la vitesse de référence du vent, la direction de référence du vent, ainsi que la pluie portée par le vent et la distribution des gouttes (James, 2009) ;
- Dans son mémoire, (Kabore, 2020) étudie quant à elle, les performances d'une paroi de béton de chanvre. A cet effet, elle expose les impacts de différents facteurs environnant sur la surface extérieure ; notamment les taux d'infiltrations, les fractions de pluie battante ou encore les fractions solaires de la paroi. Différents cas sont étudiés selon les matériaux et la région. Cette étude est réalisée principalement à l'aide du logiciel WUFI.

Selon (Janssen, Blocken, Roels, et al., 2007) et (Blocken & Carmeliet, 2004), le transfert de chaleur sensible et d'humidité dû aux précipitations est composé de la pluie transportée par la composante horizontale du vent (WDR) noté R_{vent}, et de la pluie « horizontale » noté R_{pluie} (Ferroukhi, 2015). Les équations sont alors de la forme :

$$R_{pluie\ globale} = R_{pluie} \cos(\beta_h) + R_{vent} \tag{5.3}$$

$$R_{vent} = \alpha\left(R_{pluie}, U, \theta_{angle}, \varphi_{angle}\right) \cdot R_{pluie} \cdot U \tag{5.4}$$

$$R_{vent} = \alpha\left(R_{pluie} \cdot U \cdot \cos\left(\theta_{angle} - \varphi_{angle}\right)\right) \cdot R_{pluie} \cdot U \cdot \cos\left(\theta_{angle} - \varphi_{angle}\right) \tag{5.5}$$

Avec :

β_h Angle d'inclinaison de la paroi par rapport au plan horizontal [°]
α Coefficient traduisant le transport de la pluie par le vent [s/m]
U Vitesse de référence du vent [m/s]
θ_{angle} Direction du vent par rapport au nord [°]
φ_{angle} Orientation du bâtiment par rapport au nord [°]

Dans son article de l'Annex 41, (Sanders, 2008) explicite la formulation de R_{vent} telle que :

$$R_{vent} = \frac{2}{9} \sum U \cdot r^{\frac{8}{9}} \cdot \cos(\theta_{angle} - \varphi_{angle}) \tag{5.6}$$

Avec :

r Taux de pluie tombée [mm/h]

La somme correspond à toutes les occasions où $\theta_{angle} - \varphi_{angle}$ est positif. Dans l'article de (Sanders, 2008), l'auteur explique qu'il n'est pas possible de calculer l'indice complet mais que l'on peut poser l'hypothèse que les directions ne changent que peu selon les saisons. Il est alors possible de définir une valeur représentative qui ne varie pas.

Le vent

L'humidité et le transfert de chaleur sur les surfaces externes sont dominés par la convection forcée due au vent et dépendent ainsi fortement de la vitesse locale de l'air (Janssen, Blocken, & Carmeliet, 2007). Il est donc important de réussir à caractériser l'effet du vent sur les parois d'un bâtiment (Bouketta & Bouchahm, 2012). A cet effet plusieurs études ont été réalisées parmi lesquelles :

- (Flamand, 2003) qui explicite les conséquences des champs de vitesse et ainsi des pressions aérodynamiques fluctuantes sur les constructions. Pour ce faire, l'auteur expose des approches théoriques ainsi que des possibilités de modélisations du vent sur les parois. Il expose notamment la formule suivante qui caractérise le coefficient de pression $C_P(t)$ généralement indépendant de la vitesse du vent et caractéristique de la construction considérée.

$$C_P(t) = \frac{P(t)}{q_{ref}} \tag{5.7}$$

  Avec P la pression (Pa) et q_{ref} la pression dynamique de référence choisie (Pa). Des recherches plus spécifiques ont été élaborées sur ce même sujet mais pour des façades double-peau (Lou et al., 2012).
- La création de bases de données horaires contenant des données sur la moyenne pondérée des vents et de pluie a été exposé dans les articles de (Janssen, Blocken, Roels, et al., 2007) et (Blocken et al., 2007).
- (Azirian, 2017) propose d'étudier les critères de résistance, de confort du bâtiment par rapport aux vitesses critiques du vent. L'objectif de sa thèse est de caractériser la réponse de la structure face aux phénomènes venteux, pour ensuite définir la forme optimale du bâtiment. D'autres auteurs se sont penchés sur le même sujet. Parmi eux, on peut notamment citer (Bouketta & Bouchahm, 2012). A l'échelle de la paroi cela permet par la suite de diminuer les effets des WDR « wind-driven rain ».
- Dans sa thèse (Anh Dung Tran Le, 2010) mène une analyse des transferts de chaleur et de masse sur les matériaux biosourcés. En ce sens, il étudie notamment la valeur du coefficient de convection.

Le vent implique de la convection pour les échanges de vapeur d'eau mais aussi pour les échanges de chaleur. Ces échanges correspondent au phénomène de convection qui peut être écrit à partir de la loi de Newton sous la forme suivante :

$$\Phi = h_c\,(T_f - T_{surf}) \tag{5.8}$$

Cette équation est ensuite adaptée aux flux de vapeur d'eau et de chaleur tel que (Ferroukhi, 2015) :

$$\Phi_{conv\,chaleur} = h_c\,(T_{air} - T_{surf}) \tag{5.9}$$

$$\Phi_{conv\,vapeur} = h_m\,(P_{v,air} - P_{v,surf}) \tag{5.10}$$

Avec

Φ Flux échangé entre la surface et le fluide [W] ou [kg/m²·s]
T_f Température du fluide [K]
T_{surf} Température de surface [K]
T_{air} Température de l'air [K]
h_c Coefficient d'échange superficiel de chaleur [W/m²·K]
h_m Coefficient d'échange superficiel de masse [kg/(m²·s·Pa)]
$P_{v,air}$ Pression de vapeur d'eau de l'air (extérieur ou intérieur) [Pa]
$P_{v,surf}$ Pression de vapeur de la surface de la paroi (intérieure ou extérieure) [Pa]

En outre, et pour plus de précision, il y aura la possibilité de définir les coefficients d'échange superficiel massique et de chaleur en fonction de la vitesse du vent (Fraine, et al., 2019) tel que :

$$h_{c,int} = 2{,}8 + 3\, v_{air,int} \tag{5.11}$$

$$h_{c,ext} = 2{,}8 + 3\, U \tag{5.12}$$

Avec :

U Vitesse de référence du vent [m/s]
$v_{air,int}$ Vitesse de l'air intérieur [m/s]

(Ferroukhi, 2016) écrit en outre, pour le coefficient d'échange superficiel de masse :

$$h_{m,int/ext} = 7 \cdot 10^{-9}\, h_{c,int/ext} \tag{5.13}$$

Le rayonnement

Avec le réchauffement climatique, l'utilisation de l'énergie solaire pour les bâtiments devient plus récurrente. En ce sens des bases de données sont créées, pour recenser les heures de jour, ou les taux de rayonnement solaire direct et diffus (Janssen, Blocken, & Carmeliet, 2007). Des chercheurs se sont ensuite penchés sur l'optimisation de cette énergie renouvelable dans le bâtiment. Pour ce faire, il existe de nombreux logiciels visant à l'utilisation rationnelle du solaire dans les bâtiments (Bennouna & Zrikem, 2007). Voici quelques auteurs qui ont étudié l'impact du rayonnement solaire sur les bâtiments :

- Tout comme dans le cas de la pluie et du vent, certaines géométries sont plus à même de capter la lumière. Ainsi, (Vermeulen, 2014) décrit dans sa thèse dans quelle mesure optimiser les formes du bâtiment. D'autres auteurs peuvent également être cités à ce sujet comme : (Buffington & Skinner, 1980; Knowles & Berry, 1980; Robinson & Stone, 2004) ou encore (Montavon, 2010).
- Le rayonnement solaire peut être direct ou indirect selon l'environnement autour du bâtiment. Dans leur article, (Danks et al., 2016) expose une évaluation de la lumière indirecte réfléchie par les façades. Ils y développent une méthode pour répondre à la question « Comment les réflexions de mon bâtiment affectent ses voisins ? » à partir de critères bien définis. En ce qui concerne l'impact thermique

de ces réflexions sur les matériaux du bâtiment, ils spécifient que la question n'a été que peu étudiée si ce n'est pour la sécurité incendie.

- Dans le paragraphe pour la pluie (Kabore, 2020) étudie les taux d'infiltrations et de fractions de pluie battante mais aussi les fractions solaires à l'aide du logiciel WUFI.
- Dans leur article, (Taylor & Luther, 2004) ont cherché à expliciter les phénomènes de flux de chaleur à travers un mur en pisé. A cet effet une étude du rayonnement diffus du ciel sur les parois a été élaborée.
- (Martínez-Garrido et al., 2014) ont proposé une analyse des effets du rayonnement solaire et de l'humidité sur les bâtiments historiques. En effet, du fait du grand nombre de restauration sur ces bâtiments, l'impact des conditions extérieures est plus complexe que sur un bâtiment moderne. Les effets du climat sur la structure d'un bâtiment peuvent difficilement être compris sans connaître son histoire de construction. Les auteurs utilisent donc un réseau sans fil de capteurs pour analyser l'impact de ces conditions sur des murs de bâtiments du XIIe siècle.

Tout comme pour le vent et la pluie, le rayonnement à la surface extérieure est défini par une équation. Elle est de la forme suivante (Ferroukhi, 2015; Janssen, Blocken, & Carmeliet, 2007) :

$$S_{ext} = \kappa\left(S_{dir} + S_{dif}\right) + \sigma'\varepsilon'\left(F_{sol}\left(T_{sol}^4 - T_{surf,ext}^4\right) + F_{ciel}\left(T_{ciel}^4 - T_{surf,ext}^4\right)\right) \tag{5.14}$$

Avec :

S_{ext}	Echange de chaleur par radiation externe [W/m^2]
κ	Coefficient d'absorption solaire [-]
S_{dir}	Echange de chaleur par radiation directe [W/m^2]
S_{dif}	Echange de chaleur par radiation diffuse [W/m^2]
σ'	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m^2·K^4]
ε'	Emissivité de grande longueur d'onde de la surface [-]
T_{ciel}	Température du ciel [K]
T_{sol}	Température du sol [K]
$T_{surf,ext}$	Température de la surface extérieure [K]
F_{sol}	Facteur de forme du sol [-]
F_{ciel}	Facteur de forme du ciel [-]

5.2.3.1.2. Facteurs intérieurs

Si les conditions aux limites sur les surfaces extérieures et les interfaces sont importantes, il ne faut cependant pas négliger les conditions aux limites au niveau des surfaces intérieures. En effet, ce sont les surfaces qui ont le plus d'impact sur le confort et la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment. Or, la définition de ces conditions est assez

complexe. Selon le type d'occupation (bureau, logement, etc.) et la configuration architecturale[5], les apports énergétiques ne sont pas les mêmes.

(Kalamees et al., 2008) ont mené une étude, publiée dans l'Annex 41, pendant un an sur les conditions intérieures de 125 appartements et 13 logements finlandais et estoniens (climat froid). L'objectif était de comprendre comment la ventilation, la géométrie globale (orientation, logement urbain ou rural) et les différentes occupations influencent les surfaces intérieures. Kalamees a écrit deux autres articles sur le sujet (Kalamees, 2006) et (Kalamees et al., 2007).

(Karlsson & Moshfegh, 2006) ont quant à eux écrit un article de simulation énergétique CFD (Computational Fluid Dynamics) pour relier les conditions aux limites et le climat intérieur. L'objectif final était l'optimisation énergétique d'un bâtiment. D'autres auteurs, comme (Van Der Linden et al., 2002) se sont penchés sur le lien entre le climat intérieur et le confort humain. Le projet dont ils font partie redéfinit les critères de confort et développe de nouveaux instruments de conception et d'évaluation du climat intérieur ; et donc des conditions aux limites intérieures.

(Anh Dung Tran Le, 2010) propose quant à lui une explicitation de la formule pour la définition du rayonnement intérieur. Ce rayonnement dû aux grandes longueurs d'ondes correspond à l'ensemble des flux transmis (par une fenêtre) et émis (par les murs de la pièce) (Ferroukhi, 2015). Il prend la forme suivante :

$$S_{int} = \sqrt{\frac{\sigma'(T_{surf,int}^4 - T_{mur}^4)}{\frac{1-\varepsilon'_{surf}}{\varepsilon'_{surf}.S_{surf}} + \frac{1-\varepsilon'_{mur}}{\varepsilon'_{mur}.S_{mur}} + \frac{1}{F_{surf-mur}.S_{surf}}}} \tag{5.15}$$

Avec :

S_{int}	Rayonnement de la surface intérieure étudiée [W/m^2]
S_{surf}	Rayonnement de grande longueur d'onde entre la surface intérieure et les autres murs de la pièce [W/m^2]
σ'	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m^2·K^4]
$T_{surf,int}$	Température de la surface intérieure de la paroi [K]
T_{mur}	Température de surface des autres murs [K]
ε'	Emissivité du matériau [-]
F	Facteur de forme [-]

[5] L'architecture diffère selon les pays et les régions. Ainsi par exemple au Salvador, les maisons n'ont pas de vitres et sont en majorité sur un étage. Au Danemark ou en Finlande, les fenêtres n'ont généralement pas de volets. La différence entre les architectures urbaines et rurales influent grandement sur les réponses énergétiques des bâtiments.

5.2.3.1.3. Phénomènes à l'interface entre deux couches successives de matériaux

La **Figure 5.2** donne différentes configurations pour l'utilisation d'un matériau biosourcé en isolation sur/dans une paroi. En rentrant davantage dans le détail, il est possible d'ajouter une classification selon le type d'interface entre les couches. (De Freitas et al., 1996) les définissent selon les 3 cas suivants : le contact hydraulique, le contact naturel et le « non-contact » avec la lame d'air (cf. **Figure 5.4**) (Ferroukhi, 2015; Lelièvre, 2015; Rouquerol et al., 1994; Anh Dung Tran Le, 2010).

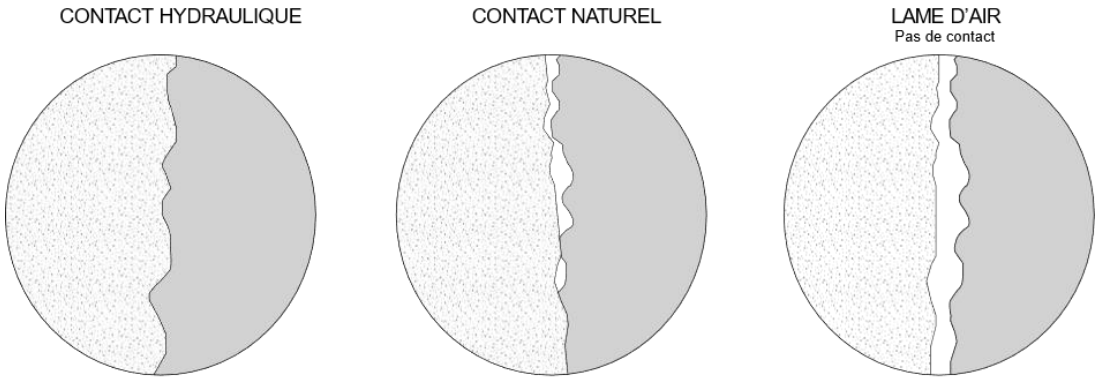


Figure 5.4 - Contact à l'interface entre deux couches. Illustration inspirée de (De Freitas et al., 1996; Ferroukhi, 2015).

Table 1 - Equation des interfaces multicouches.

Type de contact	Contact hydraulique	Contact naturel	Lame d'air
Description	Le contact entre les deux matériaux est interpénétré (contact parfait) la continuité est supposée assurée des flux thermique et hydrique au niveau de l'interface	Les deux matériaux sont considérés en contact sans interpénétration. Dans ce cas la conservation du flux thermique à l'interface est maintenue. En revanche pour le transfert hydrique, le flux hydrique est exprimé en fonction d'une résistance hydrique.	Quand une lame d'air est supposée entre les deux matériaux, la continuité n'est plus assurée ni pour le transfert thermique ni hydrique, le flux hydrique et le flux thermique sont :
Conditions aux limites	$T_1^{interface} = T_2^{interface}$ $P_{v,1}^{interface} = P_{v,2}^{interface}$	$T_1^{interface} = T_2^{interface}$	/
Définition des flux hydriques $J_{interface}$ et thermiques $q_{interface}$	/	$J_{interface} = \frac{HR_1^{interface} - HR_2^{interface}}{R_{hydrique}}$	$J_{interface} = \frac{HR_1^{interface} - HR_2^{interface}}{R_{hydrique}}$ $q_{interface} = \frac{T_1^{interface} - T_2^{interface}}{R_{thermique}}$

(Lelièvre, 2015) explique que dans le cas d'une paroi multicouche, différentes hypothèses peuvent être retenues pour définir les conditions aux limites à l'interface entre deux couches. Il cite notamment (Prommas, 2011), qui considère une continuité de la pression capillaire, et (Johannesson & Janz, 2009) qui modélise le flux de vapeur à

l'interface. Il suppose en outre, la perméabilité locale à la vapeur d'eau égale à celle de l'air ; ainsi que le flux d'eau liquide négligeable.

Parmi les autres hypothèses aux interfaces, on trouve également la continuité de la température aux différentes interfaces (El Sawalhi, 2015; Qin et al., 2009) et la continuité des distributions de vapeur est continue aux interfaces (Qin et al., 2009). Dans sa thèse (Ferroukhi, 2015) ajoute qu'à l'interface entre deux matériaux ayant une microstructure différente, une discontinuité de flux hydrique est observée. Cela implique que l'utilisation de la teneur en eau comme moteur de transfert n'est pas pertinente car elle est discontinue. Cette caractéristique de la variable de la teneur en eau a également été constatée pour les modèles mathématiques de Luikov et Philip et De Vries (cf. **Annexe F**) (Qin et al., 2008, 2009).

5.2.3.2. Conclusion sur le choix de la formulation des conditions aux limites

Comme cela a été spécifié plus avant, la définition des conditions aux limites est une étape clé pour la modélisation des transferts de masse et de chaleur dans les parois (Feng & Janssen, 2016; Ferroukhi, 2015; Janssen, Blocken, & Carmeliet, 2007; Lozano, 2007). C'est pourquoi il est important de savoir concilier la volonté de précision, les hypothèses simplificatrices et la cohérence de la simulation.

(M. Steeman et al., 2010) explique par exemple que dans certains cas, l'influence des conditions aux limites non isothermes peut ne pas être négligeable : comme dans les bâtiments historiques avec une construction mal ou non isolée, dans des situations avec des températures en évolution libre, pour calculer la protection contre l'humidité dans les plafonds refroidis en gypse, etc. L'article de (Defraeye et al., 2012) explique quant à lui, que la sensibilité aux limites convectives peut être limitée dans certains cas (chargement hygroscopique). Il est alors nécessaire d'utiliser un modèle conjugué, plus compliqué à mettre en œuvre. Or l'ajout de complexité peut être source d'incertitudes supplémentaires.

L'analyse de l'environnement de la paroi dans sa globalité est donc nécessaire pour assurer une cohérence entre la modélisation et la réalité. L'idée est de définir des hypothèses assez précises pour représenter les phénomènes réels tout en optimisant les méthodes de calculs à l'aide de simplifications réfléchies et cohérentes.

Sur cette base, après avoir analysé en détail les études sur le sujet des conditions aux limites, il a fallu choisir la formulation la plus pertinente au regard de la modélisation. Les hypothèses posées ont donc été les suivantes :

- Conditions intérieures de température et d'humidité variables.
- Conditions climatiques extérieures variables dont : la vitesse du vent, la température de l'air, la température du ciel (pour le calcul du rayonnement).

- L'effet de la pluie n'est pas pris en compte du fait de la basse perméabilité à l'eau liquide du béton classique, ce qui rend très improbable que l'eau de pluie arrive jusqu'à l'interface entre le béton classique et le béton biosourcé. De plus, étant donné que le béton a une très grande conductivité thermique, on considère que l'augmentation de sa conductivité apparente à cause de la pluie serait également négligeable.
- Pour le rayonnement, le terme d'absorption solaire $\kappa(S_{dir} + S_{dif})$ a été négligé car le coefficient d'absorption solaire κ n'a pas pu être déterminé expérimentalement et parce que l'on considère qu'il est négligeable pour les matériaux biosourcés.
- La température du sol T_{sol} est supposée égale à la température extérieure (Cordeiro Mendoça, 2004).
- Le facteur de forme du sol et du ciel sont supposés égales à 0,2, qui est la valeur la plus utilisée dans le bâtiment :

$$F_{sol} = F_{ciel} = 0{,}2$$

Finalement les équations de flux pour les conditions aux limites s'écrivent sous la forme suivante :

Pour la surface intérieure

$$k_m \vec{\nabla}(P_v) \cdot \vec{n} = h_{m,int}(P_{v,int} - P_v) \tag{5.16}$$

$$\left(\lambda \vec{\nabla}(T) + L_v \, \delta_p \vec{\nabla}(P_v)\right) \cdot \vec{n} = h_{c,int}(T_{int} - T) + L_v \, h_{m,int}(P_{v,int} - P_v) \tag{5.17}$$

Pour la surface extérieure

$$\begin{gathered}\left(\lambda \vec{\nabla}(T) + L_v \, \delta_p \vec{\nabla}(P_v)\right) \cdot \vec{n} = h_{c,ext}(T_{ext} - T) + \\ \sigma' \varepsilon' \left(F_{sol}(T_{sol}^4 - T_{surf,ext}^4) + F_{ciel}(T_{ciel}^4 - T_{surf,ext}^4)\right) \\ + L_v \, h_{m,ext}(P_{v,ext} - P_v)\end{gathered} \tag{5.18}$$

$$k_m \vec{\nabla}(P_v) \cdot \vec{n} = h_{m,ext}(P_{v,ext} - P_v) \tag{5.19}$$

Avec :

k_m	Perméabilité totale en humidité [kg/(m·s·Pa)]
λ	Conductivité thermique [W/(m·K)]
T_{sol}	Température du sol ou de la surface extérieure [K]
$T_{surf,ext}$	Température de la surface extérieure [K]
ε'	Emissivité du matériau [-]
F	Facteur de forme [-]
κ	Coefficient d'absorption solaire [-]
σ'	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m^{2}K^4]
h_c	Coefficient d'échange superficiel de chaleur [W/m^2·K]
h_m	Coefficient d'échange superficiel de masse [kg/(m^2·s·Pa)]
$\vec{n}$	Vecteur normal unitaire sortant à la surface

Les coefficients d'échange superficiel de chaleur h_c retenus sont égaux à 2,8+3·U(t) W/m²·K à l'extérieur selon la formule **(5.12)** et à 4 W/m²·K à l'intérieur.

5.2.4. Code de calcul

5.2.4.1. Historique et modélisation hygrothermique

Les premières modélisations de consommation énergétique datent des années cinquante. Cependant, presque aucun modèle ne quantifiait alors les bilans d'air et d'humidité du bâtiment. Au lieu de cela il y avait des estimations approximatives de l'infiltration et de la ventilation, et l'humidité n'était pas modifiée. Dans les années soixante, quelques outils d'évaluation simples[6] sont devenus populaires. Ils ont permis de redéfinir le rapport à l'humidité en la catégorisant selon deux modes de transport en régime permanent - le flux de chaleur par conduction et le flux de vapeur d'eau par diffusion (Hens, 2008). C'est à cette même période que les modèles de Philip et De Vries (Philip & De Vries, 1957) et Luikov (Luikov, 1966) ont été élaborés et popularisés. Aujourd'hui, malgré les évolutions dans ce domaine, aucun logiciel seul ne permet une approche complète des phénomènes de couplage thermiques et massiques dans un bâtiment.

Les logiciels de modélisation énergétiques peuvent être classés selon deux types. Le premier type sont les logiciels à l'échelle du bâtiment. Il existe plusieurs logiciels permettant la simulation énergétique complète d'un bâtiment comme Wufi+, DOMUS, TRNSYS, EnergyPlus, IDA ICE ou CONTAM. Les transferts à l'échelle de la paroi y sont cependant mal représentés car trop simplifiés (Ferroukhi, 2015). Le deuxième type sont les logiciels à l'échelle du matériau (notés HAM – Heat Air and Moisture). Ils traitent spécifiquement les évolutions hygrothermiques dans le matériau. Les données sur le climat environnant et la performance globale à l'échelle du bâtiment sont manquantes (Dubois & Lebeau, 2014; H. Hens, 2008).

Pour obtenir une modélisation plus précise à l'échelle du bâtiment, un couplage entre ces logiciels est donc souvent réalisé (van Schijndel, 2009). Parfois, un troisième logiciel est ajouté, permettant de faire le lien entre l'échelle du bâtiment et l'échelle de la paroi (cf. **Tableau 5.2**).

[6] La méthode Glaser par exemple : un modèle de calcul statique permettant d'évaluer le risque de condensation à l'intérieur d'une paroi multicouche.

Tableau 5.2 - Les trois types de logiciels pour la modélisation hygrothermique.

Type de logiciel	**Un logiciel (BES) Building Energy Simulation**	**Un logiciel (HAM) Heat Air and Moisture**	**Un outil intégrateur**
Echelle étudiée	Bâtiment	Paroi	Lie les logiciels HAM et BES. Le logiciel MATLAB et son environnement SIMULINK sont les plus utilisés.
Description	Il est capable de définir les bilans de zone, et de simuler la performance énergétique d'un bâtiment entier (M. Steeman et al., 2010).	Il décrit l'évolution des transferts dans les matériaux et paroi du bâtiment (Dubois & Lebeau, 2014).	Il réalise les bilans de zone (Dubois & Lebeau, 2014), compare les résultats (Kazeoui et al., 2014), et résout par la méthode des différences finies les équations (Aghahadi, 2019).

Actuellement ce type de couplage, aussi noté HAM-BES est le couplage le plus opérationnel (Ferroukhi, 2015; Q. Li et al., 2009; H. J. Steeman et al., 2009; M. Steeman et al., 2010).

Parmi les couplages possibles, deux catégories peuvent être définies (H. J. Steeman et al., 2009). La première catégorie est le couplage direct, qui consiste à l'implémentation complète du modèle de transfert hygrothermique du bâtiment (paroi et ambiance) sur un seul outil de simulation où les deux modèles HAM et BES sont résolus au même pas de temps avec le même solveur. Ils résolvent à la fois le domaine fluide et le domaine des matériaux poreux (M. Steeman et al., 2010). La deuxième catégorie est le couplage indirect, une procédure de co-simulation de deux outils où la résolution des deux modèles est entreprise séparément avec un échange de données pour chaque pas de temps.

Dans le cadre d'un projet collaboratif de l'Agence Internationale de l'Energie (Janssens et al., 2008), un tableau recensant l'ensemble des logiciels de simulation a été élaboré. Chaque logiciel est capable de représenter l'évolution dynamique de la température intérieure et de l'humidité relative influencée par le climat extérieur variable et les charges hygrothermiques, y compris l'effet de la protection contre l'humidité par les matériaux intérieurs. Cependant, comme cela a été spécifié plus haut, ces logiciels sont confrontés à au moins une limitation qui ne peut pas être résolue par l'outil lui-même (van Schijndel, 2009). C'est pourquoi un couplage est nécessaire.

5.2.4.2. Choix du code de calcul

L'objectif du travail réalisé dans ce projet de thèse est d'expliciter la réponse hygrothermique de différents bétons biosourcés, en association avec le béton classique, et de les comparer. Le choix s'est donc porté sur un logiciel à l'échelle de la paroi (noté HAM) permettant d'avoir une précision de définition des phénomènes de masse et de chaleur. Les conditions internes rencontrées y sont décrites précisément en se basant sur des équations aux dérivées partielles développées sur un volume élémentaire représentatif

(Dubois & Lebeau, 2014). Les modèles diffèrent dans la façon dont les phénomènes de transfert sont modélisés : un calcul unidimensionnel ou bidimensionnel (parfois même 3D), prenant en compte le transport de vapeur d'eau ou d'humidité liquide (H. J. Steeman et al., 2009).

Parmi les logiciels HAM, COMSOL est l'un des plus utilisés (Thibaut Colinart et al., 2013; Ferroukhi, 2015; Oumeziane, 2013; Tariku et al., 2010; van Schijndel, 2009). Il s'agit d'un solveur en éléments finis adapté à la résolution de systèmes d'équations différentielles instationnaires fortement couplées et appliquées à des parois multicouche (Oumeziane, 2013). Dans le cas de cette étude où il s'agit d'implémenter un modèle hygrothermique dans des conditions « réelles »[7], avec des conditions climatiques variables, le logiciel COMSOL semble être le plus adapté. La version utilisée est COMSOL 5.4.

Il a été envisagé de réaliser un couplage HAM-BES avec le logiciel TRNSYS pour étudier l'impact des échanges hygrothermiques à l'échelle du bâtiment, suivant l'exemple de (Ferroukhi, 2015), mais cela n'a pas pu être mené par souci de temps.

5.3. Validation du modèle

5.3.1. Validation numérique

Pour commencer l'analyse critique de la simulation, l'idée est de vérifier que le modèle proposé répond de manière cohérente au couplage hygrothermique étudié. La validation peut être élaborée selon les méthodes suivantes (C.-E. Hagentoft et al., 2004) :

- Les méthodes dites empiriques, qui se basent sur l'expérience, parmi lesquelles l'utilisation de données validés de la littérature (benchmark, expériences) (Soudani, 2016; Trabelsi, 2010), la mise en place d'expérience(s) spécifique(s) pour la création d'informations (Talukdar et al., 2007a, 2007b)
- Les méthodes analytiques ;
- Les méthodes de comparaison inter-modèle qui peuvent déboucher sur des benchmarks. Cela a notamment été le cas pour l'Annex 24 ou HAMSTAD (Adan et al., 2004; H. Hens, 2008; H. S. L. C. Hens, 2002).

Pour ce travail, l'objectif est d'utiliser les données de la littérature pour valider le modèle. Une analyse bibliographique a en ce sens été réalisée ci-dessous. Cette validation sera suivie d'une validation expérimentale.

5.3.1.1. Définitions et historique des benchmarks hygrothermiques

La méthode Glaser a pendant longtemps été la seule méthode utilisée pour étudier les transferts hygrothermiques dans les parois. Le début des années 2000 a marqué une étape

[7] Ce terme est à nuancer car plusieurs approximations ont été réalisées notamment en ce qui concerne les conditions aux limites du côté intérieur de la paroi.

cruciale dans la modélisation de ces phénomènes. Aujourd'hui, la plupart des études ont l'opportunité de valider leurs résultats à travers différents benchmarks. Parmi eux, les plus utilisés sont : le benchmark HAMSTAD (Adan et al., 2004; Aït Oumeziane et al., 2011; Kalagasidis, 2004; Oumeziane, 2013; Soudani, 2016), et le benchmark appelé « Annex 41 » (Ferroukhi, 2015; H. Hens, 2008; Kwiatkowski, 2009). Le tableau ci-dessous (**Tableau 5.3**) propose une chronologie de ces benchmarks et leurs caractéristiques principales. L'**Annexe I**, détaille les modèles simulés.

Tableau 5.3 - Tableau récapitulatif des benchmarks hygrothermique.

Année	Nom	Auteurs	Description	Commentaires	Références
1940 - 1960	Méthode Glaser Normes EN ISO 13788	Glaser	Modèle de calcul statique permettant d'évaluer le risque de condensation à l'intérieur d'une paroi multicouche.	Ce modèle ne considère que les transferts d'eau sous forme de vapeur. Les effets de l'ensoleillement, de la pluie, de la capillarité, les transferts enthalpiques, ou encore du stockage d'humidité sont négligés.	(Adan et al., 2004; Courgey, 2012; Pouget Consultants , 2020)
1950	Modèles de Luikov et Philip et De Vries	Luikov Philip et De Vries	Ces modèles viennent compléter la méthode Glaser		(Adan et al., 2004)
1980	Avènement de l'informatique		Début de la modélisation et de la résolution mathématiques des modèles hygrothermiques		
1995	BESTEST[8] Building Energy Simulation Test	Judkoff R. et Neymark J.	Ce test résulte de l'Annex 21 de l'AIE sur les performances environnementales. Il fournit une méthodologie pour un test systématique de diagnostic des sources de désaccord prédictif.	La méthode consiste en une série de test sur des cas de bâtiments spécifiques, test qui évoluent systématiquement du simple au relativement réaliste.	(Woloszyn & Rode, 2008)
1991-1996	Annex 24 Ou HAMTIE - Heat Air Moisture Transport in highly Insulated new and retrofitted Envelope Parts	Mise en place par l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) géré par l'ECBS[9] (Energy Conservation in Buildings and Community Systems)	Utilisation de comparaison inter-modèles pour valider les résultats de simulation	Aucune validation directe par l'expérimentation n'a été réalisée. Il a toutefois été suggéré qu'une validation plus rigoureuse grâce à une expérimentation bien contrôlée devrait constituer la base des travaux futurs dans ce domaine.	(Maref et al., 2004; Piot, 2009)

[8] Ce projet est aussi utilisé dans l'Annex 41 pour la sous tâche 1 et les CE (common exercise) 0 et 1

[9] (Energy Conservation in Buildings and Community Systems) Les projets menés par l'ECBS sont orientés recherche et développement. Ils ont pour objectif la caractérisation des facteurs déterminants de la

2001	HAMSTAD (Heat, Air and Moisture Standards Developme nt)	Projet initiée par la Commission Européenne	Définition d'une méthodologie ouverte pour une future caractérisation des normes et des certifications. Cette définition repose sur la caractérisation de 5 cas de références unidimensionnels.	Chaque cas couvre au moins deux mécanismes de transfert. Les cas ont été sélectionnés afin de couvrir diverses combinaisons de charges climatiques et combinaisons de matériaux. L'idée est par la suite d'élaborer une base de références pour des cas bi-dimensionnels ou tri-dimensionnels	(Adan et al., 2004; C.-E. Hagentoft et al., 2004)
2007	EN15026	Comité Technique CEN/TC 89 assuré par la SIS	Définition de l'application de logiciel de simulation hygrothermique dans des composants multicouches soumis à des conditions climatiques stables de chaque côté.	Plusieurs tests sur les variations d'humidité dans la paroi peuvent être réalisés en se basant notamment sur l'annexe A.	(CEN/TC 89, 2007; Soudani, 2016)
2003-2007	Annex 41 Réponse à la chaleur, à l'air et à l'humidité dans tout le bâtiment (MOIST-ENG)	Mise en place par l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) géré par l'ECBS (Energy Conservation in Buildings and Community Systems)	L'objectif est de fournir une meilleure compréhension du bilan chaleur, air et humidité de l'ensemble du bâtiment. L'ensemble est divisé en 4 sous tâches (détaillé ci-après)	L'Annex est divisée en 4 « sous tâches » * *Sous tâche 1* : 6 CE (Common exercises pouvant servir de benchmark pour les simulations) * *Sous tâche 2* : expérimentale avec le MBV * *Sous tâche 3* : recensement de données climatiques * *Sous tâche 4* : impact de l'humidité sur la santé des habitants. *Dans le cas de cette étude, il sera analysé la sous tâche 1*	(Piot, 2009; Woloszyn & Rode, 2008)
2014	Projet ANR Habisol HYGRO-BAT	ANR en collaboration avec Monika Woloszyn, Trabelsi Abdelkrim, Virgone Joseph, Slimani Zakaria	Définition d'outils permettant de quantifier l'impact des transferts hygrothermiques	Etude de l'impact de l'ajout d'un enduit ou d'une couche supplémentaire sur les transferts hygrothermiques	(Berger, 2014; Woloszyn et al., 2014)

consommation d'énergie. Ces projets sont sous forme « d'annexe » qui sont aujourd'hui au nombre de 80 environ. Parmi les 25 pays participants, on compte notamment la France (ECBS, s.d.).

2020	Benchmarks B1 et B2 du GdR	Institut des Sciences de l'ingénierie et des systèmes et CNRS[10] Direction affiliée à Amziane Sofiane et Lanos Christophe	Mise en place d'une base de données multidisciplinaire en ce qui concerne les bioressources (transformation, caractérisation et durabilité). Echange entre les acteurs des bioressources	Création de deux benchmarks à compléter en collaboration avant fin 2020. *B1 : Modélisation du comportement mécanique d'un composite *B2 : Transferts couplés thermique et hydrique dans une paroi	(Amziane et al., 2020; Lanos et al., 2020; Lanos & Amziane, 2020)

5.3.1.2. Définition du benchmark choisi et résultats de vérification

Après étude des différents benchmarks, le choix s'est porté sur HAMSTAD 2. Ce benchmark propose la résolution d'un cas analytique. Il correspond au modèle le plus proche du modèle proposé dans ce projet en termes mathématiques. Le **Tableau 5.4** récapitule l'ensemble des conditions initiales de simulation. Le **Tableau 5.5** recense quant à lui les données matériaux.

5.3.1.2.1. Détails HAMSTAD 2

Une couche homogène est analysée dans des conditions isothermes en une dimension. La couche est initialement en équilibre d'humidité avec l'air ambiant, ayant une humidité relative constante. Au temps zéro, il y a un changement soudain de l'humidité relative de l'air environnant. La structure est parfaitement étanche à l'air (Adan et al., 2004).

Tableau 5.4 - Détails HAMSTAD 2 - Cas analytique.

Conditions initiales	
Températures	Humidité relative
$T_{eq,int} = 20°C$	$HR_{int} = 65\%$
$T_{eq,ext} = 20°C$	$HR_{ext} = 45\%$

Tableau 5.5 - Caractéristiques matériaux benchmark HAMSTAD 2.

Notation	**Désignation**	**Propriétés**	**Unités**
ξ	Capacité de stockage d'humidité	$116 \cdot 0{,}0869 \cdot \frac{\frac{P_v}{0{,}118 \cdot P_{v,sat}}}{(1 - \frac{1}{0{,}118}\log\left(\frac{P_v}{P_{v,sat}}\right))^{1{,}0869}}$	kg/m³
C_p	Capacité thermique	800	J/kg·K
k_l	Conductivité hydraulique	1E-15	kg/(m·s·Pa)
λ	Conductivité thermique	0,15	W/m·K
L_v	Chaleur latente de changement de phase	56.8	J/kg
$\rho_{squelette}$	Masse volumique du squelette	525	kg/m³

[10] Avec en outre différents partenaires tels que le CSTB, Karibati, AQC, etc.

D_w	Diffusivité de la vapeur	$6 \cdot 10^{-10}$	m^2/s
k_l^*	Conductivité hydraulique due à un gradient de pression partielle de vapeur à température constante	$6 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{\xi}{P_{v,sat}}$	kg/(m·s·Pa)

5.3.1.3. Résultats modélisation HAMSTAD 2

Pour mettre en œuvre le benchmark HAMSTAD 2 les données dont notamment les propriétés des matériaux, l'état initial et les paramètres limites, ont été saisies sous forme de constantes, d'expressions analytiques ou de fichier d'interpolation (Q. Li et al., 2009). Pour plus de détails :

- L'étude porte sur une paroi monocouche homogène de 20 cm d'épaisseur ;
- La simulation dure 1000h. Le pas de temps est de 1h ;
- Le maillage est choisi extrêmement fin pour plus de précision (entre 10^{-3} et 10^{-6} m).

La figure ci-dessous a été réalisée à partir des données graphiques de (Adan et al., 2004) et des résultats du modèle proposé.

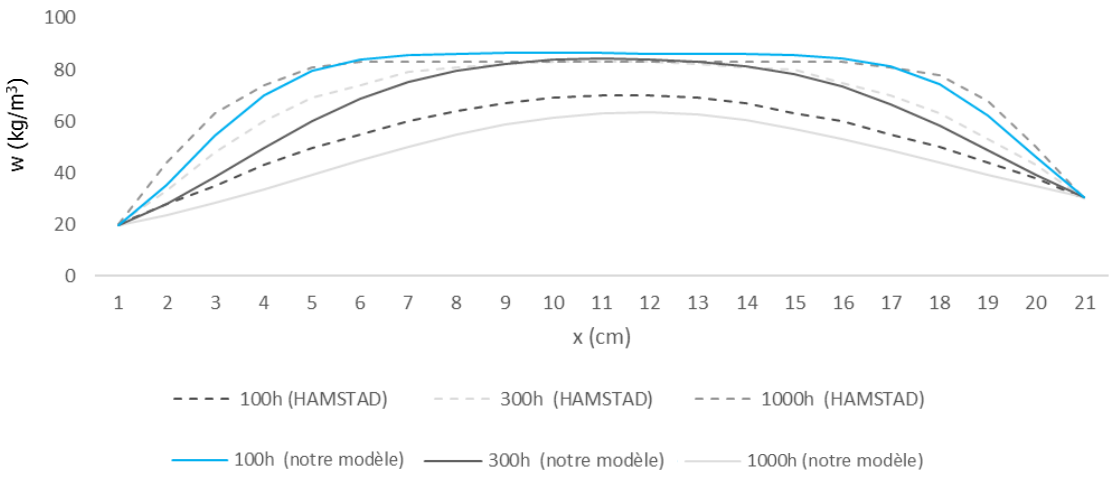


Figure 5.5 - Comparaison du benchmark et du modèle proposé à ξ non constant.

Tableau 5.6 - Ecart en pourcentage entre le modèle proposé et celui du benchmark.

Temps	100h	300h	1000h
Ecart en pourcentage entre le modèle proposé dans ce travail et le benchmark	5%	6%	12%

Les résultats révèlent que le modèle utilisé pour ce travail se stabilise plus vite que celui du benchmark. Les courbes du modèle proposé et du benchmark ont un écart en pourcentage compris entre 5 et 12% (cf. **Figure 5.5**). L'étude numérique montre que

cela n'est pas dû au choix de variation de $P_{v,sat}$ ni à l'ajout d'un terme supplémentaire γ (cf. **Annexe H**).

Une raison à cette particularité peut être bien entendu le fait que les équations malgré une certaine similarité, ne sont pas spécifiquement les mêmes.

La tendance des courbes est similaire. Le benchmark n'établissant pas d'écart maximum pour vérifier le modèle, il est considéré que 12% semble raisonnable vis-à-vis de la complexité des phénomènes à modéliser.

Le modèle de ce projet de thèse propose donc une réponse hygrothermique cohérente et la résolution numérique proposée par le logiciel COMSOL choisi semble suffisamment fiable.

5.3.2. Validation expérimentale

5.3.2.1. Présentation du dispositif expérimental

Le modèle a été validé à travers des mesures expérimentales. Dans ce but, une enceinte bi-climatique connue sous le nom de « cellule DUO » a été utilisée pour imposer deux atmosphères différentes dans les deux côtés du matériau étudié pour reproduire les conditions du modèle numérique. La cellule DUO, représentée sur la **Figure 5.6**, est composée de deux enceintes indépendantes régulées en humidité et en température. Une chambre est mobile et l'autre est fixe, les deux étant connectées par un porte-échantillon. L'échantillon doit avoir les dimensions suivantes : une surface latérale de 90*90 cm et une épaisseur maximale de 15 cm. Dans le cadre de la présente étude, l'épaisseur retenue est de 10 cm.

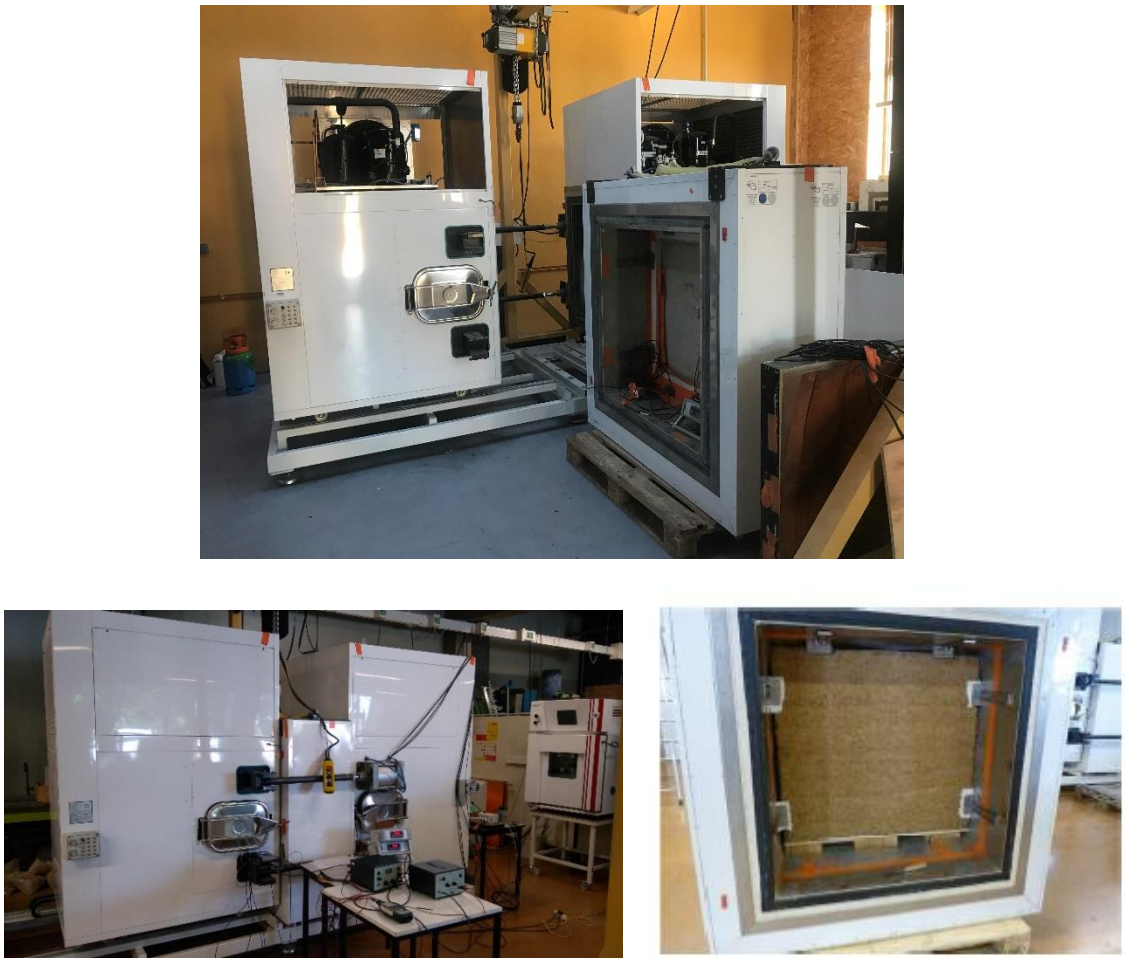


Figure 5.6 - Aperçu de la cellule bi-climatique DUO.

La **Figure 5.7** illustre l'instrumentation de la cellule, composée de trois capteurs de température et humidité (un à l'intérieur de l'enceinte de gauche, un à l'intérieur de l'enceinte de droite et un troisième au milieu de l'échantillon) et deux fluxmètres, un au milieu de chaque surface latérale de l'échantillon. Dans l'enceinte de gauche, la température a été fixée à 30 °C, lorsque dans l'enceinte de droite elle est de 40 °C. Dans les deux chambres, l'humidité relative est imposée à 50 %HR pendant les 4 premiers jours, puis à 80 %HR les 8 jours suivants, puis à 50 %HR jusqu'à la fin de l'essai, qui a une durée totale de 20 jours. h_c représente le coefficient d'échange convectif de chaleur et il dépend de la ventilation. Les valeurs calculées à partir des mesures de vitesse d'air sont 6 W/(m^2·K) pour l'enceinte de gauche et 7 W/(m^2·K) pour l'enceinte de droite.

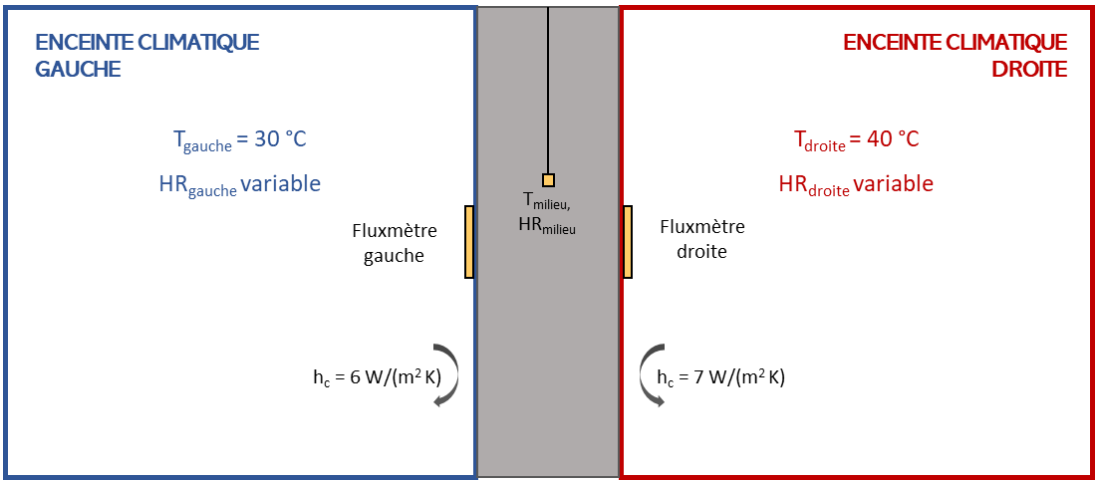


Figure 5.7 - Diagramme d'instrumentation de la cellule bi-climatique DUO.

Deux matériaux ont fait l'objet de cet essai : un béton de chanvre C1-H modifié (la formulation diffère légèrement de celle du C1-H présenté dans le **Chapitre 2**) et du chanvre compacté. Les paramètres de ces deux matériaux, qui seront utilisés comme entrées de la modélisation, sont présentés dans le **Tableau 5.7**.

Tableau 5.7 - Récapitulatif des paramètres des matériaux utilisés pour la validation expérimentale du modèle.

Matériau	**Paramètres**
C1-H	ξ_{33-75} = 15,3 kg/m³ C_p = 1000 J/(kg·K) ρ_{sec} = 510 kg/m³ λ = 0,14 W/m·K δ_p = 3,06·10⁻¹¹ s
Chanvre compacté	ξ_{33-75} = 13 kg/m³ C_p = 1000 J/(kg·K) ρ_{sec} = 130 kg/m³ λ = 0,07 W/m·K δ_p = 7,04·10⁻¹¹ s

5.3.2.2. Résultats

La **Figure 5.8**, la **Figure 5.9** et la **Figure 5.10** montrent une bonne correspondance entre les variables simulées et mesurées pour le mur de chanvre compacté. Les courbes simulées suivent correctement les tendances expérimentales. Les écarts de température ne dépassent généralement 2 °C, l'humidité relative est légèrement surestimée avec des différences inférieures à 15 % et les erreurs de prédiction du flux thermiques sont de moins de 3 W.

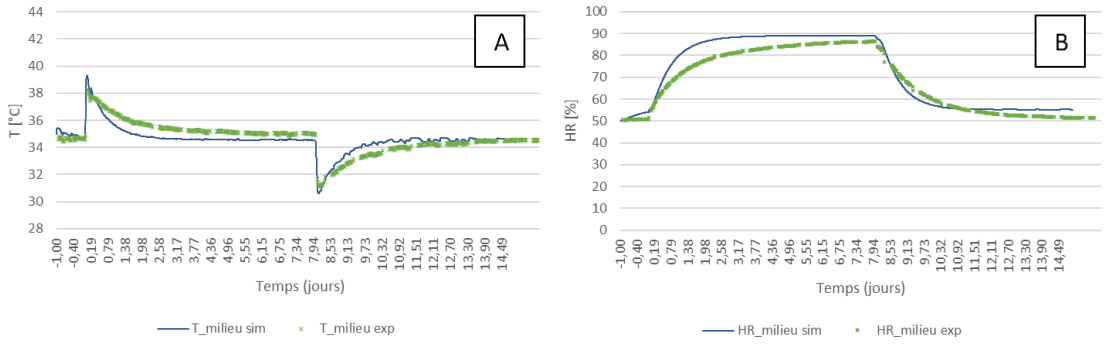


Figure 5.8 - Comparaison de la température (A) et de l'humidité relative (B) au milieu du matériau simulée et mesurée expérimentalement – Chanvre compacté.

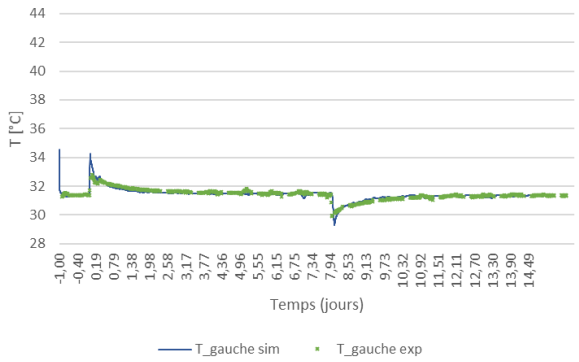


Figure 5.9 - Comparaison de la température sur la surface gauche du mur simulée et mesurée expérimentalement - Chanvre compacté.

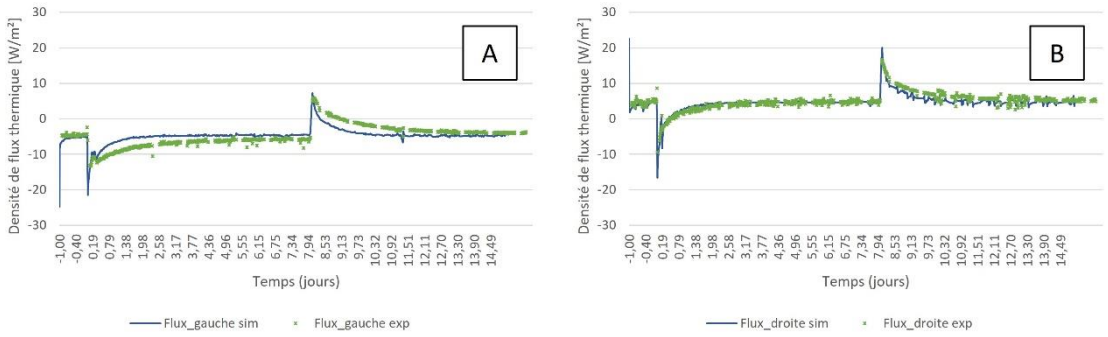


Figure 5.10 - Comparaison du flux à travers la surface gauche (A) et à travers la surface droite (B) simulé et mesuré expérimentalement – Chanvre compacté.

La comparaison entre la température simulée et mesurée sur la surface droite du mur n'a pas été montrée car un problème de capteur est survenu lors de l'essai et la mesure est faussée. Ensuite, les résultats comparatifs entre la simulation et les données expérimentales pour le mur en béton de chanvre C1-H apparaissent ci-dessous.

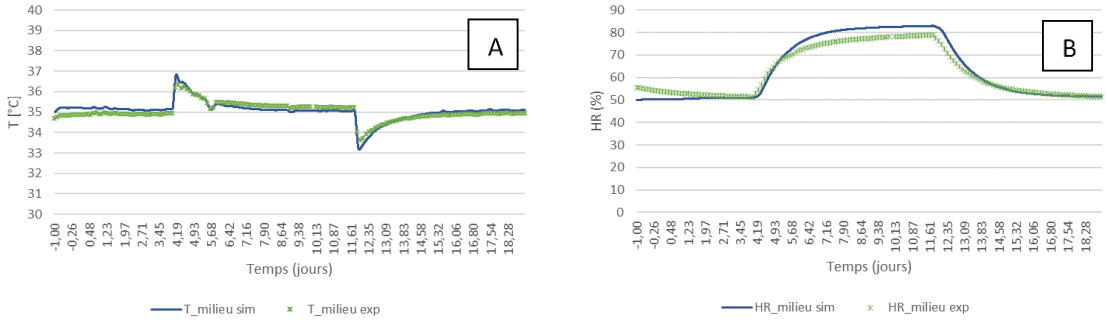


Figure 5.11 - Comparaison de la température (A) et de l'humidité relative (B) au milieu du matériau simulée et mesurée expérimentalement – C1-H.

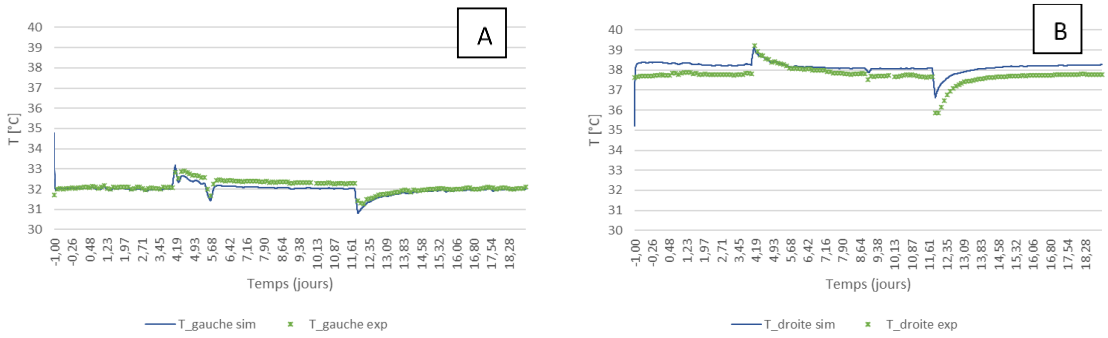


Figure 5.12 - Comparaison de la température sur la surface gauche (A) et sur la surface droite (B) du mur simulée et mesurée expérimentalement – C1-H.

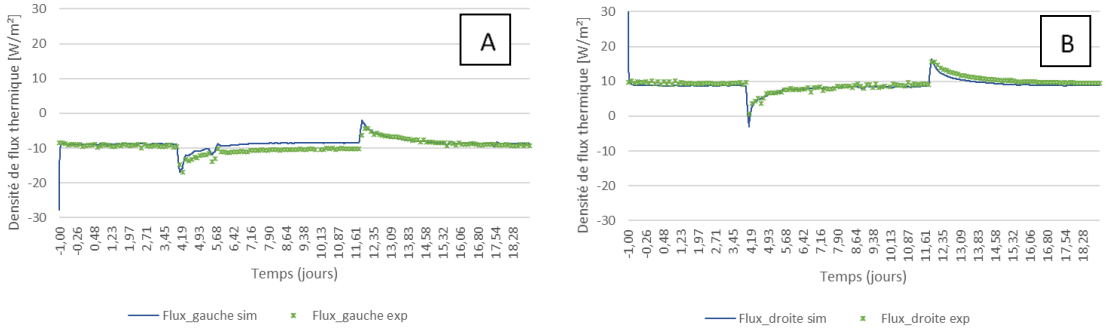


Figure 5.13 - Comparaison du flux à travers la surface gauche (A) et à travers la surface droite (B) simulé et mesuré expérimentalement – C1-H.

Pour ce matériau, les résultats de la simulation et expérimentaux présentent des écarts plus réduits que pour le chanvre compacté, notamment lors des variations rapides des conditions hygrothermiques. Ces résultats permettent la validation du modèle proposé et sa résolution numérique. Aussi, cela permet d'entamer une analyse critique sur des cas d'étude plus réalistes.

5.4. Analyse critique et mise en œuvre de la simulation

5.4.1. Définition des études de cas

5.4.1.1. Choix des matériaux et objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude numérique est d'étudier la réponse hygrothermique de plusieurs matériaux biosourcés qui font l'objet de cette thèse face à des conditions climatiques et intérieures réalistes. Le choix des études de cas repose donc sur deux critères :

Tableau 5.8 - Critères des études de cas[11] - version 1.

Critère	**Le produit : Béton biosourcé**	**Le contexte : Environnement dans lequel le matériau évolue**	
Signification	Sélection selon granulat et liant	Choix du climat/de la localisation	Choix des conditions intérieures
Objectif	Proposer de nouvelles formulations de béton biosourcé pour l'isolation de bâtiments anciens (projet DIVA)	Définir la réponse hygrothermique selon un climat particulier. Les matériaux étudiés sont sensibles aux transferts de masse. C'est pourquoi la définition du climat est importante.	Les conditions de l'environnement intérieur auront aussi une grande variabilité (chauffage, HR...) et par conséquent, un impact non négligeable sur la réponse du mur.

Cette étude se focalise sur l'utilisation des matériaux biosourcés en tant qu'enduit isolant appliqué sur la face intérieure des murs classiques. Par conséquent, les simulations porteront sur une paroi bicouche avec une couche extérieure de béton classique de 20 cm d'épaisseur et une couche intérieure de béton biosourcé de 10 cm. Concernant le béton biosourcé, plusieurs formulations seront étudiées. Chacune des couches est considérée homogène.

La définition des caractéristiques des matériaux a été réalisée en amont à partir des essais expérimentaux des chapitres précédents et est recensée dans le **Tableau 5.9**. Les bétons étudiés dans la couche intérieure seront les suivants :

- Cas 1 : C2-H* béton de chanvre à base de liant Calco ;
- Cas 2 : C2-S liant Calco et granulat moelle de tournesol ;
- Cas 3 : HB-S liant hydraulique (Hydraulic Binder) et granulat de moelle de tournesol.

Pour le béton classique, les données ont été extraites de (Poyet, 2009).

[11] Après avoir défini les critères plus précisément dans les paragraphes suivants, le tableau sera complété.

Tableau 5.9 - Caractéristiques des bétons étudiés.

Paramètres	Unités	Formulation			
		Béton de chanvre C2-H*	Béton classique	C2-S	HB-S
ξ_{33-75}	kg/m³	20	70,7142	15	5
C_p	J/kg·K	678	880	1063	1295
ρ_{sec}	kg/m³	600	2200	550	150
λ	W/(m·K)	0,15	1,4	0,19	0,065
δ_p	kg/(m·s·Pa)	4,81E-11	2,17E-12	2,68E-11	3,99E-11

5.4.1.2. Extraction des données des ambiances intérieures

Pour les conditions aux limites à l'intérieur du bâtiment, nous avons mené une acquisition de données durant une année à l'intérieur d'un studio T1 dont le plan est présenté dans la **Figure 5.14**. L'extraction de données a été réalisée à l'aide de capteurs de température et d'humidité Tinytag placés dans la cuisine, dans la chambre et dans la salle de bains.

L'intérêt est d'étudier la réponse du matériau et le confort hygrothermique en conditions réelles d'humidité et de température, notamment face à de fortes sollicitations en humidité, raison pour laquelle il a été choisi de réaliser les simulations avec les données obtenues pour la salle de bains.

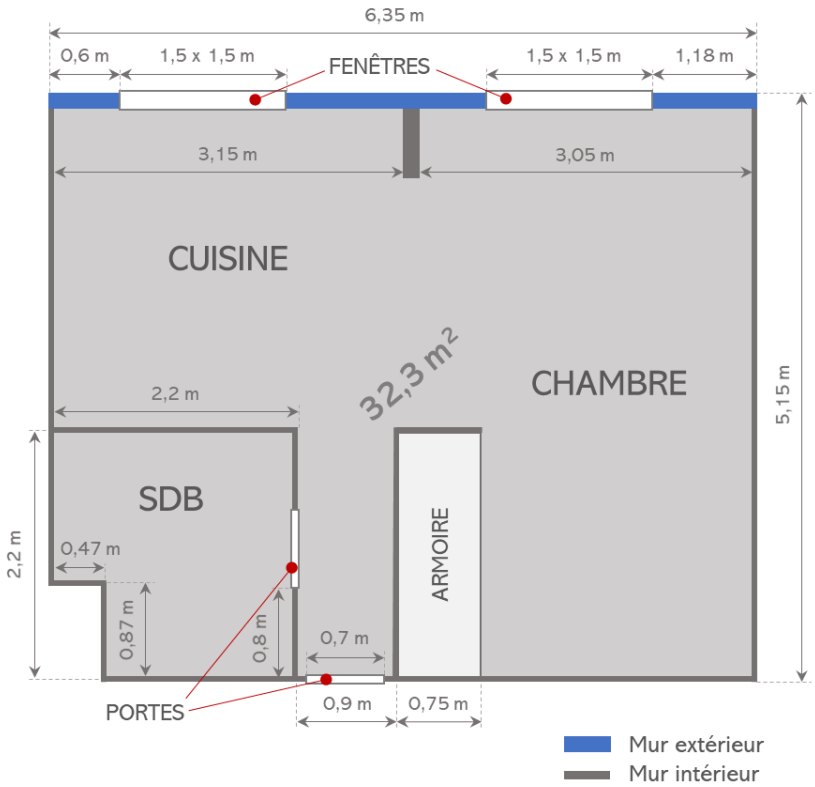


Figure 5.14 - Plan du studio dans lequel a été réalisée l'acquisition de données pour les conditions intérieures de la simulation.

De plus, un deuxième type de simulation a été mené, dans lequel les conditions d'humidité aux limites intérieures sont représentées par un cycle de type MBV (8 heures à 70 %HR et 16 heures à 33 %HR), qui représente de façon approximée les conditions dans l'habitat. L'intérêt de cette simulation est de comparer la réponse en conditions réelles à la réponse en présence d'une sollicitation régulière à dérivée continue.

5.4.1.3. Extraction des données météorologiques

Définition des zones climatiques à étudier

Dans le but d'implémenter les équations des conditions aux limites, une extraction de données météorologiques a été effectuée. La modélisation doit ensuite permettre de mettre en exergue l'impact des conditions climatiques sur différents matériaux assimilables au béton de moelle. Dans le cadre du projet DIVA de l'ADEME, les matériaux étudiés doivent provenir de domaines locaux. A cet effet, une comparaison des climats français a donc été réalisée.

La France est un pays tempéré. Il est cependant possible de définir six zones/climats différent(e)s selon la localisation (cf. **Figure 5.15**). Six villes ont ainsi été prédéfinies.

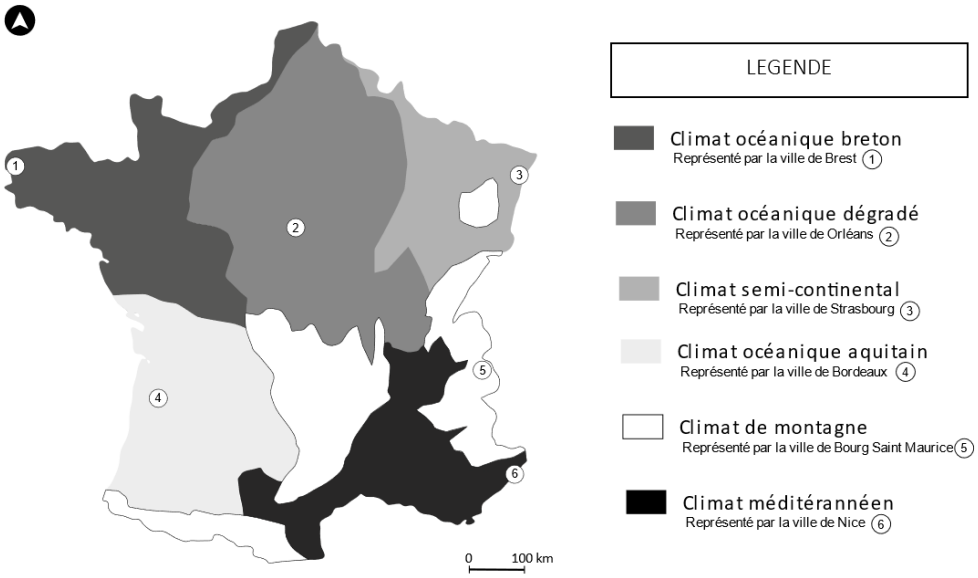


Figure 5.15 - Définition des villes représentative des climats en France.

Résultats de comparaison des climats

L'ensemble des informations climatiques ont été extraites du logiciel TRNSYS[12] qui possède différentes bases de données météorologiques.

[12] TRNSYS : logiciel de simulation destiné principalement aux domaines des énergies renouvelables et du bâtiment.

L'analyse des climats permet dans un premier temps de caractériser quantitativement les facteurs extérieurs pouvant influencer les matériaux (voir **Annexe J**). Dans un second temps, et pour optimiser l'analyse des modélisations, un tri pour choisir les deux climats les plus représentatifs a été opéré. Les critères ont été les suivants : valeurs extrêmes des climats, écart type, moyenne sur l'année.

Ils ont été représentés graphiquement sur la **Figure 5.16**, la **Figure 5.17**, la **Figure 5.18** et la **Figure 5.19**. Les variables étudiées ont été :

- La température : variable représentant la chaleur dans nos équations ;
- L'humidité relative : en lien avec la variable P_v utilisé pour les équations (cf. **Annexe L**) ;
- Le vent : pour son influence sur les coefficients de convection.

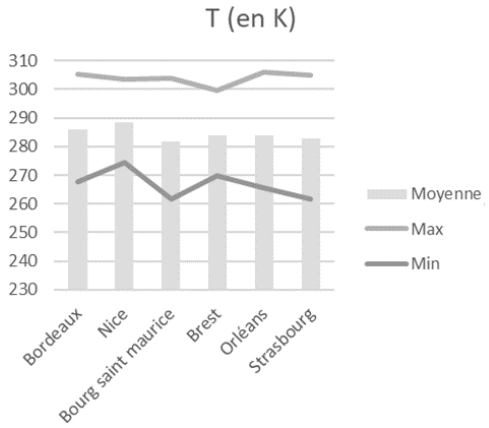


Figure 5.16 - Etude de la température selon la zone climatique.

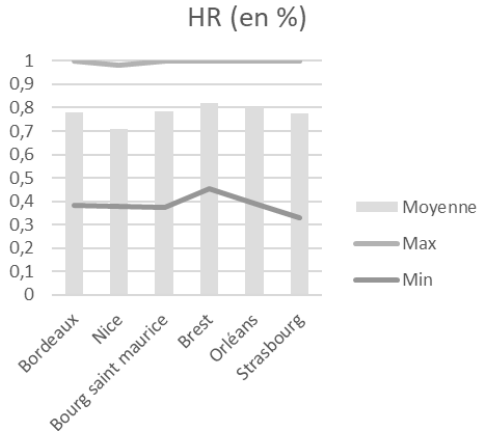


Figure 5.17 - Etude de l'humidité relative selon la zone climatique.

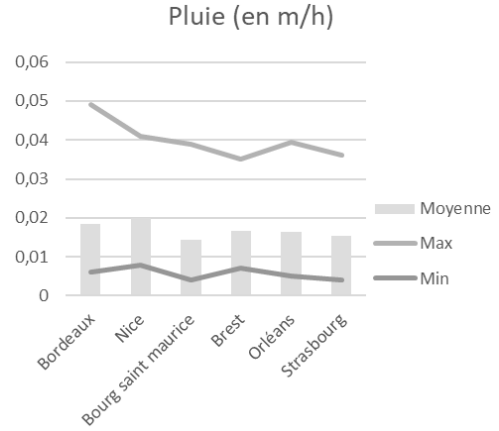


Figure 5.18 - Etude du ratio de pluie tombée selon la zone climatique.

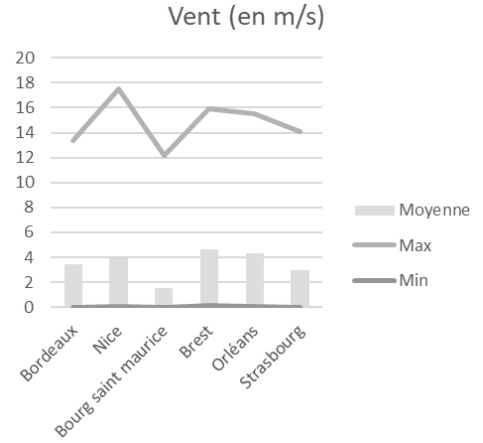


Figure 5.19 - Etude de la vitesse du vent selon la zone climatique.

Tableau 5.10 - Etude de l'écart type des facteurs extérieurs influant selon la zone climatique.

Ecart type	Bordeaux	Nice	Bourg Saint Maurice	Brest	Orléans	Strasbourg
T [°C]	6,83	5,94	8,20	4,85	7,15	7,92
Vitesse du vent [m/s]	2,19	2,73	1,53	2,66	2,52	2,12
HR [%]	0,13	0,11	0,14	0,11	0,14	0,14

Après analyse des courbes et du tableau de l'écart type, le choix s'est porté sur les villes de Nice et de Bourg Saint Maurice. Les climats de ces deux zones possèdent des caractères relativement différents (cf. **Annexe K**). Ils permettront ainsi de tester les matériaux dans des conditions « extrêmes » des climats français.

- Nice : climat venteux et sec ;
- Bourg Saint Maurice : climat humide ayant la plus grosse disparité de températures.

Une dernière vérification a été réalisée en utilisant COMSOL. Des courbes représentant la réponse du matériau C2-S (cf. **Figure 5.20**) pour les climats de Nice et de Bourg Saint Maurice ont été tracées. Elles y démontrent la disparité des réponses en températures et de l'humidité pour les 6 villes.

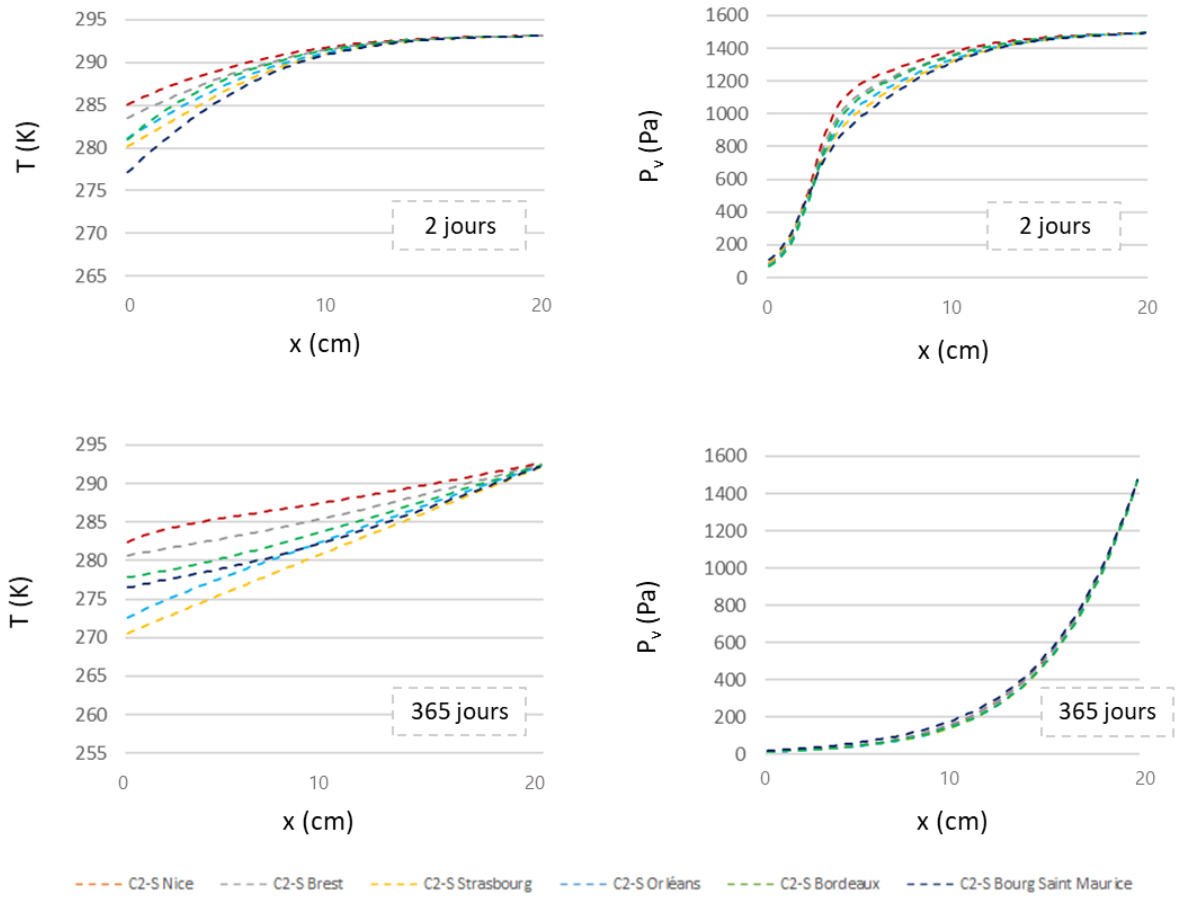


Figure 5.20 - Comparaison de la réponse en termes de T° et de P_v d'une paroi en fonction des différents climats.

5.4.2. Implémentation numérique

5.4.2.1. Récapitulatif des cas étudiés et des paramètres d'entrée

En conclusion de cette partie sur le choix des études de cas, un tableau récapitulatif (**Tableau 5.11**) a été élaboré. L'objectif est de décrire la réponse hygrothermique des matériaux et de les comparer. L'ensemble de la modélisation est réalisé dans des conditions dites « réelles » en intégrant des bases de données météorologiques. Deux climats ont été choisis : Nice et Bourg Saint Maurice. En ce qui concerne les matériaux, trois parois bicouches à base de béton classique et de trois formulations de bétons biosourcés (une pour chaque paroi) sont étudiées.

Tableau 5.11 - Résumé de la définition des études de cas – version 2.

Critère	**Le produit : Béton biosourcé**	**Le contexte : Environnement dans lequel le matériau évolue**
Signification	Sélection selon granulat et liant	Choix du climat/de la localisation
Objectif	Proposer de nouvelles formulations de béton biosourcé pour l'isolation de bâtiments anciens (projet DIVA)	Définir la réponse hygrothermique selon un climat particulier. Les matériaux étudiés sont sensibles aux transferts de masse. C'est pourquoi la définition du climat est importante.
Choix réalisé	Trois parois bicouche avec couche extérieure (20 cm) de béton classique et une couche intérieure (10 cm) de : • Cas 1 : C2-H* béton de chanvre à base de liant Calco • Cas 2 : C2-S liant Calco et granulat moelle de tournesol • Cas 3 : HB-S liant hydraulique (Hydraulic Binder) et granulat moelle de tournesol	Parmi 6 villes représentants les climats français, deux sont sorties du lot : • Nice : Climat venteux et sec • Bourg Saint Maurice : Climat humide ayant la plus grande disparité de températures

Le **Tableau 5.12** est un récapitulatif des différentes simulations réalisées pour les deux climats, les trois matériaux et les trois configurations hygrothermiques. Dans les trois cas d'étude, les valeurs de température à l'intérieur sont les mêmes (celles enregistrées pour la salle de bains) pour pouvoir établir une comparaison judicieuse. Quant à l'humidité relative, elle est différente pour les trois configurations hygrothermiques : elle n'est pas prise en compte pour C1 (calcul purement thermique), elle correspond aux données enregistrées dans la salle de bains pour C2 et elle correspond au cycle type MBV avec 16h à 33 %HR et 8h à 70 %HR pour C3. Pour chaque matériau, nous avons pris une valeur variable de ξ avec l'humidité relative, calculée comme étant la dérivée de la médiane des courbes d'adsorption et désorption. Néanmoins, dans les tableaux de paramètres la valeur de ξ_{33-75} (pente moyenne entre 33% et 75% d'HR) est renseignée à titre indicatif.

Quelle que soit la configuration, les conditions initiales dans le matériau sont :

- *Pour la pression de pression de vapeur* : 1150 Pa, soit 75% d'humidité relative qui correspond à une humidité relative proche de l'humidité relative moyenne au milieu du mur compte tenu des conditions intérieures et extérieures considérées.
- *Pour la température* : 280,15 K.

Tableau 5.12 - Détails des cas étudiés - Tableau récapitulatif.

Climat	**Configurations matériaux**		**Configurations hygrothermiques**	**Notation**
(A1) Bourg Saint Maurice	(B1) C2-H*(int) + Béton (ext)	ξ_{33-75} = 20 kg/m^3 C_p = 677,9 J/(kg·K) ρ_{sec} = 600 kg/m^3 λ = 0,15 W/m·K δ_p = 4,81·10^{-11} s	(C1) Simulation thermique	A1B1C1
			(C2) Simulation hygrothermique salle de bains	A1B1C2
			(C3) Simulation hygrothermique MBV	A1B1C3
	(B2) C2-S(int) + Béton (ext)	ξ_{33-75} = 15 kg/m^3 C_p = 1063 J/(kg·K) ρ_{sec} = 550 kg/m^3 λ = 0,19 W/m·K δ_p = 2,68·10^{-11} s	(C1) Simulation thermique	A1B2C1
			(C2) Simulation hygrothermique salle de bains	A1B2C2
			(C3) Simulation hygrothermique MBV	A1B2C3
	(B3) HB-S(int) + Béton (ext)	ξ_{33-75} = 5 kg/m^3 C_p = 1300 J/(kg·K) ρ_{sec} = 150 kg/m^3 λ = 0,065 W/m·K δ_p = 3,99·10^{-11} s	(C1) Simulation thermique	A1B3C1
			(C2) Simulation hygrothermique salle de bains	A1B3C2
			(C3) Simulation hygrothermique MBV	A1B3C3
(A2) Nice	(B1) C2-H*(int) + Béton (ext)	ξ_{33-75} = 20 kg/m^3 C_p = 677,9 J/(kg·K) ρ_{sec} = 600 kg/m^3 λ = 0,15 W/m·K δ_p = 4,81·10^{-11} s	(C1) Simulation thermique	A2B1C1
			(C2) Simulation hygrothermique salle de bains	A2B1C2
			(C3) Simulation hygrothermique MBV	A2B1C3
		ξ_{33-75} = 15 kg/m^3	(C1) Simulation thermique	A2B2C1

	(B2) C2-S(int) + Béton (ext)	C_p = 1063 J/(kg·K) ρ_{sec} = 550 kg/m^3 λ = 0,19 W/m·K δ_p = 2,68·10^{-11} s	(C2) Simulation hygrothermique salle de bains	A2B2C2
			(C3) Simulation hygrothermique MBV	A2B2C3
	(B3) HB-S(int) + Béton (ext)	ξ_{33-75} = 5 kg/m^3 C_p = 1300 J/(kg·K) ρ_{sec} = 150 kg/m^3 λ = 0,065 W/m·K δ_p = 3,99·10^{-11} s	(C1) Simulation thermique	A2B3C1
			(C2) Simulation hygrothermique salle de bains	A2B3C2
			(C3) Simulation hygrothermique MBV	A2B3C3

5.4.2.2. Implémentation dans le logiciel

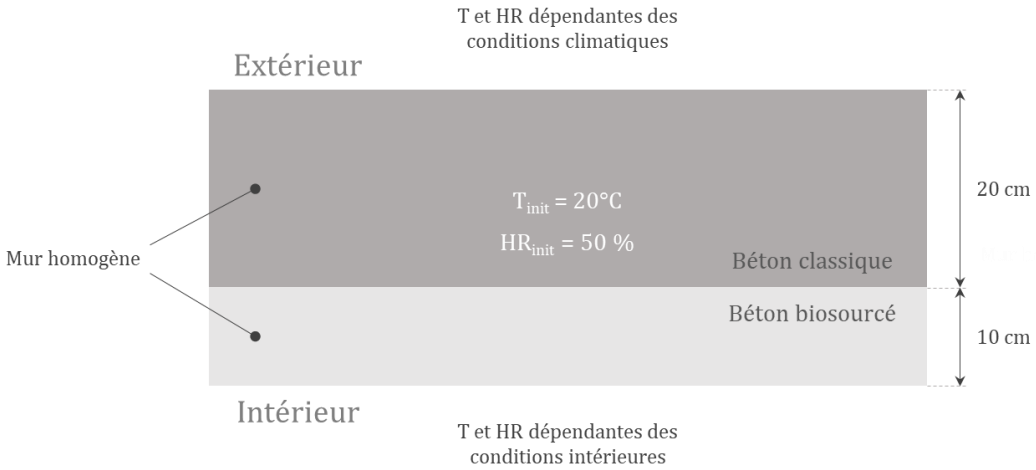


Figure 5.21 - Schéma de la paroi modélisée.

L'étude porte sur une paroi bicouche avec une couche extérieure homogène de 20 cm d'épaisseur de béton classique et une couche intérieure homogène de 10 cm de béton biosourcé. L'interface entre couches est considérée parfaite. C'est-à-dire la continuité des champs de température et de pression vapeur est imposée à l'interface. Le cas étudié se réduit donc à une géométrie 1D, avec la variable d'espace scalaire x comprise entre 0 et L=30cm.

L'implémentation numérique est réalisée avec le module PDE du code de calcul COMSOL Multiphysics. La simulation dure 2 ans pour laisser le temps au matériau de se stabiliser et de passer plusieurs saisons avec une fréquence de sortie des résultats toutes les heures.

Les calculs ont été réalisés avec les paramètres suivants :

- Pas de temps : adaptatif et compris entre 0,001s et 0,1s.

- Maillage : composé de 100 éléments de domaine de même taille (= $3 \cdot 10^{-3}$ m).
- Tolérance relative sur les variables : 0,0001.

5.4.3. Résultats et discussion

On procède à l'analyse des résultats obtenus par le biais de la simulation. Etant donné que les conditions à l'intérieur et à l'extérieur ont été imposées, l'analyse se focalise sur la réponse de chaque ensemble bicouche face aux diverses conditions.

Plus particulièrement, on s'intéresse à l'impact des effets latents sur les déperditions en intérieur et en extérieur en fonction des climats extérieurs et des matériaux utilisés. L'exploitation de résultats se concentre sur la deuxième année car la première année est considérée comme une période de stabilisation. Les formules **(5.9)** et **(5.10)** ont été utilisées pour le calcul de la densité de flux thermique et hygrique, respectivement.

5.4.3.1. Influence du matériau

Une comparaison est établie entre les trois murs bicouche, chacun composé de béton classique et d'un matériau biosourcé (C2-H*, C2-S et HB-S). Un seul climat et un seul type de simulation sont retenus, en l'occurrence, le climat de Bourg Saint Maurice et la simulation C2 (hygrothermique salle de bains), car elle prend en compte l'effet du couplage et elle a été calculée à partir de données climatiques intérieures expérimentales.

Flux thermique et coefficient de transfert thermique

La densité de flux thermique à la surface intérieure est comparée pour les trois systèmes bicouche. La **Figure 5.22** illustre la variation de cette densité durant la deuxième année de la simulation par le biais de la moyenne mensuelle de densité de flux. On observe que, pour les trois matériaux, le flux est croissant de janvier à juin et décroissant de juillet à décembre et négatif toute l'année. Cela est dû au fait que la température intérieure est assez élevée dans le cas d'étude considéré. Ainsi, plus que la valeur du flux, nous nous intéresserons à la variation de celui-ci.

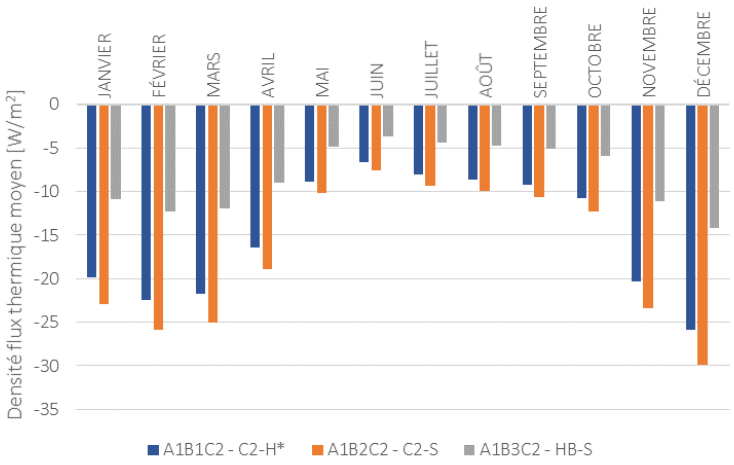


Figure 5.22 - Moyenne mensuelle de la densité de flux thermique - Bourg Saint Maurice.

La **Figure 5.23A** montre la variation de densité de flux thermique pendant une semaine d'été, du 24/06 au 30/06, et la **Figure 5.23B**, la variation pendant une semaine d'hiver, du 25/12 au 31/12. La variation dans la semaine d'été est très marquée entre le jour et la nuit, tandis qu'elle est moins appréciable durant la semaine froide. Le mur bicouche béton + HB-S présente dans tous les cas la densité absolue de flux thermique la moins importante. Les densités liées au mur béton + C2-H* et au mur béton + C2-S sont, en moyenne, 182% et 210% la densité de flux thermique du béton + HB-S.

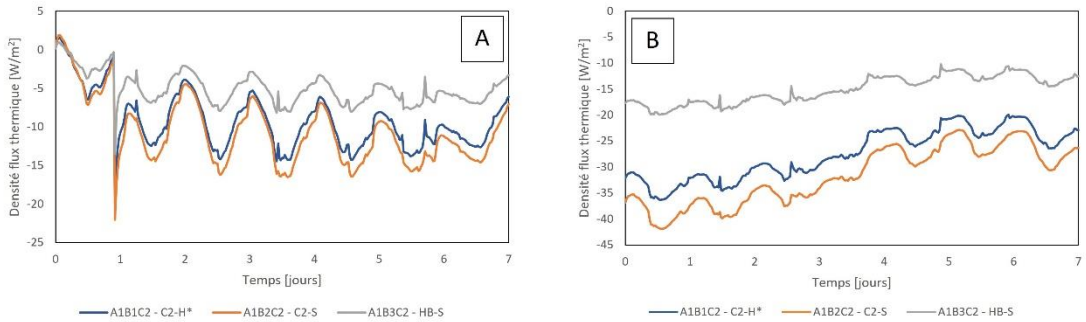


Figure 5.23 - Densité de flux thermique semaine du 24/06 au 30/06 (A) et du 25/12 au 31/12 (B) – Bourg Saint Maurice.

Ensuite, le coefficient de transfert thermique moyen est calculé pour chaque matériau biosourcé sur la deuxième année (voir **Tableau 5.13**). Le coefficient de transfert thermique U_{therm} [W/(m²·K)] est calculé comme la densité de flux thermique q [W/m²] qui traverse l'épaisseur de la couche de matériau biosourcé, divisée par la différence entre la température de l'ambiance extérieure et la température de l'ambiance intérieure, selon **(5.20)**.

$$U_{therm} = \frac{q}{\Delta T} = \frac{h_c \cdot \left(T_{surf\ int} - T_{int}\right)}{T_{ext} - T_{int}} \tag{5.20}$$

Où h_c représente le coefficient d'échange convectif de chaleur, en [W/(m²·K)].

Tableau 5.13 – Coefficient de transfert thermique moyen de chaque matériau.

Matériau	**Coefficient de transfert thermique moyen**
C2-H*	0,75251
C2-S	1,00017
HB-S	0,57716

Les valeurs moyennes de U_{therm} pour chaque matériau sont en concordance avec les résultats trouvés précédemment, selon lesquels HB-S serait le matériau le plus isolant, suivi de C2-H*, qui laisse passer en moyenne presque deux fois plus de chaleur, et enfin de C2-S. Les valeurs minimale et maximale du U théorique ont également été calculées pour chaque matériau : 0,71-0,93 pour C2-H*, 0,78-1,06 pour C2-S et 0,44-0,51 pour HB-S, ce qui montre une très bonne concordance avec les résultats du tableau.

Flux hygrique

Dans les mêmes conditions, l'humidité relative au milieu du matériau biosourcé est calculée pour les trois matériaux afin d'étudier le stockage d'humidité. La **Figure 5.24** montre son évolution pendant la deuxième année de la simulation, où on remarque que la tendance générale est la même pour les trois matériaux : l'humidité relative moyenne diminue entre février et aout et augmente entre septembre et janvier. De plus, on peut constater qu'il n'y a pas de risques de condensation dans ce point étant donné que l'humidité relative n'atteint jamais 100 %.

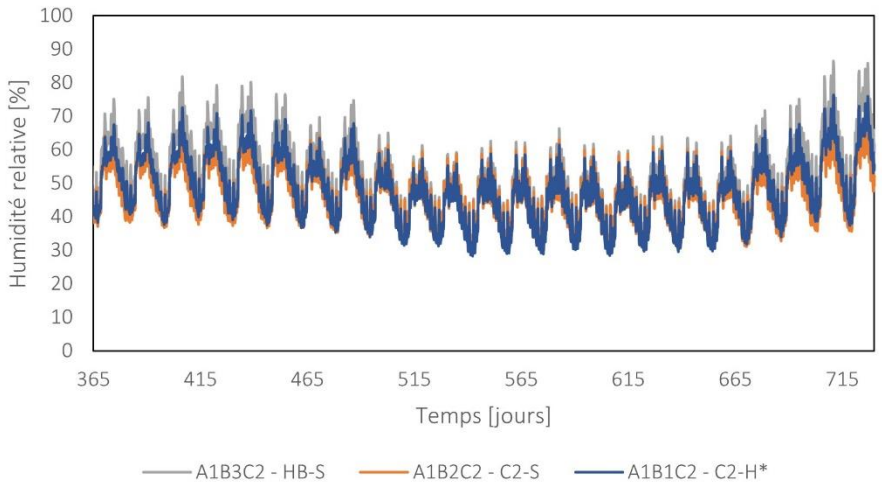


Figure 5.24 - Evolution de l'humidité relative au sein du matériau biosourcé – Bourg Saint Maurice.

La **Figure 5.25** montre l'évolution de cette variable pour une semaine d'été (A) et pour une semaine d'hiver (B). Lorsque l'on peut voir des cycles approximativement journaliers dans les deux cas, les deux graphiques présentent de nombreuses différences. Pendant la semaine d'été, la valeur moyenne d'humidité est plus basse, environ 40 %HR, contre 60-70 %HR pour la semaine d'hiver. De plus, la valeur d'humidité à l'intérieur du mur pendant la semaine d'été est très similaire pour les trois matèriaux avec un écart maximal de 6 %HR entre HB-S et C2-H* et de 3 %HR entre HB-S et C2-S. Cet écart est plus visible durant la semaine d'hiver : 11 %HR entre HB-S et C2-H* et 14 %HR entre HB-S et C2-S. Un décalage temporel, d'environ 30 min, apparaît également pendant cette période : de façon générale, C2-S atteint son maximum en premier, suivi de HB-S, puis de C2-H*. L'explication de ce phénomène n'est cependant pas triviale, car l'inertie hydrique du matériau dépend fortement de la température (via la variation de la pression de vapeur saturante avec la température), et donc de l'inertie thermique des paroies. Enfin, HB-S présente l'humidité la plus élevée quasiment à tout moment, ce qui peut être expliqué par sa capacité de stockage hydrique (ξ) plus faible.

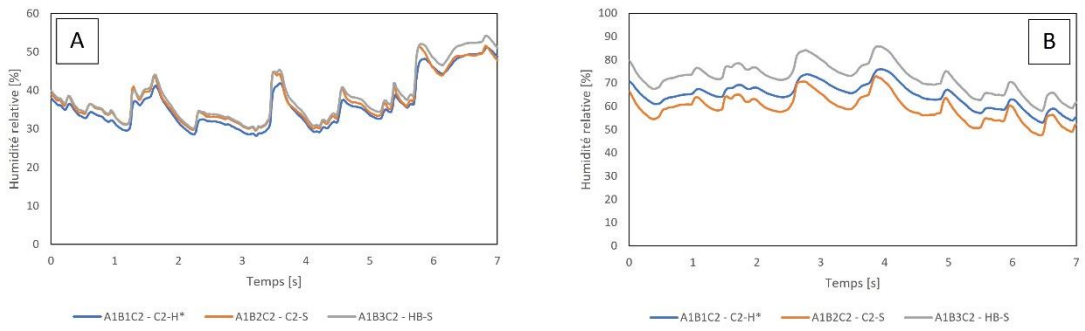


Figure 5.25 - Humidité relative au milieu du matériau biosourcé semaine du 24/06 au 30/06 (A) et du 25/12 au 31/12 (B) – Bourg Saint Maurice.

On s'intéresse également à la densité de flux hygrique à travers la surface intérieure du mur bicouche. La **Figure 5.26** présente l'évolution de cette variable durant la deuxième année à travers la valeur moyenne correspondante à chaque mois pour plus de clarté. Contrairement au flux thermique, la densité de flux hygrique change de signe durant l'année. Entre avril et septembre (saison tempérée), le flux se dirige de l'ambiance intérieure vers la paroi, lorsque, entre septembre et mars (saison froide), le flux va de la paroi vers l'ambiance intérieure. On remarque également que la densité moyenne de flux augmente entre les mois de mai et décembre et décroit entre janvier et mai, approximativement.

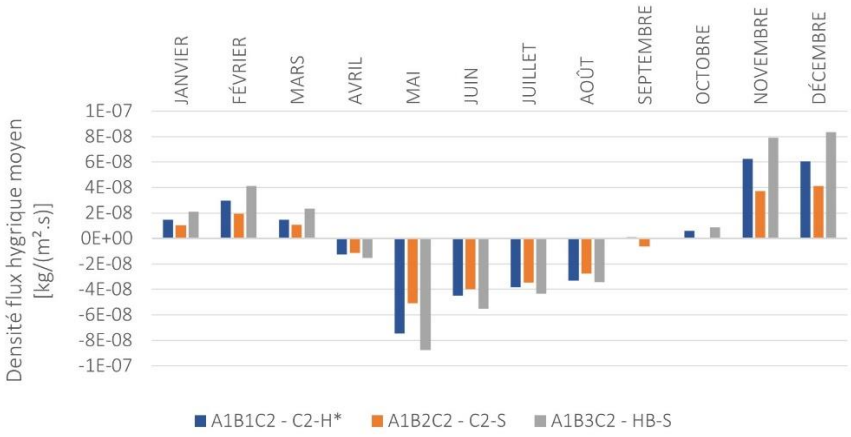


Figure 5.26 - Moyenne mensuelle de la densité de flux hygrique à travers la surface intérieure des trois murs bicouche – Bourg Saint Maurice.

De façon générale, HB-S présente des densités de flux hygrique plus importantes pendant l'année, suivi de C2-H*. De façon surprenante, cette tendance n'est pas corrélée avec le produit de la pression de vapeur saturante par l'effusivité hydrique (notée b_m) à 20°C ($P_{v,sat}\, b_m = \sqrt{k_m \xi\, P_{v,sat}\,(20°C)}$) des matériaux étudiés (on trouve la plus grande valeur pour C2-H*, suivi de HB-S). En effet, ce produit apparait dans la formule du $MBV_{idéal}$ comme étant la grandeur quantifiant la capacité du matériau à échanger de l'humidité avec l'ambiance. Cela pourrait s'expliquer par le flux thermique plus faible de la formulation HB-S, induisant ainsi, compte tenu des fortes valeurs de température

intérieures, des valeurs en surface intérieures de $P_{v,sat}$ et donc de $\sqrt{k_m \xi\, P_{v,sat}(T)}$ plus élevées que celles des autres formulations.

Afin d'étudier l'impact des flux hygriques sur les déperditions, les calculs hygrothermiques réalisés pour les trois formulations ont été comparés à des calculs purement thermiques. La différence induite par les phénomènes hygrothermiques sur les flux de chaleur a été calculé via la différence $\Delta\Phi_{\text{therm}}$ égale à :

$$\Delta\Phi_{\text{therm}} = \left|\Phi_{\text{therm}}^{HT} - \Phi_{\text{therm}}^{T}\right| \tag{5.21}$$

Avec Φ_{therm}^{HT} la densité de flux thermique en surface provenant du calcul hygrothermique salle de bains et Φ_{therm}^{T} la densité de flux thermique en surface provenant du calcul purement thermique.

Les résultats sont reportés sur la **Figure 5.27** pour la semaine du 25/12 au 31/12. Pour les matériaux HB-S et C2-H*, l'effet du couplage est pratiquement le même, le $\Delta\Phi_{\text{therm}}$ maximal étant d'environ 2,5 W/m^2, lorsqu'il est plus réduit pour C2-S, avec un $\Delta\Phi_{\text{therm}}$ maximal de 0,74 W/m^2. Ce comportement se maintient tout le long de la deuxième année. La **Figure 5.28** montre les mêmes résultats rapportés (en pourcentage) à la densité de flux thermique calculé à travers la simulation thermique.

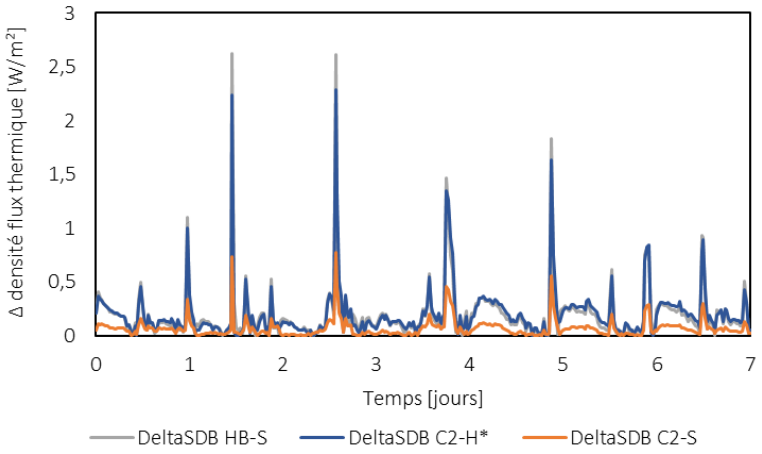


Figure 5.27 - Différence absolue de densité de flux thermique entre la simulation thermique (C1) et hygrothermique salle de bains (C2) pour la semaine du 25/12 au 31/12 - Bourg Saint Maurice.

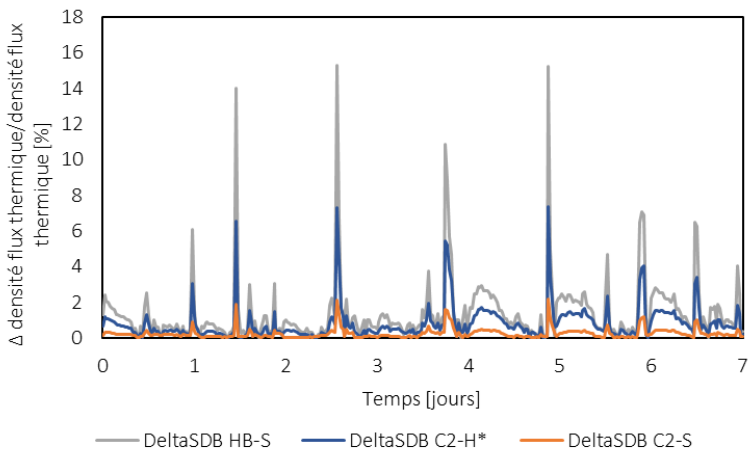


Figure 5.28 - Rapport entre la différence absolue de densité de flux thermique entre la simulation thermique (C1) et hygrothermique salle de bains (C2) et la densité de flux thermique (C1) pour la semaine du 25/12 au 31/12 - Bourg Saint Maurice.

A partir de cette analyse, on peut conclure que l'impact des effets latents sur les déperditions à Bourg Saint Maurice est plus important pour le mur béton + HB-S en proportion à la densité de flux thermique obtenue pour le matériau.

Nombre adimensionnel $\boldsymbol{\eta}$

Une méthode pour évaluer l'importance des effets hygrothermiques pour un matériau donné est présentée ci-après. En effet, l'équation de conservation de l'énergie **(5.2)** met en évidence d'un côté un terme de flux de chaleur dû aux phénomènes diffusifs ($\mathrm{div}\left(\lambda\,\vec{\nabla}(T)\right)$) et un terme dû aux phénomènes de changement de phase de l'eau ($L_v div(\delta_p\,\vec{\nabla}(P_v))$. Si ce second terme est négligeable devant le premier, alors nous pouvons en conclure qu'une modélisation sans prise en compte des phénomènes de changement de phase de l'eau produirait les mêmes résultats en termes de champs de température et de flux de chaleur et donc que les couplages hygrothermiques (autres que ceux dus aux variations des paramètres matériaux) sont négligeables. Afin d'étudier l'importance relative de ces deux termes, nous pouvons introduire un nombre adimensionnel, noté η, et égal à :

$$\eta = \left| \frac{\lambda \cdot \dfrac{T_{interface} - T_{surf\ int}}{d_{therm}}}{L_v \cdot \delta_p \cdot \dfrac{P_{v,interface} - P_{v,surf\ int}}{d_{HT}}} \right| \tag{5.22}$$

avec λ exprimé en [W/(m·K)], L_v [J/kg] la chaleur latente de vaporisation, d_{therm} [m] l'épaisseur du mur biosourcé égal à 0,1 m et d_{HT} [m] l'épaisseur active calculée selon la formule **(5.23)** (Rode et al., 2007) :

$$d_{HT} = 4{,}61 \cdot \sqrt{\frac{\delta_p \cdot P_{v,sat} \cdot t_p}{\pi\, \xi}} \tag{5.23}$$

Où t_p [s] est la période (prise égale à 1 jour).

Par conséquent, si $\eta >> 1$, on peut affirmer que les effets hygrothermiques pour un matériau sont négligeables. En revanche, si $\eta << 1$, les effets hygrothermiques sont prépondérants dans la transmission de chaleur.

Le nombre adimensionnel η a été calculé pour la couche biosourcée de chaque système bicouche à chaque instant. Etant donné que les résultats ont une certaine variabilité en fonction du temps, la **Figure 5.29** présente la valeur moyenne de η pour chaque saison.

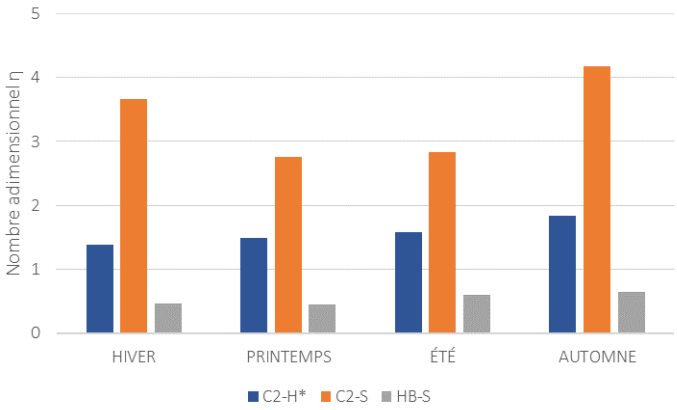


Figure 5.29 - Valeur moyenne de η par saison - Bourg Saint Maurice.

Il n'y a pas de grandes différences entre les quatre saisons : C2-S et C2-H* présentent des valeurs supérieures à 1, tandis que HB-S présente des valeurs inférieures à 1. Le **Tableau 5.14** montre la moyenne annuelle de η pour chaque matériau.

Tableau 5.14 : Moyenne annuelle de η - Bourg Saint Maurice.

Matériau	**Nb adimensionnel η**
C2-H*	1,57
C2-S	3,36
HB-S	0,53

Ces résultats montrent que les effets hygrothermiques sont légèrement plus importants que les effets de conduction dans le cas de HB-S, tandis qu'ils sont plus faibles dans le cas de C2-H* et, particulièrement, dans le cas de C2-S. Cependant, dans aucun cas peut-on dire que les effets hygrothermiques sont négligeables ou prépondérants, car ils sont quelle que soit la formulation considérée, du même ordre de grandeur que les effets de conduction.

Il existe néanmoins une bonne concordance entre les valeurs de η obtenues pour chaque matériau et les résultats trouvés précédemment. En effet, HB-S est relativement le

matériau le plus hygroscopique, C2-H* est le deuxième matériau le plus hygroscopique et C2-S est le moins hygroscopique. Etant donné que HB-S et C2-S ont la même quantité de moelle dans leur formulation, cela suggère que la présence de moelle n'est pas un facteur déterminant pour l'hygroscopicité d'un matériau. Au vu des résultats présentés dans la **Figure 5.28**, on constate que η rend compte de l'impact relatif du couplage hygrothermique sur les déperditions énergétiques, avec un effet hygrothermique sur les flux thermiques en surface plus important pour des valeurs de η réduites.

5.4.3.2. Influence du climat

Pour la simulation C2 (hygrothermique salle de bains), la densité de flux thermique à travers la surface intérieure des trois murs bicouche a été représentée dans la **Figure 5.30**, la **Figure 5.31** et la **Figure 5.32** pour les différents climats extrêmes : Bourg Saint Maurice et Nice. Le flux thermique est, comme prévu, plus important (en valeur absolue) à Bourg Saint Maurice qu'à Nice, car les températures sont moins élevées. En comparant la performance des trois ensembles bicouche exposés aux deux climats, on s'aperçoit que le mur béton + C2-H* à Nice donne des résultats comparables à ceux du mur HB-S à Bourg Saint Maurice. En effet, le climat est un facteur à prendre en considération dans l'utilisation locale des ressources issues de l'agriculture. Bien que le matériau HB-S soit le plus isolant, un matériau comme C2-H* peut suffire à couvrir les besoins d'isolation d'un bâtiment situé dans une région tempérée, notamment si le chanvre est disponible dans la région.

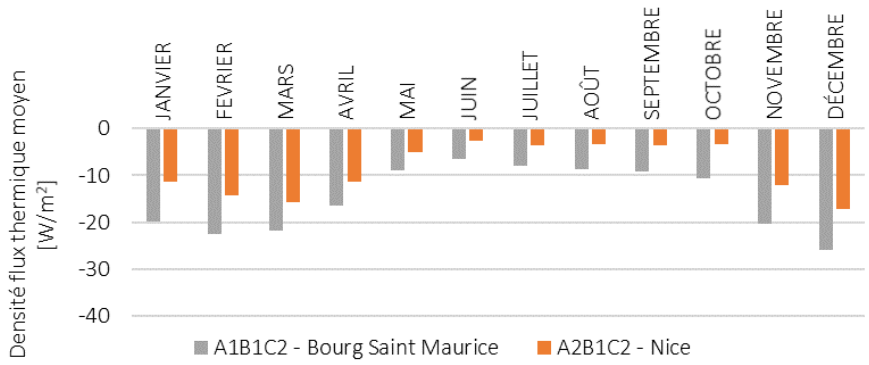


Figure 5.30 - Densité de flux thermique (moyenne mensuelle) – béton + C2-H*.

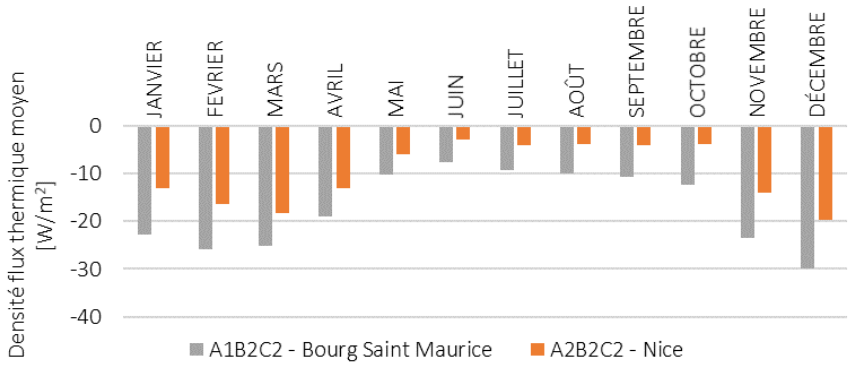


Figure 5.31 - Densité de flux thermique (moyenne mensuelle) - béton + C2-S.

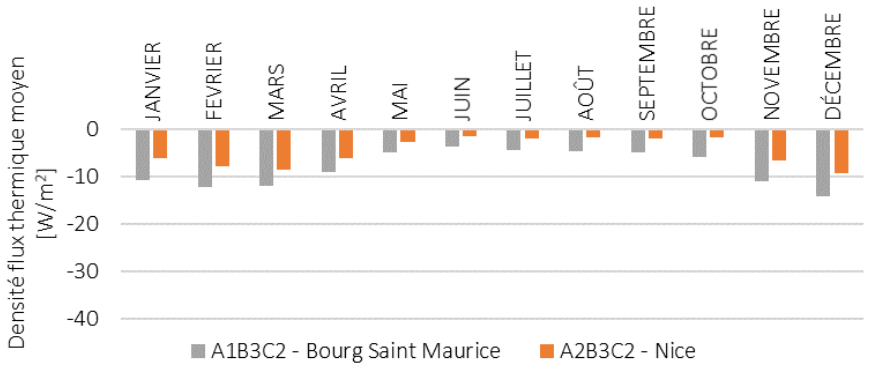


Figure 5.32 - Densité de flux thermique (moyenne mensuelle) – béton + HB-S.

Ensuite, on étudie la densité de flux hygrique pour les climats de Bourg Saint Maurice et Nice. Pour les trois matériaux, la valeur moyenne de cette densité (en valeur absolue) pendant la deuxième année est très semblable pour le climat de Nice et de Bourg Saint Maurice. La **Figure 5.33** présente les résultats du mur béton + HB-S. Pour la plupart des mois, les deux climats provoquent des densités de flux hygrique assez proches, la densité pour Bourg Saint Maurice étant modérément supérieure en moyenne.

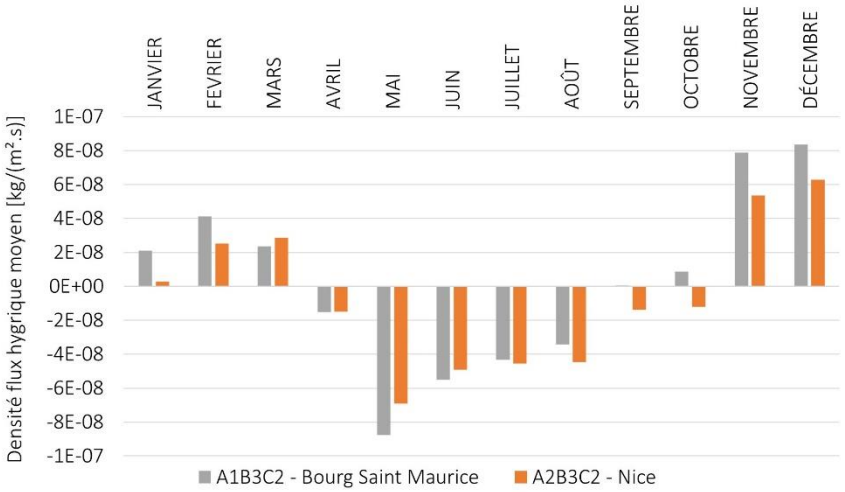


Figure 5.33 - Moyenne mensuelle de la densité de flux hygrique à travers la surface intérieure du mur bicouche béton + HB-S – Bourg Saint Maurice et Nice.

5.4.3.3. Influence des conditions intérieures sur le couplage hygrothermique

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact des effets de couplage hygrothermique sur les déperditions. Pour cela, il a été déterminé que le matériau HB-S, étant le plus hygroscopique, et le climat de Bourg Saint Maurice, qui provoque les densités de flux hygrique les plus importantes pour HB-S, sont les conditions de simulation qui mettront le plus en évidence les différences induites par le couplage des phénomènes thermiques et hygroscopiques.

La **Figure 5.34** représente la densité de flux thermique qui passe à travers la surface intérieure du mur béton + HB-S à Bourg Saint Maurice pendant la semaine du 25/12 au 31/12 pour les trois conditions hygrothermiques : simulation thermique sans couplage, simulation hygrothermique couplée avec les données d'humidité de la salle de bains et simulation hygrothermique couplée avec les données d'humidité MBV. La **Figure 5.35** représente les mêmes résultats mais sous la forme de différence de densité de flux thermique entre la simulation thermique et hygrothermique MBV et de différence entre la simulation thermique et hygrothermique salle de bains (de manière similaire à ce qui a été fait pour comparer entre eux les différents murs bicouches).

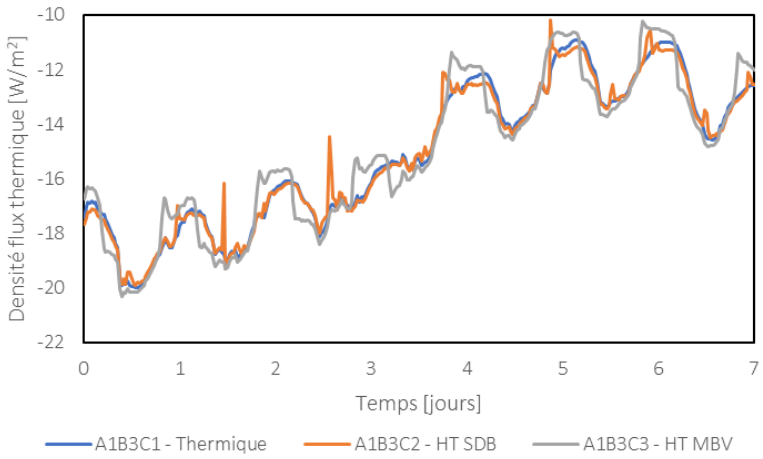


Figure 5.34 - Densité de flux thermique du 25/12 au 31/12 pour le mur béton + HB-S à Bourg Saint Maurice pour les trois conditions hygrothermiques.

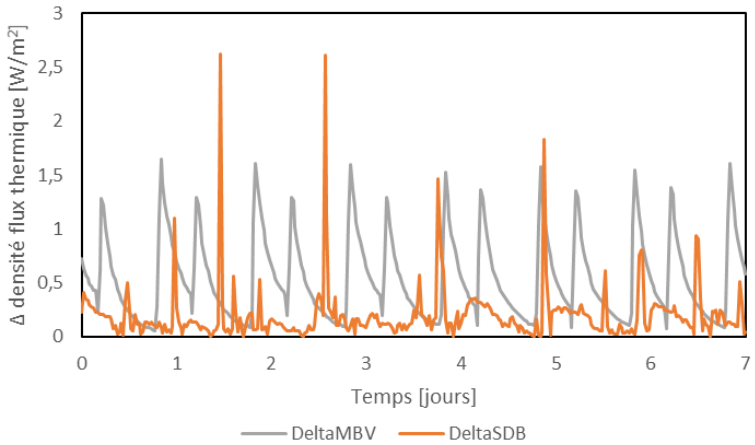


Figure 5.35 - Différence de densité de flux thermique pour le mur béton + HB-S à Bourg Saint Maurice entre la simulation thermique et MBV et entre la simulation thermique et salle de bains.

Dans le cas des simulations de type SDB, ces figures montrent que les pics d'humidité intérieure provoquent des différences de jusqu'à 2,7 W/m^2. Dans le cas actuel où le flux est négatif, cela se traduit par une diminution significative de sa valeur absolue. A

contrario, les baisses d'humidité étant plus progressives, elles n'impactent que très peu le flux thermique.

La même tendance est observée avec la simulation hygrothermique MBV lors des phases d'adsorption (c'est-à-dire lorsque l'humidité est élevée) avec des réductions de la valeur absolue du flux thermique en surface de l'ordre de 1,5 W/m². Cependant, lors des cycles MBV, les chutes d'humidités étant également rapides, l'inverse est observé lors des phases de désorption avec des augmentations de l'ordre de 1,5 W/m² de la valeur absolue du flux thermique en surface.

5.4.3.4. Influence des données d'entrée

Les graphiques précédents mettent en évidence la différence des résultats quand on utilise des données d'entrée réelles et des données d'entrée approximatives. En effet, les données d'humidité intérieure de type MBV 33-70 %HR génèrent des inexactitudes ponctuelles de la densité de flux thermique dont l'impact sur la performance énergétique globale est potentiellement élevé. La **Figure 5.36** montre la moyenne mensuelle de l'écart absolu entre la densité de flux thermique issue de la simulation hygrothermique salle de bains et de la simulation hygrothermique MBV pour le mur béton + HB-S.

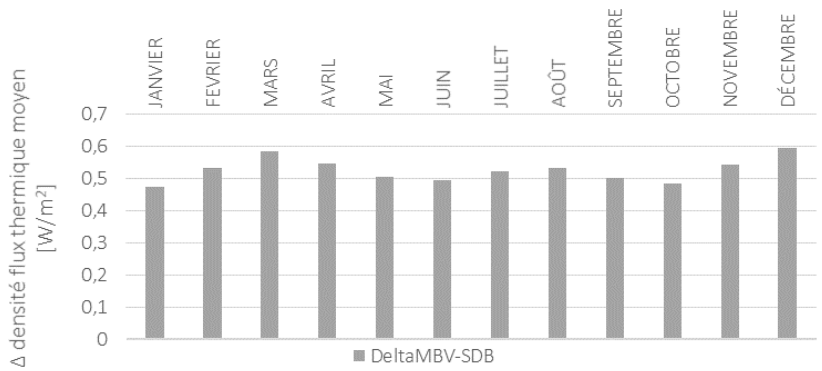


Figure 5.36 - Moyenne mensuelle de l'écart absolu entre la densité de flux thermique MBV et salle de bains pour HB-S - Bourg Saint Maurice.

Cet écart peut être apprécié dans la **Figure 5.37**. Comme expliqué précédemment il est principalement dû à la variation trop rapide d'humidité imposée lors des phases de désorption par la condition intérieure de type MBV, ce qui induit une surestimation des effets hygrothermiques associés.

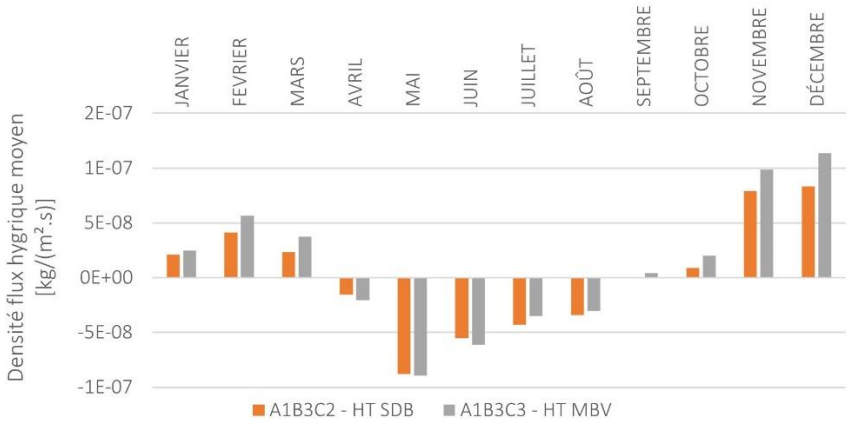


Figure 5.37 - Comparaison de la densité de flux hygrique MBV et salle de bains pour HB-S - Bourg Saint Maurice.

Par conséquent, cette approximation n'est pas souhaitable pour le calcul précis des échanges à travers la paroi mais elle est suffisante pour une estimation du flux hygrique.

5.4.3.5. Risque de condensation

Enfin, la différence de propriétés hygroscopiques et thermiques entre le béton classique et le béton biosourcé provoque une augmentation de l'humidité relative à l'interface entre les deux couches de matériau. L'air humide arrive de l'intérieur du bâtiment à une température élevée, traverse le matériau biosourcé qui a une grande perméance et une basse conductivité thermique, et arrive à l'interface avec le béton classique, qui présente une basse perméabilité à la vapeur et une grande conductivité thermique qui provoque qu'il ait une température proche de la température de l'ambiance extérieure. Cet écart de température et de perméance à l'interface conduit à des risques importants de condensation.

Dans cette étude, on considère qu'il y a des risques de condensation quand l'humidité relative à un point donné est égale à 100 % pendant au moins 6 heures. La **Figure 5.38** et la **Figure 5.39** montrent l'humidité relative à l'interface entre béton classique et béton biosourcé pour les trois murs bicouche et pour le climat de Bourg Saint Maurice et de Nice, respectivement. La configuration hygrothermique utilisée est C2 (hygrothermique salle de bains). Les valeurs d'humidité qui dépassent 100% sont dues aux conditions climatiques extérieures défavorables. Bien évidemment, l'humidité relative ne peut pas dépasser 100% physiquement parlant, mais nous avons choisi de représenter les résultats bruts de la simulation pour pouvoir mieux étudier le comportement du modèle dans le domaine super hygroscopique.

Tandis qu'il n'y a pas de risque de condensation pour aucun des trois systèmes bicouche dans le climat de Nice, le mur béton + C2-H* et le mur béton + HB-S présentent des risques de condensation pendant les périodes froides, notamment HB-S, pour lequel les risques sont très importants. Néanmoins, ces résultats sont à prendre avec précaution.

En effet, compte tenu des résultats du **Chapitre 4**, et vu les fortes humidités obtenues, il semblerait nécessaire de prendre en compte les variations des paramètres hygrothermiques avec la teneur en eau (en particulier δ_p et λ) afin de pouvoir conclure sur un éventuel risque de condensation et/ou de développement de moisissure aux interfaces.

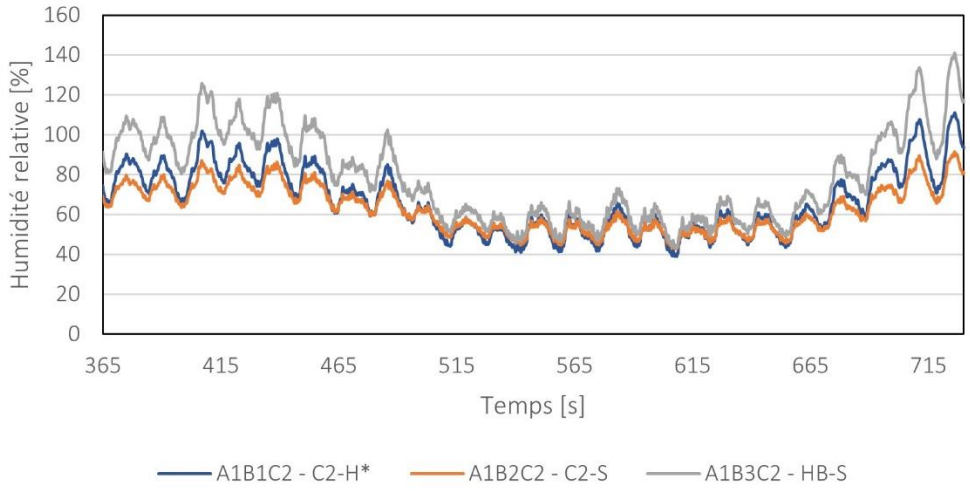


Figure 5.38 - Evolution annuelle de l'humidité relative à l'interface entre le béton classique et le béton biosourcé – Bourg Saint Maurice.

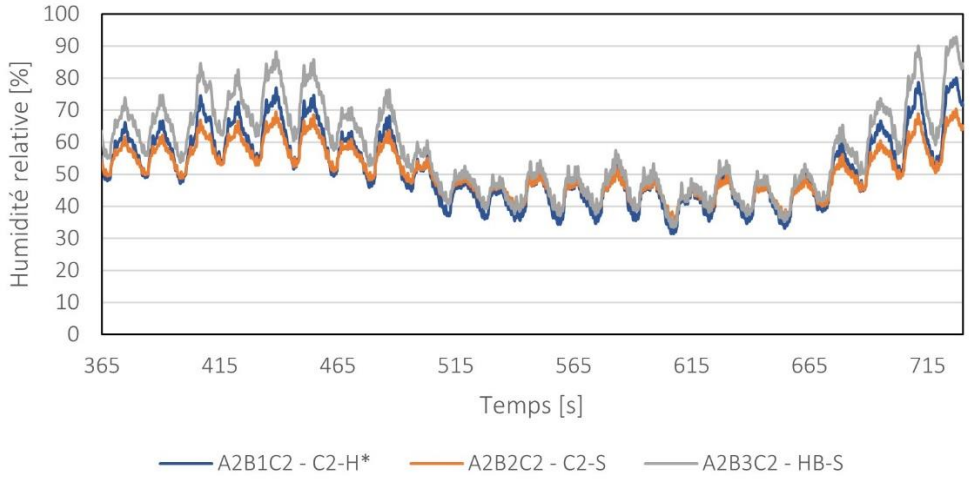


Figure 5.39 - Evolution annuelle de l'humidité relative à l'interface entre le béton classique et le béton biosourcé – Nice.

5.5. Conclusion

Un modèle mathématique des transferts couplés de masse et de chaleur a été proposé en s'appuyant sur le modèle proposé dans le cadre de la thèse de M. Y. Ferroukhi (Ferroukhi, 2015). Les résultats permettent de caractériser le pouvoir isolant de plusieurs matériaux étudiés en fonction de leur pouvoir hygroscopique. Ils mettent en évidence

l'impact modéré des phénomènes de couplage, mais cet impact peut être sous-estimé par certaines hypothèses du modèle.

D'abord, on suppose un contact hydraulique entre les deux couches de béton, donc une interface parfaite qui ne peut pas avoir lieu dans la réalité. Ensuite, la simulation doit être perfectionnée pour prendre en compte l'impact de la variation de la teneur en eau sur les propriétés des matériaux comme la conductivité, la chaleur spécifique et la perméabilité à la vapeur, qui ont été étudiées lors du Chapitre 4 mais dont la variation n'a pas pu être intégrée dans la présente étude par manque de temps. Son intégration est prévue dans un travail postérieur à ce projet de thèse, ainsi que la validation expérimentale du modèle avec un ensemble multicouche au lieu de monocouche. Pour ces raisons, les résultats de cette étude doivent être pris avec précaution. Ils donnent néanmoins des informations de valeur concernant la performance des différents matériaux soumis à des climats extrêmes et ils établissent la base pour une future étude encore plus exhaustive.

Enfin, le nombre adimensionnel η est un premier pas pour évaluer le besoin de prendre en compte les couplages hygrothermiques dans l'étude thermique d'une paroi. L'étape suivante sera la réalisation de simulations à l'échelle du bâtiment pour prédire correctement l'impact des matériaux sur la performance énergétique d'un bâtiment.

Chapitre 6 : Étude de la perturbation induite par les appareils de mesure sur les mesures hygrothermiques à travers une paroi - Application pratique de la simulation numérique

Table des matières

6.1 Introduction 229
6.2 Matériaux 230
6.3 Mise au point de l'étude expérimentale 230
6.4 Mise au point de l'étude numérique 232
6.5 Résultats 234
6.5.1 Résultats expérimentaux 234
6.5.2 Résultats de la simulation 234
6.6 Conclusion 238

6.1. Introduction

Dans ce chapitre, une application pratique du modèle mathématique proposé dans le Chapitre 5 est présentée. On s'intéresse à l'impact de la présence des fluxmètres sur la mesure de flux thermique à travers une paroi du fait de l'imperméabilité (totale ou partielle) et la résistance thermique de ces appareils de mesure, en mettant en avant l'effet du couplage hygrothermique.

Les fluxmètres thermiques sont utilisés pour mesurer le flux d'énergie thermique à travers un matériau. Ils sont constitués d'une thermopile (un groupe de thermocouples connectés en série) qui mesure le gradient thermique à sa surface et fournit un signal électrique proportionnel à celui-ci. Les fluxmètres sont également appelés "transducteurs de flux thermique" et il en existe plusieurs sortes comme les plaques de flux thermique, les capteurs de flux thermique sous forme de feuille, les jauges Gardon et les pyranomètres, entre autres. La plupart d'entre eux sont imperméables, rajoutent une certaine résistance thermique, et sont collés à la surface du matériau, généralement un sur chaque face, avec de la pâte thermique. Étant donné que le capteur a une surface non négligeable qui se superpose à l'élément étudié, il peut perturber les échanges de chaleur et de vapeur d'eau à travers le matériau dans la zone qu'il couvre et à sa proximité. Cette perturbation doit être prise en compte lors du choix du type de capteur pour chaque utilisation, notamment lors de l'étude des parois qui sont constituées de matériaux poreux tels que les composites biosourcés, dans lesquels les échanges de vapeur ont un rôle très important (T. Colinart et al., 2017; Moujalled et al., 2018; Sáez-Pérez et al., 2020; Anh D. Tran Le et al., 2020).

La question de l'impact des fluxmètres sur la mesure a été soulevée par plusieurs études telles que (Gidik et al., 2016), qui développe un fluxmètre en textile poreux à usage sur des personnes qui évite l'imperméabilité et la rigidité ; (Niedermann et al., 2014), qui explique l'importance de l'étalonnage en fonction du type de capteur et de l'utilisation et qui recommande un capteur qui soit conducteur thermique, ou encore (Vafai et al., 1985), qui étudie l'effet d'une frontière imperméable sur le transfert de chaleur dans un milieu poreux.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'influence de la présence d'un fluxmètre sur le flux thermique traversant une paroi en béton de chanvre, ainsi que d'étudier son influence sur le profil d'humidité et de température au sein du matériau, et de proposer un facteur correctif. A cette fin, une étude est menée sur un échantillon de béton de chanvre C1-H à l'aide de deux fluxmètres : un fluxmètre Hukseflux HFP03 de type disque plein et un fluxmètre Captec de type plaque de cuivre trouée. Une variation de l'humidité relative est imposée à température constante. Etant donné que les transferts de masse et de chaleur sont couplés, la variation de l'humidité relative se traduit par une variation de flux thermique. La réponse des ensembles échantillon + fluxmètre à cette sollicitation est étudiée de manière expérimentale et par le biais d'une simulation numérique.

6.2. Matériaux

Les différentes mesures ont été effectuées sur le couple liant-chènevotte C1-H. Pour rappel, le liant C1 est du PF70 et la chènevotte (H) provient d'une coopérative agricole du nord de la France et a une masse volumique en vrac de 100 kg/m^3. L'échantillon a été projeté en une seule couche dans un moule de 35x35x15 cm à 23 °C et 50 %HR et séché selon les recommandations de (Association construire en chanvre & Fédération Française du Bâtiment, 2009), puis stocké dans une pièce à 23 °C et 50 %HR. L'épaisseur de l'échantillon a été choisie pour représenter l'épaisseur maximale que les matériaux biosourcés atteignent généralement dans les applications sur site et pour fournir les profils de température et d'humidité les plus complets. Un seul échantillon a été utilisé pour les différents tests.

Les paramètres utilisés pour le béton C1-H et pour les deux fluxmètres dans le cadre de la simulation numérique sont présentés dans le Tableau

Tableau 6.1 - Paramètres des matériaux dans la simulation.

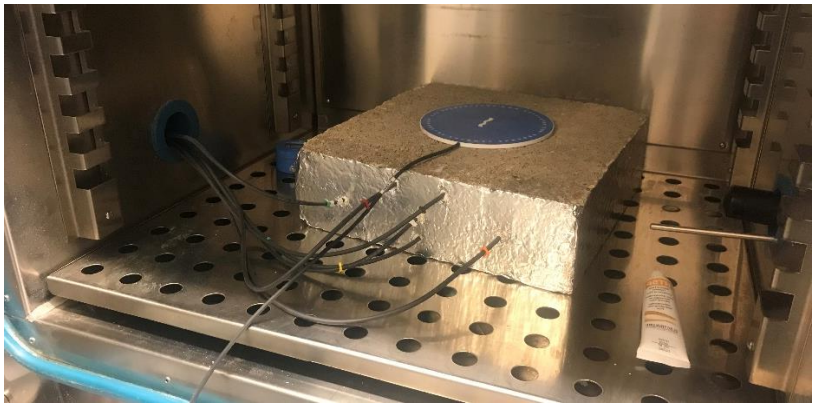
Paramètres	Unités	Valeurs pour C1-H	Valeurs pour Hukseflux	Valeurs pour Captec
ξ_{33-75}	kg/m^3	57	0	0
C_p	J/kg·K	1285	1800	385
ρ_{sec}	kg/m^3	470	880	8960
λ	W/(m·K)	0,147	0,76	380
δ_p	kg/(m·s·Pa)	2,21E-11	1E-15	1E-15

6.3. Mise au point de l'étude expérimentale

La procédure expérimentale a été conçue pour observer la réponse hygrothermique d'une paroi, c'est-à-dire, les effets du transfert de chaleur et de masse, à température constante. À cette fin, l'échantillon a été enveloppé dans du scotch d'aluminium, à l'exception de la surface supérieure, pour établir un flux hygrothermique unidirectionnel, de la même manière que dans le cadre de la procédure de mesure de la valeur tampon hydrique MBV. Des capteurs d'humidité et de température ont été placés à l'intérieur de l'échantillon et au centre de la surface supérieure ; la disposition est illustrée dans la **Figure 6.1** et la **Figure 6.2**. Ensuite, l'échantillon est placé dans une enceinte climatique dont les conditions initiales sont de 23 °C et 50 %HR.

Lorsque tous les capteurs montrent une différence de moins de 1 %HR entre deux mesures effectuées à 24 heures d'intervalle, le fluxmètre peut être fixé à l'échantillon et le test démarre. Ensuite, l'enceinte fait varier l'humidité relative suivant un cycle MBV (8h à 75 %HR et 16h à 33 %HR) pour évaluer la réponse transitoire du matériau pendant 2 semaines. Le choix du cycle MBV est motivé par son parallélisme avec les conditions réelles d'humidité dans une habitation.

Pour le premier test, le fluxmètre Hukseflux HFP03 est placé au centre de la surface supérieure de l'échantillon et collé à l'aide de pâte thermique (voir **Figure 6.1**). Ce fluxmètre est un disque de 16 cm de diamètre et a une épaisseur de 5 mm. Il est fait d'un composite céramique-plastique, il présente une résistance thermique de 71x10^{-4} K/(W/m^2) et est très peu perméable.



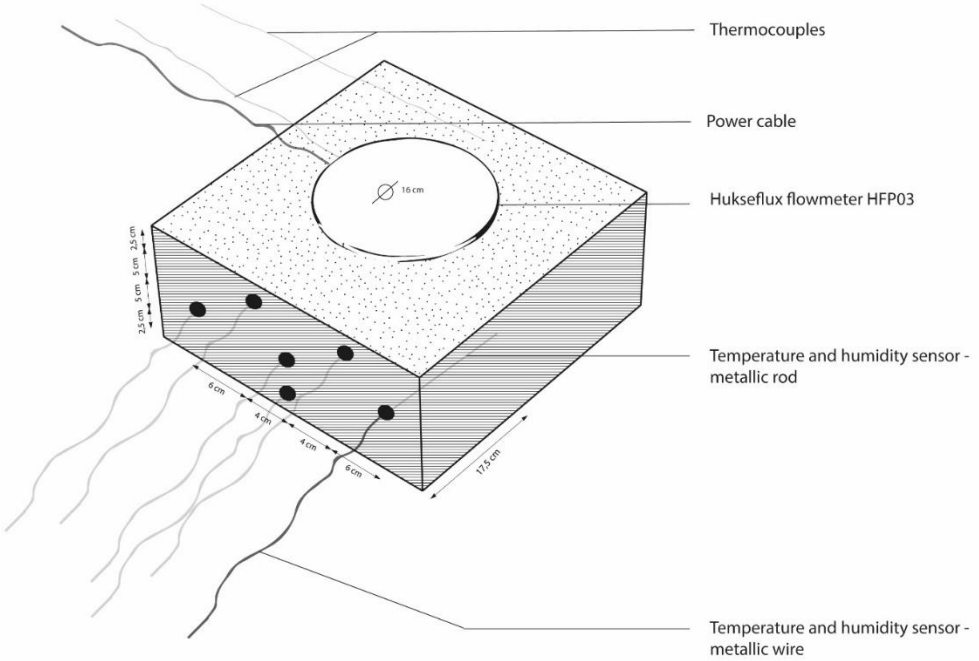


Figure 6.1 - Instrumentation pour le test du fluxmètre plein.

Pour le deuxième test, le fluxmètre Captec est placé sur la surface de l'échantillon et fixé en utilisant de la pâte thermique, comme le montre la **Figure 6.2**. Ce capteur est une fine plaque de cuivre de 30x30 cm et d'une épaisseur de 0,1 mm, qui a 144 perforations uniformément réparties, chacune d'un diamètre de 2 cm. Le fluxmètre est donc perméable, car la vapeur peut se transférer à travers les perforations et il présente une résistance thermique d'environ 2,6x10^{-7} K/(W/m^2), presque 30 000 fois inférieure à celle du capteur Hukseflux.

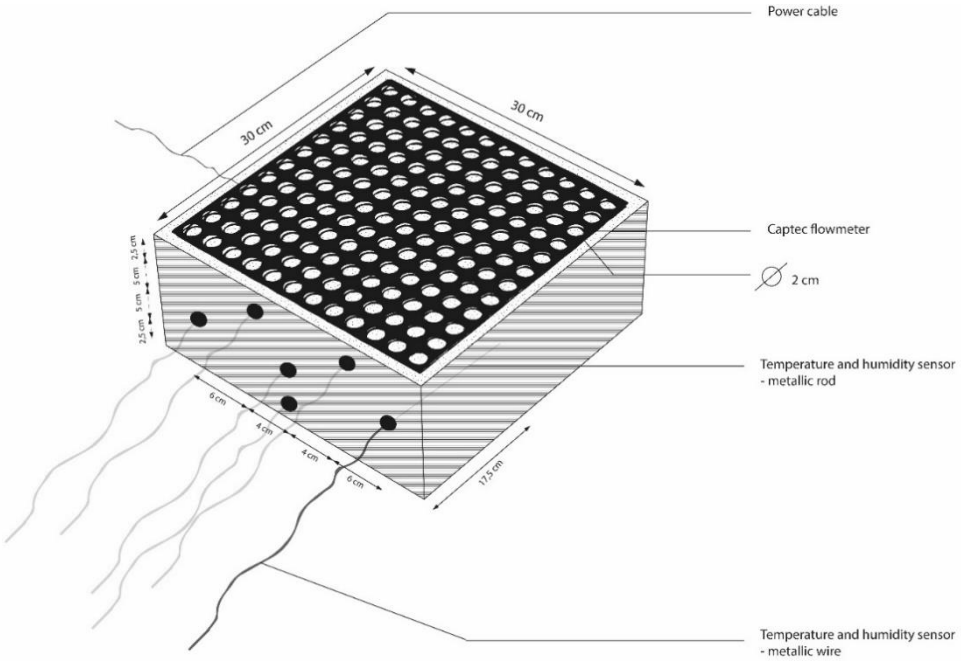


Figure 6.2 - Instrumentation pour le test du fluxmètre perforé en cuivre.

Les valeurs de température et d'humidité mesurées par les capteurs, ainsi que le signal fourni par les fluxmètres, doivent ensuite être étudiées et comparées afin d'évaluer l'impact des différents appareils de mesure du flux thermique.

6.4. Mise au point de l'étude numérique

Le modèle présenté dans le **Chapitre 5** a été utilisé pour la partie numérique de cette étude.

Conditions aux limites et conditions initiales

Les conditions aux limites adoptées sont les suivantes :

- La température extérieure est constante à 23°C (conditions isothermes) et l'humidité relative extérieure est variable.
- Les conditions aux limites en P_v sont de type Neumann lorsque l'échantillon est en contact avec l'air extérieur et de type flux nul lorsque l'échantillon est en contact avec le fluxmetre, soit (en prenant $k_m = \delta_p$):

  $\delta_p \, \vec{\nabla}(P_v) \cdot \vec{e}_z = h_m(P_{v,ext} - P_v)$ au niveau de la surface extérieure en contact avec l'air extérieur

  $\delta_p \, \vec{\nabla}(P_v) \cdot \vec{n} = 0$ au niveau des autres surfaces, $\vec{n}$ étant le vecteur unitaire sortant à la surface.

- Les conditions limites en T sont également de type Neumann, ce qui donne :

  $\left(\lambda \, \vec{\nabla}(T) + L_v \, \delta_p \, \vec{\nabla}(P_v)\right) \cdot \vec{e}_z = h_c(T_{ext} - T) + L_v \, h_m(P_{v,ext} - P_v)$ au niveau de la surface extérieure en contact avec l'air extérieur

  $\left(\lambda \, \vec{\nabla}(T) + L_v \, \delta_p \, \vec{\nabla}(P_v)\right) \cdot \vec{n} = h_c(T_{ext} - T)$ au niveau des autres surfaces, $\vec{n}$ étant le vecteur unitaire sortant à la surface.

- La variation des propriétés du matériau (conductivité thermique, chaleur spécifique, perméabilité à la vapeur) avec la teneur en eau n'est pas prise en considération.

Les conditions initiales de température et d'humidité relative sont 23 °C et 50 %HR, respectivement.

Etudes de cas

L'échantillon monocouche en C1-H décrit dans la **§6.2** est soumis à un cycle MBV (8h à 75 %HR et 16h à 33 %HR) à température constante. Trois cas de figure sont considérés :

- Cas 1 : l'échantillon sans fluxmètre.
- Cas 2 : le fluxmètre Hukseflux est placé au centre de la surface supérieure de l'échantillon.
- Cas 3 : le fluxmètre Captec est placé sur la surface supérieure de l'échantillon.

Implémentation dans le code de calcul

L'étude a été menée à l'aide du module PDE du code de calcul COMSOL *Multyphisics* en 3 dimensions. Chaque simulation a une durée de 2 semaines.

Les calculs ont été réalisés avec les paramètres suivants :
- Pas de temps : adaptatif et compris entre 0,001s et 0,1s.
- Maillage : de type extra fin.
- Tolérance relative sur les variables : 0,0001.

6.5. Résultats

6.5.1. Résultats expérimentaux

En raison de la crise sanitaire liée à l'épidémie de COVID-19, l'étude expérimentale n'a pas pu être finalisée. L'échantillon a été dûment instrumenté mais l'enceinte thermique a rencontré des problèmes récurrents du maintien de l'humidité relative selon les consignes données et n'a pas pu être réparée à temps en raison des restrictions liées à la crise sanitaire. Par conséquent, les résultats expérimentaux ne sont pas disponibles et ne pourront pas être comparés aux résultats de l'étude numérique.

6.5.2. Résultats de la simulation

Les **Figures 3-5** montrent la température (A) et la pression de vapeur (B) des trois cas simulés, deux semaines après le début des cycles MBV. A cet instant, l'humidité relative est imposée à 33 %. Ces deux variables sont représentées selon 5 plans de découpe qui contiennent les points qui correspondent à la position des capteurs dans l'étude expérimentale.

La **Figure 6.3A**, la **Figure 6.4A** et la **Figure 6.5A** mettent en évidence que la présence du Hukseflux provoque une diminution d'environ 1,3 K au centre de la surface supérieure par rapport à l'échantillon sans fluxmètre. L'impact est plus faible pour l'échantillon équipé du fluxmètre Captec, avec une variation de température de surface inférieure à 0,5 K.

En comparant la **Figure 6.3B**, la **Figure 6.4B** et la **Figure 6.5B**, il est possible de constater que la présence des fluxmètres induit également des champs différents de la pression de vapeur. A l'instant étudié ($t = 1{,}296 \cdot 10^6$ s), l'échantillon subit une diminution de P_v qui est plus aigüe à proximité des zones de la surface supérieure qui ne sont pas couvertes par les fluxmètres. L'écart de pression de vapeur entre simulations, qui n'apparaît que dans la partie supérieure de l'échantillon, est particulièrement important au centre de la surface supérieure entre l'échantillon sans fluxmètre et l'échantillon avec le fluxmètre Hukseflux, où l'on trouve des valeurs d'environ 1450 Pa et 2050 Pa, respectivement.

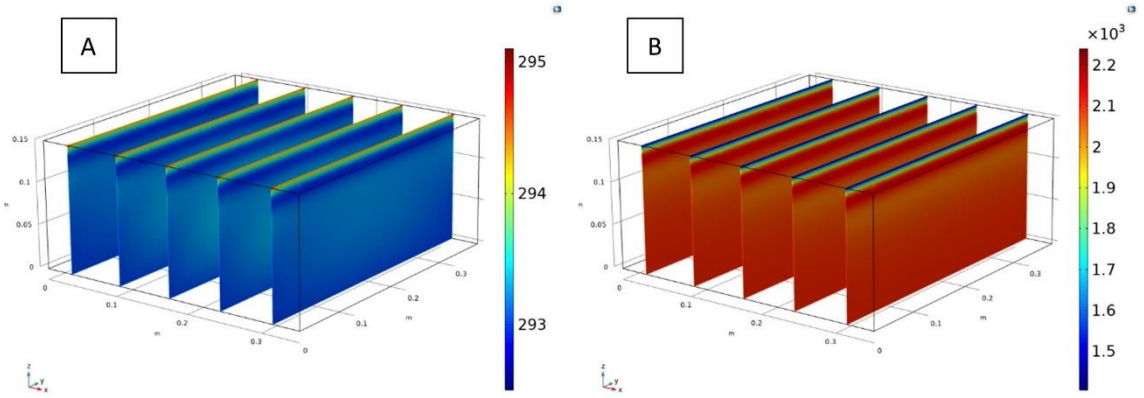


Figure 6.3 - Température (A) et pression de vapeur (B) dans l'échantillon sans fluxmètre.

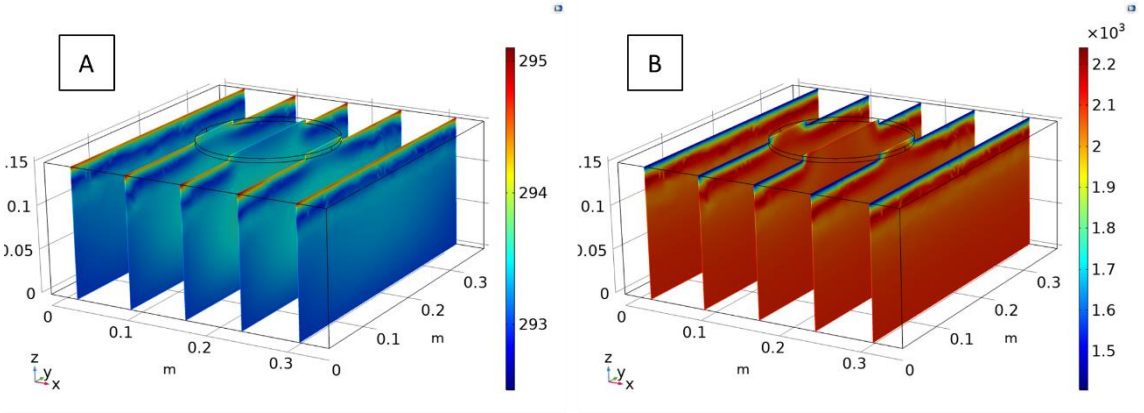


Figure 6.4 - Température (A) et pression de vapeur (B) dans l'échantillon avec fluxmètre Hukseflux de type disque.

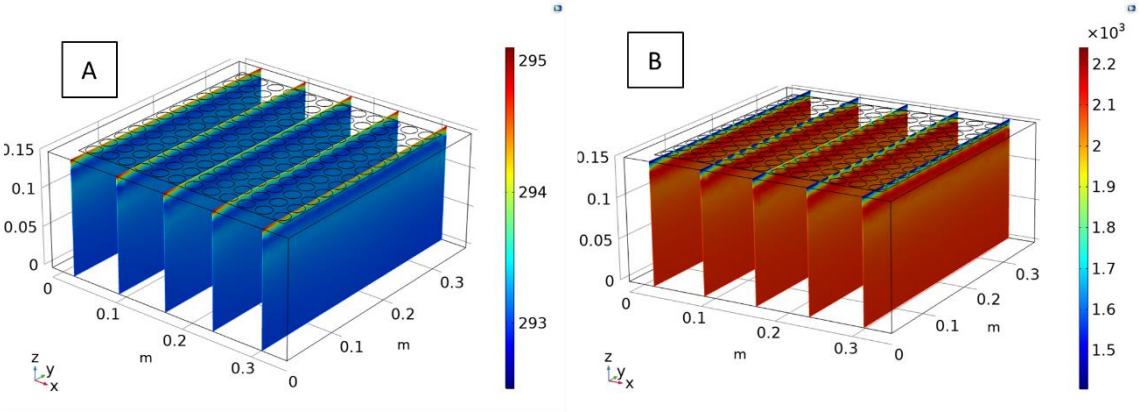


Figure 6.5 - Température (A) et pression de vapeur (B) dans l'échantillon avec fluxmètre Captec de type plaque en cuivre perforée.

Cette différence entre les champs de pression de vapeur, rajoutée à la résistance thermique intrinsèque à chaque fluxmètre, provoque que la densité de flux thermique à travers la surface supérieure de l'échantillon soit différente pour chaque cas simulé, ce qui peut être observé dans la **Figure 6.6**. Cette dernière est calculée suivant la relation :

$$\lambda\, \overrightarrow{grad}(T(x,y,z_S) \cdot \vec{e}_z = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z}(x,y,z_S) \qquad (6.1)$$

Avec x, y et z les coordonnées suivant $\vec{e}_x$, $\vec{e}_y$ et $\vec{e}_z$ ($\vec{e}_z$ étant le vecteur unitaire normal sortant à la surface supérieure), λ la conductivité thermique de l'échantillon et z_S=0,15 m la position suivant z de la surface supérieure.

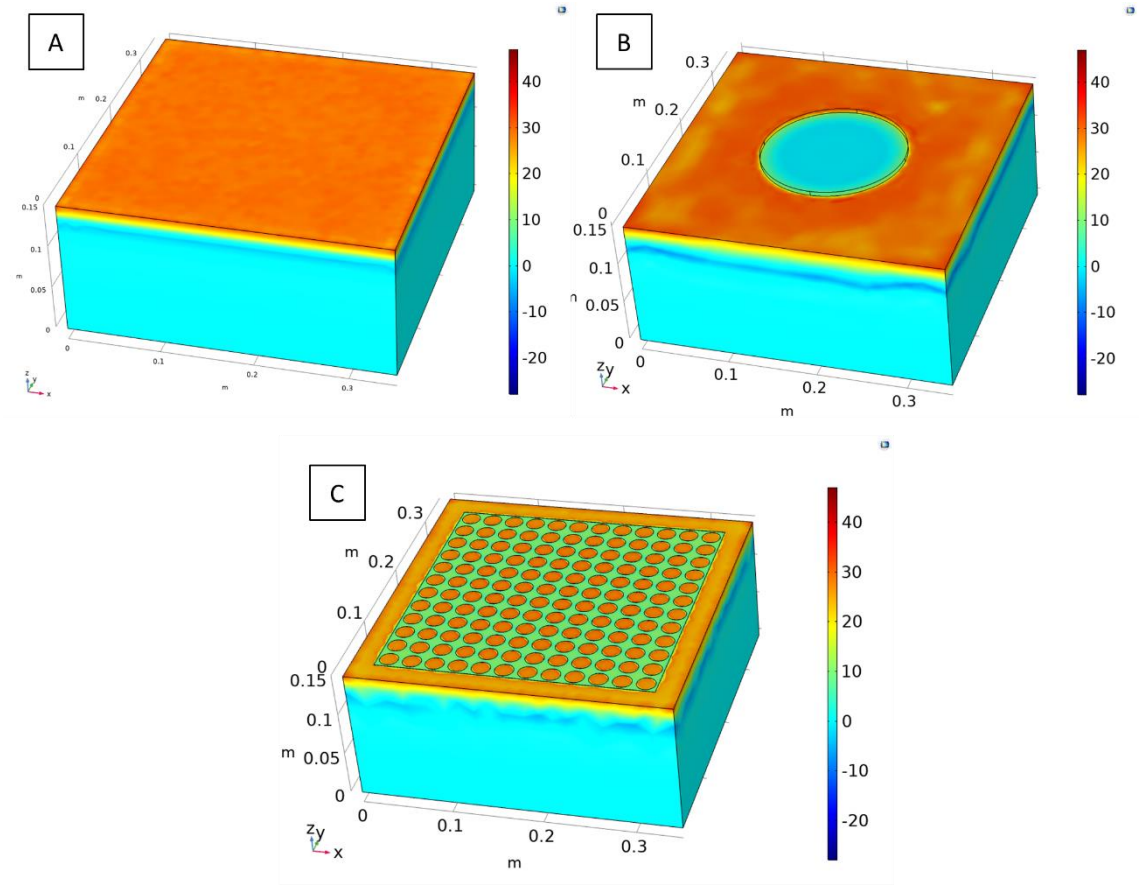


Figure 6.6 - Densité de flux thermique [W/m²] à travers la surface de l'échantillon sans fluxmètre (A), de l'échantillon avec le fluxmètre Hukseflux de type disque (B) et de l'échantillon avec fluxmètre Captec de type plaque en cuivre perforée (C) à la fin du dernier cycle HR.

A titre d'exemple, à la fin du dernier cycle HR, la densité de flux thermique de l'échantillon sans fluxmètre est uniforme sur toute la surface supérieure avec une valeur moyenne de 29 W/m². A contrario, d'importantes hétérogénéités apparaissent en présence des capteurs. La densité de flux moyenne correspondante à la surface couverte par les fluxmètres est de 1,4 W/m² pour le Hukseflux et de 7,8 W/m² pour le Captec. La **Figure 6.7** montre l'évolution du ratio entre la valeur moyenne du flux thermique sur la surface couverte par chaque fluxmètre et la valeur moyenne du flux thermique sur toute la surface supérieure de l'échantillon simulé sans fluxmètre. On remarque que le fluxmètre de type Hukseflux gomme quasiment tous les effets hygrothermiques. De son côté, le fluxmètre de type Captec tend seulement à les minorer. A titre informatif, la **Figure 6.8** montre les résultats de densité de flux à partir desquels sont calculés les ratios de la **Figure 6.7**.

L'impact de la présence des capteurs sur le flux thermique est par conséquent très important, notamment pour le capteur Hukseflux, qui provoque une diminution drastique

de la valeur de densité de flux thermique due aux effets hygrothermiques. Néanmoins ce calcul purement théorique reste à être validé expérimentalement. En effet, l'interface entre les fluxmètres et l'échantillon a été considérée parfaite, ce qui n'est très certainement pas le cas dans la réalité. La prise en compte de conditions d'interfaces plus réalistes, comprenant notamment la présence de pâte thermique entre l'échantillon et le fluxmètre, pourrait significativement modifier les résultats obtenus.

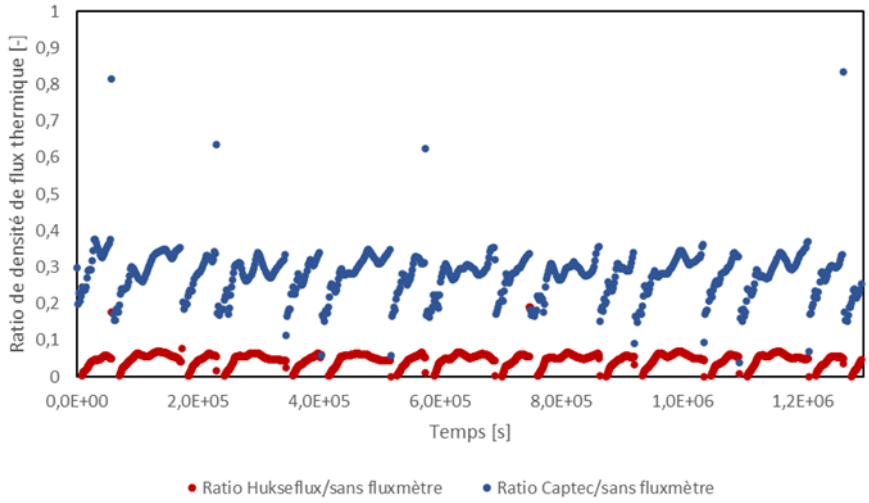


Figure 6.7 - Evolution temporelle du ratio entre la moyenne de la densité de flux thermique sur la surface couverte par le fluxmètre et la moyenne de la densité de flux thermique sur toute la surface supérieure de l'échantillon sans fluxmètre.

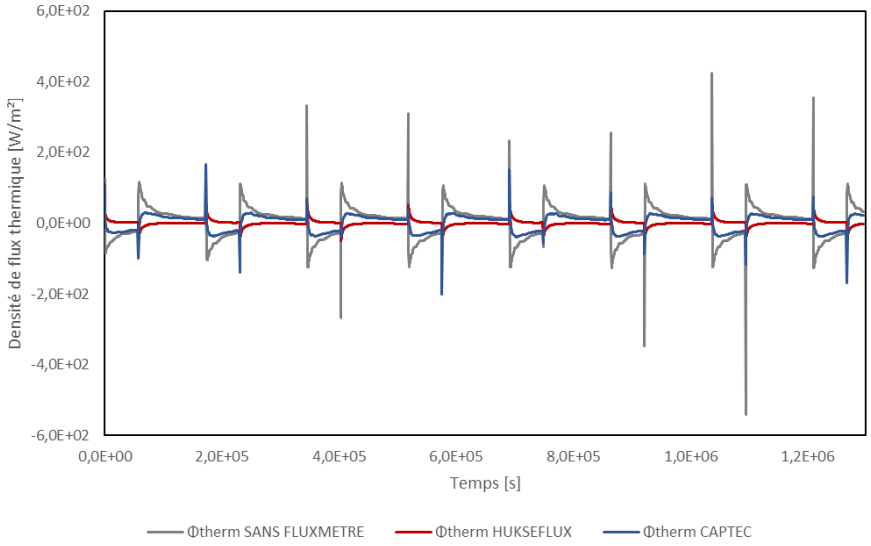


Figure 6.8 - Evolution temporelle de moyenne de la densité de flux thermique sur la surface couverte par le fluxmètre.

6.6. Conclusion

L'étude numérique du flux thermique en présence de deux types de fluxmètres a mis en évidence l'impact très important de ces appareils de mesure. Les résultats suggèrent que l'utilisation d'un fluxmètre troué et à faible résistance thermique est préférable en termes de perturbation du flux thermique. Si les valeurs de température, pression de vapeur et densité de flux sont confirmés par l'étude expérimentale, cela permettrait de proposer un facteur de correction à partir des valeurs moyennes de flux thermiques déterminées aux différents instants.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de thèse a pour objet la caractérisation de nouveaux matériaux biosourcés pour la construction, un domaine très focalisé sur le béton de chanvre. La moelle de tournesol et de maïs sont présentées comme deux ressources végétales largement disponibles, à fort potentiel isolant, forte porosité et faible densité qui pourraient constituer une solution pour l'isolation de bâtiments anciens construits en matériaux non-conventionnels, car ils requièrent des matériaux légers qui n'obstruent pas les échanges de vapeur.

Plusieurs formulations de béton de moelle ont été caractérisées à l'échelle macroscopique en parallèle à des bétons de chanvre pour constater que, si ces matériaux n'ont pas une résistance mécanique élevée, ils présentent une perméabilité à la vapeur importante et un grand pouvoir isolant pour les mélanges à faible masse volumique, les caractéristiques des bétons de moelle de maïs et de tournesol étant très semblables. De plus, ces propriétés ne dépendent pas de la provenance géographique ni de l'année de récolte de la moelle, ce qui faciliterait une future standardisation des produits dérivés. Cette première campagne expérimentale a mis en évidence que les couples liant-moelle étudiés, choisis par un organisme externe, provoquent une atténuation des propriétés hygrothermiques de la moelle qui pourrait être expliquée par des interactions entre les deux composants, comme par exemple des altérations de la microstructure ou de la prise du liant.

Pour éclaircir cette question, une caractérisation du réseau poreux des bétons et des agrégats est réalisée à l'aide des méthodes BET et BJH de mesure de la surface spécifique et de la distribution de la taille des pores allant de 2 à 100 nm et à l'aide de mesures acoustiques. La caractérisation acoustique a révélé de possibles parallélismes entre la microstructure et les propriétés à l'échelle macroscopique, ce qui a motivé étude comparative des propriétés hygrothermiques et des paramètres géométriques. Cette étude a donné lieu à deux relations, une première entre la conductivité thermique et la porosité intergranulaire, et une deuxième entre la perméabilité à la vapeur et la perméabilité à l'air de plusieurs échantillons de béton de moelle et béton de chanvre, ainsi que des agrégats correspondants dans le cas de la relation entre perméabilités. Ces propriétés ont un point commun : les phénomènes impliqués sont régis par les caractéristiques des macropores. D'autre part, l'effet atténuant du liant se manifeste également dans les propriétés acoustiques des bétons de moelle, qui sont tout de même comparables aux propriétés du béton de chanvre.

Les résultats BET et BJH, puisqu'ils ne caractérisent que les pores de plus petite taille, sont plutôt en lien avec le comportement des matériaux en sorption. Les propriétés hygrothermiques des bétons subissent des altérations importantes en présence d'humidité. La variation de la conductivité et l'effusivité thermiques, de la chaleur spécifique et de la perméabilité à la vapeur a été déterminée pour des bétons de chanvre et de moelle dans

le but de la comparer à d'autres matériaux de construction et de l'exploiter dans le cadre de futures simulations numériques. Une augmentation des quatre propriétés avec l'humidité a été constatée, plus prononcée pour le béton de moelle que pour le béton de chanvre. L'étude de la chaleur spécifique a mis en évidence la différence entre les propriétés de l'eau libre et de l'eau liée au sein du matériau.

Après une étude exhaustive des propriétés à l'échelle matériau, une étude à l'échelle du mur a été réalisée à l'aide de la simulation numérique avec l'outil COMSOL Multiphysics, où un modèle mathématique de transferts couplés de masse et de chaleur proposé à partir du modèle présenté dans la thèse de M.Y. Ferroukhi a été implémenté après validation expérimentale et numérique. L'impact des effets latents sur le flux thermique traversant des ensembles bicouche composés de béton classique et de béton biosourcé a été analysé en fonction des conditions intérieures et extérieures et en fonction des matériaux. Les effets hygrothermiques, qui ne sont pas négligeables pour aucun des matériaux étudiés qui ne représentent pas une partie importante du flux thermique, sont du même ordre de grandeur dans les bétons de moelle et de chanvre. Cependant, cette modélisation repose sur un nombre d'hypothèses et de simplifications qui obligent à interpréter les résultats avec précaution. Elle a néanmoins été utilisée dans le cadre d'une étude comparative entre deux types de fluxmètres. Le but de cette étude était d'explorer par la voie expérimentale et numérique l'effet de la présence des fluxmètres sur le flux thermique induit par les phénomènes de couplage avec le transfert de masse. En raison de la situation sanitaire exceptionnelle, la partie expérimentale de l'étude n'a pas pu être achevée à temps, mais l'exploitation des résultats de la simulation suggère des perturbations du flux significatives induites par les fluxmètres, notamment par le fluxmètre de type disque, qui est imperméable et qui a une résistance thermique relativement importante.

Par conséquent, plusieurs pistes de recherche sont ouvertes à la suite de ce travail de thèse. D'une part, les résultats obtenus ont montré que la moelle présente un potentiel hygroscopique plus réduit que celui de la chènevotte, un comportement qui pourrait être favorable vis-à-vis des risques de développement fongique. Une étude sur ce phénomène serait nécessaire pour déterminer la durabilité des bétons de moelle. Ensuite, le lien trouvé entre certaines propriétés hygrothermiques et des paramètres géométriques issus des mesures acoustiques constitue un premier pas vers la caractérisation indirecte de propriétés qui demandent aujourd'hui des moyens de mesure dédiés, parfois coûteux et souvent très chronophages. Pour aboutir à cette caractérisation, il serait nécessaire de mener une campagne expérimentale de plus grande ampleur en incluant d'autres matériaux biosourcés et notamment à double échelle de porosité pour valider cette approche et établir ses limitations.

D'autre part, la simulation numérique est susceptible d'être optimisée en incluant la variation des propriétés hygrothermiques avec la teneur en eau, ainsi qu'en prenant en considération la perméabilité à l'eau liquide, qui a été observée être non négligeable. De la même manière, le couplage avec un logiciel BES permettrait de quantifier les effets des

transferts couplés sur les déperditions thermiques et sur le confort en humidité à l'intérieur de l'habitat à l'échelle du bâtiment. Enfin, l'étude numérique menée au sujet de l'impact des fluxmètres sur le flux thermique nécessite une confrontation à des résultats expérimentaux au vu des limitations du modèle numérique, mais pourrait être à la base d'une proposition d'un facteur de correction pour la mesure fournie par plusieurs types de fluxmètres, en particulier pour des études en relation à des matériaux dont les effets hygrothermiques sont importants.

Bibliographie

Abahri, K. (2012). *Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de construction.* Université de La Rochelle.

Abahri, K., Belarbi, R., Oudjehani, N., Issaadi, N., & Ferroukhi, M. (2013). Total Pressure Gradient Incidence on Hygrothermal Transfer in Highly Porous Building Materials. *Advanced Materials Research*, *772*.

Abdellatef, Y., & Kavgic, M. (2020). Thermal, microstructural and numerical analysis of hempcrete-microencapsulated phase change material composites. *Applied Thermal Engineering*, *178*(May), 115520. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115520

Abdou, A., & Budaiwi, I. (2013). The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content. *Construction and Building Materials*, *43*, 533–544. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.058

Abdul Mulok, M. Z., Mohd Solong, A. A., Mat Ali, W. N. A. N. W., Hamid, R., & Kasmuri, M. (2018). Engineering Properties and Impact Resistance of Kenaf and Rice Straw Fibres Reinforced Concrete. *Jurnal Kejuruteraan*, *1*(5), 71–76.

ABNT Associaçao Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 15220-2: 2005–Thermal Performance in Buildings Part 2: Calculation Methods of Thermal Transmittance, Thermal Capacity, Thermal Delay and Solar Heat Factor of Elements and Components of Buildings.*

Abu-Hamdeh, N. H. (2003). Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering*, *86*(1), 97–102. https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00112-0

Abuku, M., Janssen, H., Poesen, J., & Roels, S. (2008). Surface phenomena of wind-driven raindrops on porous building walls. *IEA ECBCS Annex 41 Closing Seminar*, 93–104.

Abuku, M., Janssen, H., & Roels, S. (2009). Impact of wind-driven rain on historic brick wall buildings in a moderately cold and humid climate: Numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumption. *Energy and Buildings*, *41*(1), 101–110. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.011

Adan, O., Brocken, H., Carmeliet, J., Hens, H., Roels, S., & Hagentoft, C. (2004). Determination of liquid water transfer properties of porous building materials and development of numerical assessment methods : Introduction to the EC HAMSTAD Project. *Journal of Building Physics*, *27*(4). https://doi.org/https://doi.org/10.1177/1097196304042323

ADEME. (2018). *Ademe - Le Plan de rénovation énergétique de l'habitat (PREH).* https://www.ademe.fr/expertises/batiment/elements-contexte/politiques-vigueur/plan-renovation-energetique-lhabitat-preh

AFCOBOIS. (n.d.). *Règles professionnelles Constructions en bois massif* (IRABOIS (Ed.)).

Aghahadi, M. (2019). *Etude expérimentale et modélisation physique des transferts couplés chaleur-humidité dans un isolant*. Université Bourgogne Franche- Comté.

Ahmad, M. R., & Chen, B. (2020). Influence of type of binder and size of plant aggregate on the hygrothermal properties of bio-concrete. *Construction and Building Materials*, *251*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118981

Ahmad, M. R., Chen, B., Haque, M. A., & Oderji, S. Y. (2020). Multiproperty characterization of cleaner and energy-efficient vegetal concrete based on one-part geopolymer binder. *Journal of Cleaner Production*, *253*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119916

Ahmad, M. R., Chen, B., Yousefi Oderji, S., & Mohsan, M. (2018). Development of a new bio-composite for building insulation and structural purpose using corn stalk and magnesium phosphate cement. *Energy and Buildings*, *173*, 719–733. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.007

Ahmed, T., Farooqi, M. U., & Ali, M. (2020). Compressive behavior of rice straw-reinforced concrete for rigid pavements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *770*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/770/1/012004

Aigbomian, E. P., & Fan, M. (2013). Development of Wood-Crete building materials from sawdust and waste paper. *Construction and Building Materials*, *40*, 361–366. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.018

Aït Oumeziane, Y., Bart, M., Moissette, S., & Lanos, C. (2011). Modélisation du transfert d'air, de masse et de chaleur aux travers de parois multicouches. *Xème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois Sur La Thermique Des Systèmes*.

Aït Oumeziane, Y., Bart, M., Moissette, S., & Lanos, C. (2014). Hysteretic Behaviour and Moisture Buffering of Hemp Concrete. *Transport in Porous Media*, *103*(3), 515–533. https://doi.org/10.1007/s11242-014-0314-7

Aligizaki, K. K. (2006). *Pore Structure of Cement-Based Materials: Testing, Interpretation and Requirements*. Taylor & Francis Group.

Allam, R., Issaadi, N., Belarbi, R., El-Meligy, M., & Altahrany, A. (2018). Hygrothermal behavior for a clay brick wall. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, *54*(6), 1579–1591. https://doi.org/10.1007/s00231-017-2271-5

Allard, J. F., Henry, M., Tizianel, J., Kelders, L., & Lauriks, W. (1998). Sound propagation in air-saturated random packings of beads. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *104*(4), 2004–2007. https://doi.org/10.1121/1.423766

Alnefaie, K. A., & Abu-Hamdeh, N. H. (2013). Specific heat and volumetric heat capacity of granular materials as affected by moisture and density. *Applied Mechanics and MaterialsProceedings of the 2013 International Conference on Mechanics, Fluids, Heat, Elasticity and Electromagnetic Fields*, 139–143. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.575.103

Amziane, S., & Arnaud, L. (2013). Bio-aggregate-based Building Materials: Applications to Hemp Concretes. In *Bio-aggregate-based Building Materials*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons.

Amziane, S., & Collet, F. (2017). *State-of-the-Art Report Rilem TC 236 BBM.*

Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., & Sonebi, M. (2017). Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *50*(3). https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3

Amziane, S., Lanos, C., & Marceau, S. (2020). *GdR MBS - Matériaux de Construction Biosourcés*. https://gdr-mbs.univ-gustave-eiffel.fr/

Amziane, S., & Sonebi, M. (2016). Overview on biobased building material made with plant aggregate. In *RILEM Technical Letters* (Vols. 2016-Augus, Issue June). https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.v1.9

Anderberg, A., & Wadsö, L. (2004). *Moisture in Self-levelling Flooring Compounds . Part II . Sorption Isotherms*. 1–15.

Anderson, R. B. (1946). Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller Equation. *Journal of the American Chemical Society, Elsevier*, *68*(4), 686–691. https://doi.org/10.1021/ja01208a049

Antczak, E., Chauchois, A., Defer, D., & Duthoit, B. (2003). Characterisation of the thermal effusivity of a partially saturated soil by the inverse method in the frequency domain. *Applied Thermal Engineering*, *23*(12), 1525–1536. https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00084-X

Arehart, J. H., Nelson, W. S., & Srubar, W. V. (2020). On the theoretical carbon storage and carbon sequestration potential of hempcrete. *Journal of Cleaner Production*, *266*, 121846. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121846

Arizzi, A., Cultrone, G., Brümmer, M., & Viles, H. (2015). A chemical, morphological and mineralogical study on the interaction between hemp hurds and aerial and natural hydraulic lime particles: Implications for mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, *75*, 375–384. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.026

Arnaud, L. (2000). Mechanical and thermal properties of hemp concretes and wools: experimental and theorical approaches. *Proceeding of the Third International Symposium Bioresource Hemp and Other Fiber Crops*.

Arnaud, L., Cérézo, V., & Samri, D. (2006). Global approach for the design of building material containing lime and vegetable particles. *The Sixth International Symposium of Cement and Concrete*, 1261–1265.

Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, *28*(1), 50–56. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052

Association construire en chanvre, & Fédération Française du Bâtiment. (2009). *Construire en chanvre -Règles professionelles d'exécution* (SEBTP (Ed.); 2ème éditi). Fédération Française du Bâtiment.

Aubert, J.-E. (2013). Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées. In

Rapport final du projet TERCRUSO.

Azirian, J. (2017). *Effet du vent sur les bâtiments de grandes hauteurs*. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM Liban.

Babé, C., Kidmo, D. K., Tom, A., Mvondo, R. R. N., Boum, R. B. E., & Djongyang, N. (2020). Thermomechanical characterization and durability of adobes reinforced with millet waste fibers (sorghum bicolor). *Case Studies in Construction Materials*, *13*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00422

Bajpai, S. K., Chand, N., & Lodhi, R. (2011). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of sago starch films. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, *4*(04), 233–246.

Barclay, M., Holcroft, N., & Shea, A. D. (2014). Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp-lime buildings. *Building and Environment*, *80*, 204–212. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.003

Baroghel-Bouny, V. (2007). Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part I: Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure. *Cement and Concrete Research*, *37*(3), 414–437. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.019

Barrett, E. P., Joyner, L. G., & Halenda, P. P. (1951). The Determination of Pore Volume and Area Distributions in Porous Substances. I. Computations from Nitrogen Isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, *73*(1), 373–380. https://doi.org/10.1021/ja01145a126

Barsotti, E., Tan, S. P., Piri, M., & Chen, J. H. (2020). Capillary-condensation hysteresis in naturally-occurring nanoporous media. *Fuel*, *263*(December 2019), 116441. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116441

Bauer, T. H. (1993). A general analytical approach toward the thermal conductivity of porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *36*(17), 4181–4191. https://doi.org/10.1016/0017-9310(93)90080-P

Bear, J., & Bachmat, Y. (1990). *Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media* (J. Bear (Ed.)). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/Bear, J., & Bachmat, Y. (1990). Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media. doi:10.1007/978-94-009-1926-6

Belayachi, N., Hoxha, D., & Redikutseva, I. (2015). Etude comparative du comportement hygrothermique des matériaux à base de fibres végétales. *33èmes Rencontres de l'AUGC*, *May*, 1–8.

Belkharchouche, D., & Chaker, A. (2016). Effects of moisture on thermal conductivity of the lightened construction material. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(17), 7119–7125. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.160

Ben Mabrouk, S. (1999). *Etude des transfert simultanés de chaleur et de masse dans les milieux poreux : modélisation des phénomènes de séchage.*

Benfratello, S., Capitano, C., Peri, G., Rizzo, G., Scaccianoce, G., & Sorrentino, G. (2013). Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite.

Construction and Building Materials, *48*, 745–754. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096

Benmahiddine, F., Bennai, F., Cherif, R., Belarbi, R., Tahakourt, A., & Abahri, K. (2020). Experimental investigation on the influence of immersion/drying cycles on the hygrothermal and mechanical properties of hemp concrete. *Journal of Building Engineering*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/ j.jobe.2020.101758

Bennai, F. (2017). *Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de constructionen régime insaturé*. Université de La Rochelle.

Bennai, F., Issaadi, N., Abahri, K., Belarbi, R., & Tahakourt, A. (2018). Experimental characterization of thermal and hygric properties of hemp concrete with consideration of the material age evolution. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, *54*(4), 1189–1197. https://doi.org/10.1007/s00231-017-2221-2

Bennouna, A., & Zrikem, Z. (2007). Une série de logiciels destinés aux spécialistes et professionnels d'énergie solaire et de maîtrise d'énergie. *Congrès de La COMPLES, Coopération Méditerranéenne Pour l'Energie Solaire*.

Berger, J. (2014). *Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : Application des méthodes de réduction de modèle*. Université de Grenoble.

Berger, J., Busser, T., Reddy, S., & Dulikravich, G. S. (2019). Evaluation of the reliability of a heat and mass transfer model in hygroscopic material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *142*, 118258. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.014

Biot, M. A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, *12*(2), 155–164.

Biot, M. A. (1956a). Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I Low frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, *28*, 168–178.

Biot, M. A. (1956b). Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. II Higher frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, *28*, 179–191.

Blocken, B., & Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *92*(13), 1079–1130. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.06.003

Blocken, B., Roels, S., & Carmeliet, J. (2007). A combined CFD-HAM approach for wind-driven rain on building facades. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *95*(7), 585–607. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.12.001

Boivin, M. (2014). Nouveautés sur l'ensilage de maïs, un fourrage pas comme les autres. *Symposium Sur Les Bovins Laitiers. Choix d'aujourd'hui Pour Les Défis de Demain*. http://docplayer.fr/48680516-Nouveautes-sur-l-ensilage-de-mais-un-fourrage-pas-comme-les-autres.html

Bouguerra, A. (1999). Temperature and moisture dependence on the thermal

conductivity of wood-cement-based composite: experimental and theoretical analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *32*(21), 2797–2803. https://doi.org/10.1088/0022-3727/32/21/313

Bouguerra, A., Diop, M. B., Laurent, J. P., Benmalek, M. L., & Queneudec, M. (1998). Effect of moisture content on the thermal effusivity of wood cement-based composites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *31*(24), 3457–3462. https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/24/008

Bouketta, S., & Bouchahm, Y. (2012). L'effet de la géométrie urbaine sur l'écoulement du vent et la ventilation naturelle extérieure. *Revue Des Energies Renouvelables*, *15*(4), 639–659.

Boukhattem, L., Boumhaout, M., Hamdi, H., Benhamou, B., & Ait Nouh, F. (2017). Moisture content influence on the thermal conductivity of insulating building materials made from date palm fibers mesh. *Construction and Building Materials*, *148*, 811–823. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.020

Bourdot, A., Magniont, C., Lagouin, M., Niyigena, C., Evon, P., & Amziane, S. (2019). Impact of bio-aggregates properties on the chemical interactions with mineral binder, application to vegetal concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, *17*, 542–558. https://doi.org/10.3151/jact.17.542

Boutin, C. (1996). Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé: Modélisation par méthode autocohérente. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *29*(194), 609–615.

Boutin, C., & Geindreau, C. (2010). Periodic homogenization and consistent estimates of transport parameters through sphere and polyhedron packings in the whole porosity range. *Physical Review E*, *82*(3). https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.036313

Breuer, S., Schwotzer, M., Speziale, S., & Schilling, F. R. (2020). Thermoelastic properties of synthetic single crystal portlandite Ca(OH)2 - Temperature-dependent thermal diffusivity with derived thermal conductivity and elastic constants at ambient conditions. *Cement and Concrete Research*, *137*(August). https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106199

Brouard, Y. (2018). *Caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat*. http://theses.insa-lyon.fr/publication/2005isal0037/these.pdf

Brouard, Y., Belayachi, N., Hoxha, D., Méo, S., & Abdallah, W. (2017). Hygrothermal Behavior of Clay - Sunflower (*Helianthus annuus*) and Rape Straw (*Brassica napus*) Plaster Bio-Composites for Building Insulation. *Advanced Engineering Forum*, *21*, 242–248. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/aef.21.242

Brouard, Y., Belayachi, N., Hoxha, D., Ranganathan, N., & Méo, S. (2018). Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (Helianthus annuus) and rape straw (Brassica napus) plaster bio-composites for building insulation. *Construction and Building Materials*, *161*, 196–207. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140

Brouard, Y., Belayachi, N., Ranganathan, M., Hoxha, D., & Méo, S. (2017). Experimental assessment of hygrothermal properties of clay-sunflower (heliantus

annuus) and rape straw (brassica napus) bio-composites. *2nd International Conference on Bio-Based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical Valorisation of GRAnular and FIbrous Materials*, *35*(2), 376–380.

Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. *Journal of the American Chemical Society*, *62*, 1723–1732. https://doi.org/https://doi.org/10.1021/ja01864a025

Brunauer, Stephen, Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, *60*(2), 309–319. https://doi.org/10.1021/ja01269a023

Buffington, D. E., & Skinner, T. C. (1980). Solar Radiation and Wind Effects As Functions of Building Orientation. *American Society of Agricultural Engineers*, *23*(6), 1482–1488. https://doi.org/10.13031/2013.34802

Bütschi, P. Y., Deschenaux, G., Miao, B., & Srivastava, N. K. (2003). Utilisation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction. *Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, 1134–1139.

Bütschi, Pierre Yves, Deschenaux, C., Miao, B., & Srivastava, N. K. (2004). Caractérisation d'une maçonnerie composée d'éléments en aggloméré de chanvre. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *31*(3), 526–529. https://doi.org/10.1139/l04-028

Cambonie, T., & Gourdon, E. (2018). Innovative origami-based solutions for enhanced quarter-wavelength resonators. *Journal of Sound and Vibration*, *434*, 379–403. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.07.029

Cannabric. (2011). *Fiche technique Chaux hydraulique naturelle (EN 459-1)* (p. 2).

Carmeliet, J., Descamps, F., & Houvenaghel, G. (1999). A multiscale network model for simulating moisture transfer properties of porous media. *Transport in Porous Media*, *35*(1), 67–88. https://doi.org/10.1023/A:1006500716417

Carpentier, C. (2011). *Notes techniques et réflexions : Les transferts d'humidité dans les bâtiments.*

Carson, J. K., Lovatt, S. J., Tanner, D. J., & Cleland, A. C. (2005). Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *48*(11), 2150–2158. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.032

Castel, Y., Amziane, S., & Sonebi, M. (2017). Durability test on hemp concrete: weathering resistance. *1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future (COMS 2017).*

CEN/TC 89. (2007). *EN 15026:2007 Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation.*

Cérézo, V. (2005). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique.* http://theses.insa-lyon.fr/publication/2005isal0037/these.pdf

Ceyte, I. (2008). *Béton de chanvre, définition des caractéristiques mécaniques de la chènevotte (Hemp concrete, definition of mechanical characteristics)*. ENTPE.

Chabannes, M., Nozahic, V., & Amziane, S. (2015). Design and multi-physical properties of a new insulating concrete using sunflower stem aggregates and eco-friendly binders. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *48*(6), 1815–1829. https://doi.org/10.1617/s11527-014-0276-9

Chabriac, P. A., Gourdon, E., Gle, P., Fabbri, A., & Lenormand, H. (2016). Agricultural by-products for building insulation : Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters. *Construction and Building Materials*, *112*, 158–167.

Chamoin, J. (2013). *Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation*. INSA de Rennes.

Champoux, Y., & Allard, J.-F. (1991). Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of Applied Physics*, *70*, 1975–1979.

Choi, E. C. C. (1993). Simulation of wind-driven-rain around a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *46–47*(C), 721–729. https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90342-L

Cigasova, J., Stevulova, N., & Junak, J. (2013). Properties monitoring of fibrous composites based on hemp hurds with different mean particle size. *Pollack Periodica*, *8*(2), 41–46. https://doi.org/10.1556/Pollack.8.2013.2.5

Claude, S. (2018). *Étude Expérimentale Et Numérique De Solutions Basées Sur Les Éco-Matériaux Pour La Rénovation Thermique Du Patrimoine Bâti Urbain*.

Coia, B. (2020). *BioLime - Building Lime materials yield negative carbon footprint*. BioLime. https://biolime.com/lime-vs-cement/

Colinart, T., Glouannec, P., Bendouma, M., & Chauvelon, P. (2017). Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 2: Influence on hygrothermal behavior of hemp concrete. *Energy and Buildings*, *152*, 42–51. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.016

Colinart, T., Lelievre, D., & Glouannec, P. (2016). Experimental and numerical analysis of the transient hygrothermal behavior of multilayered hemp concrete wall. *Energy and Buildings*, *112*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.027

Colinart, Thibaut, Glouannec, P., Chauvelon, P., Le Bideau, P., Collet, F., & Lanos, C. (2010). Etude et modélisation du comportement thermo-hydrique d'une paroi en béton de chanvre. *IBPSA France*.

Colinart, Thibaut, Glouannec, P., Pierre, T., & Chauvelon, P. (2013). Hygrothermal behaviour of a hemp concrete wall: Comparison between experimental and numerical results. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 2852–2859.

Collet, F. (2004). *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*. INSA Rennes.

Collet, F., Bart, M., Serres, L., & Miriel, J. (2008). Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials. *Construction and Building Materials*, *22*(6), 1271–1280. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.018

Collet, F., Chamoin, J., Pretot, S., & Lanos, C. (2013). Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy and Buildings*, *62*, 294–303. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010

Collet, F., & Pretot, S. (2012). Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete. *Construction and Building Materials*, *36*, 58–65. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.139

Collet, F., & Pretot, S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials*, *65*, 612–619. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039

Collet, F., Pretot, S., Mazhoud, B., Bessette, L., & Lanos, C. (2015). Comparing hemp composites made with mineral or organic binder on thermal, hygric and mechanical point of view. *First International Conference on Bio-Based Building Materials*, *June*, 228–234.

Cordeiro Mendoça, K. (2004). *Modélisation thermo-hydro-aéraulique des locaux cimatisatisés selon l'approche zonale, prise en compte des phénomènes de sorption d'humidité*. Université de La Rochelle.

Côté, J., & Konrad, J.-M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, *42*(2), 443–458. https://doi.org/10.1139/t04-106

Courard, L. (2000). Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *33*(1), 65–72. https://doi.org/10.1007/bf02481698

Courard, L. (2002). Evaluation of thermodynamic properties of concrete substrates and cement slurries modified with admixtures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *34*(247), 149–155. https://doi.org/10.1007/bf02533583

Courgey, S. (2012). *Humidité et transferts de vapeur d'eau dans les parois*. Arcanne, ASDER.

Coussy, O., Dangla, P., Dormieux, L., & Lemarchand, E. (1999). A two-scale modelling of a swelling clay. *Journal De Physique. IV : JP*, *9*(9), Pr9-21-Pr9-31.

Coutts, R. S. P. (2005). A review of Australian research into natural fibre cement composites. *Cement and Concrete Composites*, *27*, 518–526. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.003

Cox, J., Sizaire, J., Meulders, P., Van Overmeire, E., & Ingelaere, A. (2016). *Le béton cellulaire - matériau d'avenir*.

Crausse, P., Laurent, J. ., & Perrin, B. (1996). Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux. *Revue Générale de Thermique*, *35*(410), 95–106. https://doi.org/10.1016/s0035-3159(96)80002-x

D'Alessandro, F., Baldinelli, G., Bianchi, F., Sambuco, S., & Rufini, A. (2018). Experimental assessment of the water content influence on thermo-acoustic performance of building insulation materials. *Construction and Building Materials*, *158*, 264–274. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.028

Daïan, J.-F. (2013). *Equilibre et transferts en milieux poreux.*

Danks, R., Good, J., & Sinclair, R. (2016). Assessing reflected sunlight from building facades: A literature review and proposed criteria. *Building and Environment*, *103*, 193–202. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.017

Dartois, S., Mom, S., Dumontet, H., & Ben Hamida, A. (2017). An iterative micromechanical modeling to estimate the thermal and mechanical properties of polydisperse composites with platy particles: Application to anisotropic hemp and lime concretes. *Construction and Building Materials*, *152*, 661–671. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.181

De Bruijn, P. (2008). *Hemp Concretes Mechanical Properties using both Shives and Fibres.*

De Bruijn, P. B., Jeppsson, K. H., Sandin, K., & Nilsson, C. (2009). Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering*, *103*(4), 474–479. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005

De Bruijn, P., & Johansson, P. (2013). Moisture fixation and thermal properties of lime-hemp concrete. *Construction and Building Materials*, *47*, 1235–1242. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.006

de Bruyne, N. A. (1939). Nature of adhesion. *Aircraft Engineer*, *18*(12), 51–54.

De Freitas, V. P., Abrantes, V., & Crausse, P. (1996). Moisture Migration in Building Walls - Analysis of the Interface Phenomena. *Building and Environment*, *31*(2), 99–108. https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00027-5

De Vries, D. A. (1963). Thermal properties of soils. In W. R. van Wijk (Ed.), *Physics of plant environment* (pp. 210–235). John Wiley & Sons.

Defraeye, T., Blocken, B., Derome, D., Nicolai, B., & Carmeliet, J. (2012). Convective heat and mass transfer modelling at air-porous material interfaces: Overview of existing methods and relevance. *Chemical Engineering Science*, *74*, 49–58. https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.02.032

Degrave-Lemeurs, M., Glé, P., & Hellouin de Menibus, A. (2018). Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders. *Construction and Building Materials*, *160*, 462–474. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064

Del Valle-Zermeño, R., Aubert, J. E., Laborel-Préneron, A., Formosa, J., & Chimenos, J. M. (2016). Preliminary study of the mechanical and hygrothermal properties of hemp-magnesium phosphate cements. *Construction and Building Materials*, *105*, 62–68. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.081

Delannoy, G., Marceau, S., Glé, P., Gourlay, E., Guéguen-Minerbe, M., Diafi, D., Nour, I., Amziane, S., & Farcas, F. (2018). Aging of hemp shiv used for concrete. *Materials*

and Design, *160*, 752–762. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.016

Delany, M. E., & Bazley, E. N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, *3*(2), 105–116. https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9

Delhomme, F., Hajimohammadi, A., Almeida, A., Jiang, C., Moreau, D., Gan, Y., Wang, X., & Castel, A. (2020). Physical properties of Australian hurd used as aggregate for hemp concrete. *Materials Today Communications*, *24*(October 2019), 100986. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100986

Derluyn, H., Derome, D., Carmeliet, J., Stora, E., & Barbarulo, R. (2012). Hysteretic moisture behavior of concrete: Modeling and analysis. *Cement and Concrete Research*, *42*(10), 1379–1388. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.06.010

Deshayes, P. (2012). Le secteur du bâtiment face aux enjeux du développement durable : logiques d'innovation et/ou problématiques du changement. *Innovations*, *1*(37), 219–236. https://www.cairn.info/revue-innovations-2012-1-page-219.htm#

Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., & Richman, R. (2017). Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 3655–3664. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102

Dinh, T. M., Magniont, C., Coutand, M., & Escadeillas, G. (2015). Hemp concrete using innovative pozzolanic binder. *First International Conference on Bio-Based Building Materials*, *June 2015*.

Diquélou, Y., Gourlay, E., Arnaud, L., & Kurek, B. (2015). Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *Cement and Concrete Composites*, *55*, 112–121. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004

Dowd, J. O., & Quinn, D. (2005). *An Investigation of Hemp and Lime as a Building Material* (Issue March).

Dubois, S., & Lebeau, F. (2014). Impact des matériaux biosourcés sur le climat intérieur : Un outil de calcul flexible à l ' échelle de la pièce. *Ecobat Sciences et Techniques*.

Dubois, S., McGregor, F., Lebeau, F., Evrard, A., & Heath, A. (2014). An inverse modelling approach to estimate the hygric parameters of clay-based masonry during a moisture buffer value test. *Building and Environment*, *81*, 192–203. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.018

Duforestel, T. (1992). *Bases métrologiques et modèles pour la simultion du comportement hygrothermique des composants et ouvrages du bâtiment*. ENPC Paris.

El Sawalhi, R. (2015). *Caractérisation expérimentale et modélisation multi-échelles des transferts de chaleur et de masse au sein d'isolants à structure fibreuse*. Université de La Rochelle.

Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y., & Goudet, L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hempcrete") manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, *22*(10), 2116–2123.

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016

Emmett, P. H., & Brunauer, S. (1937). The use of low temperature van der Waals adsorption isotherms in determining the surface area of iron synthetic ammonia catalysts. *Journal of the American Chemical Society*, *59*(8), 1553–1564. https://doi.org/10.1021/ja01287a041

Espinal, L. (2012). Porosity and Its Measurement. *Characterization of Materials*. https://doi.org/10.1002/0471266965.com129

Espinosa, R. M., & Franke, L. (2006). Inkbottle Pore-Method: Prediction of hygroscopic water content in hardened cement paste at variable climatic conditions. *Cement and Concrete Research*, *36*(10), 1954–1968. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.06.011

Evrard, A, & Herde, A. D. (2005). Bioclimatic envelopes made of lime and hemp concrete. *CISBAT2005 - Renewables in a Changing Climate - Innovation in Building Envelopes and Environmental Systems*, 1–6. http://dial.academielouvain.be/vital/access/services/Download/boreal:73818/PDF_01

Evrard, Arnaud. (2008). *Transient hygrothermal behavior of Lime-Hemp Materials*. UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN Ecole Polytechnique de Louvain.

Evrard, Arnaud. (2006). Sorption behaviour of Lime-Hemp Concrete and its relation to indoor comfort and energy demand. *PLEA 2006 - 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Conference Proceedings*, *September*, 4–9.

Fabbri, A. (2020). *Cours des comportements hygroscopiques et hygrothermiques*. ENTPE.

Fabbri, A., & McGregor, F. (2017). Impact of the determination of the sorption-desorption curves on the prediction of the hemp concrete hygrothermal behaviour. *Construction and Building Materials*, *157*, 108–116. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.077

Fabbri, A., Mcgregor, F., Costa, I., & Faria, P. (2017). Effect of temperature on the sorption curves of earthen materials. *Materials and Structures*, *50*(6), 1–13. https://doi.org/10.1617/s11527-017-1122-7

Fabbri, Antonin. (2006). *Physico-mécanique des matériaux cimentaires soumis au gel-dégel*. Université de Marne-La-Vallée.

Fabbri, Antonin. (2017). *Habilitation à diriger les recherches : Physics and Mechanics of porous media for civil engineering applications*.

Fabbri, Antonin, Chabriac, P. A., Ngo, D. T., Sallet, F., Gourdon, E., Wong, H., & Morel, J. C. (2015). Hygrothermal behaviour of hemp concrete; Experimental evidences and modelling. *COUPLED PROBLEMS 2015 - Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering*, *October*, 59–70.

Feng, C., & Janssen, H. (2016). Hygric properties of porous building materials (II): Analysis of temperature influence. *Building and Environment*, *99*, 107–118. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.016

Ferroukhi, M. Y. (2015). *Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l 'humidité*. Université de La Rochelle.

Ferroukhi, M. Y., Abahri, K., Belarbi, R., Limam, K., & Nouviaire, A. (2015). Experimental validation of coupled heat , air and moisture transfer modeling in multilayer building components. *Heat and Mass Transfer*, *December*. https://doi.org/10.1007/s00231-015-1740-y

Flamand, O. (2003). *Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques*. Université de Nantes.

Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *12*(5), 282–288. https://doi.org/10.1007/s11367-007-0327-3

Funk, M., & Ghazi Wakili, K. (2008). Driving potentials of heat and mass transport in porous building materials: A comparison between general linear, thermodynamic and micromechanical derivation schemes. *Transport in Porous Media*, *72*(3), 273–294. https://doi.org/10.1007/s11242-007-9150-3

Galbraith, G. H., Mclean, R. C., Gillespie, I., Guo, J., & Kelly, D. (1998). Nonisothermal moisture diffusion in porous building materials. *Building Research & Information*, *26*(6), 330–339. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/096132198369661

Gandolfi, S., Ottolina, G., Riva, S., Fantoni, G. P., & Patel, I. (2013). Complete chemical analysis of carmagnola hemp hurds and structural features of its components. *BioResources*, *8*(2), 2641–2656. https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2641-2656

Gao, H., Yang, M., Dang, B., Luo, X., Liu, S., Li, S., Chen, Z., & Li, J. (2020). Natural phenolic compound-iron complexes: Sustainable solar absorbers for wood-based solar steam generation devices. *RSC Advances*, *10*(2), 1152–1158. https://doi.org/10.1039/c9ra08235b

Garas, G., Allam, M., & El Dessuky, R. (2009). Straw bale construction as an economic environmental building alternative- a case study. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *4*(9), 54–59.

Garcia-Jaldon, C., Dupeyre, D., & Vignon, M. R. (1998). Fibres from semi-retted hemp bundles by steam explosion treatment. *Biomass and Bioenergy*, *14*(3), 251–260. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10039-3

Gidik, H., Bedek, G., & Dupont, D. (2016). Developing thermophysical sensors with textile auxiliary wall. In *Smart Textiles and Their Applications*. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00019-9

GIEC. (2019a). *Communiqué de presse du GIEC. IPCC*.

GIEC. (2019b). *Résumé à l'intention des décideurs. IPCC*.

Glass, S. V, & Zelinka, S. L. (2010). Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In *Wood handbook: wood as an engineering material* (Centennial, pp. 4-1-4–19). U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Glé, P. (2013). *Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales - Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation* [ENTPE Lyon]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00923665

Glé, P., Gourdon, E., & Arnaud, L. (2013). The effect of particle shape and size distribution on the acoustical properties of mixtures of hemp particles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *134*(6), 4698–4709. https://doi.org/10.1121/1.4824931

Gourdon, E., Chabriac, P.-A., Glé, P., Fabbri, A., & McGregor, F. (2015). Acoustical characterization and modelling of agricultural byproducts for building insulation. *First International Conference on Bio-Based Building Materials*, *33*(2), 449–453.

Gourlay, E., & Arnaud, L. (2010). Comportement hygrothermique des murs de béton de chanvre. *Proceedings of the Actes Du Congrès SFT , Le Touquet France*, *3237*(February).

Gourlay, E., Glé, P., Arnaud, L., & Gourdon, E. (2011). Propriétés multiphysiques des bétons de chanvre. *Materiaux et Techniques*, *99*(6), 625–631. https://doi.org/10.1051/mattech/2011021

Gourlay, Etienne, Glé, P., Marceau, S., Foy, C., & Moscardelli, S. (2017). Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, *139*, 513–523. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.018

Grenet, J., & Legendre, B. (2010). Analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC). In *Mesures - Analyses | Techniques d'analyse*. Techniques de l'ingénieur.

Gross, C., & Walker, P. (2014). Racking performance of timber studwork and hemp-lime walling. *Construction and Building Materials*, *66*, 429–435. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.054

Guicheteau, A., Cambou, D., Clavel, V., Desbrosse-Degobertière, S., Desiderio, A.-M., Filipiak, B., Giros, R., Lemeunier, S., Louis, A., Mahé-Hourlier, N., Monnier, A., Pertuisot, G., Richard, I., Truc, M.-C., Vauquelin, E., & Wiethold, J. (2015). *L'évolution du peuplement dans la vallée de la Noxe du Néolithique à nos jours. Volume 2: études annexes et inventaires*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21560.85766

Guinard, L., Deroubaix, G., Roux, M., Levet, A., & Quint, V. (2015). *Évaluation Du Gisement De Déchet Bois Et Son Positionnement Dans La Filière Bois/Bois Énergie*.

Gupta, M. (2012). *Structure of Dicot Stem*. BiologyDiscussion. https://www.biologydiscussion.com/stems-2/dicot-stem/structure-of-dicot-stem-botany/48793

Guyon, E., Pedregosa, A., & SALVIAT, B. (2010). *Matière et matériaux - De quoi est fait le monde ?* Editions Berlin.

Haba, B., Agoudjil, B., Boudenne, A., & Benzarti, K. (2017). Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm

concrete. *Construction and Building Materials*, *154*, 963–971. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.025

Hagentoft, C.-E., Kalagasidis, A. S., & Adl-Zarrabi, B. (2004). Benchmarks for One-dimensional Cases of Combined Heat , Air and Moisture Transfer in Building Components. *CIB*.

Hagentoft, C. E., Kalagasidis, A. S., Adl-Zarrabi, B., Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Grunewald, J., Funk, M., Becker, R., Shamir, D., Adan, O., Brocken, H., Kumaran, K., & Djebbar, R. (2004). Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases. *Journal of Building Physics*, *27*(4), 327–352. https://doi.org/10.1177/1097196304042436

Haik, R., Peled, A., & Meir, I. A. (2020). The thermal performance of lime hemp concrete (LHC) with alternative binders. *Energy and Buildings*, *210*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109740

Hall, M., & Allinson, D. (2009). Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, *29*(4), 740–747. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.03.051

Hamidpour, M., Shariatmadari, H., & Kalbasi, M. (2012). Sorption hysteresis in zeolites. In *Handbook of Natural Zeolites* (pp. 147–155). https://doi.org/10.2174/978160805261511201010147

Hanley, R., & Pavía, S. (2008). A study of the workability of natural hydraulic lime mortars and its influence on strength. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *41*(2), 373–381. https://doi.org/10.1617/s11527-007-9250-0

He, T., Xu, R., Da, Y., Yang, R., Chen, C., & Liu, Y. (2019). Experimental study of high-performance autoclaved aerated concrete produced with recycled wood fibre and rubber powder. *Journal of Cleaner Production*, *234*, 559–567. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.276

Helepciuc (Gradinaru), C. M., Barbuta, M., & Serbanoiu, A. A. (2018). Characterization of a lightweight concrete with sunflower aggregates. *Procedia Manufacturing*, *22*, 154–159. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.024

Hens, H. (2008). *EBC Annex 41, Whole Building Heat-Air- Moisture Response (MoistEng), Project Summary Report.*

Hens, H. S. L. C. (2002). Heat, Air and Moisture Transfer In Highly Insulated Building Envelopes (HAMTIE). In *IEA ECBCS Annex* (Vol. 24).

Hernandez Rodriguez, J., & Quinto Diez, P. (2005). Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. *Científica*, *9*(2), 63–71.

Houngan, C. A., Awanto, C., Djossou, A. A., Anjorin, M., & Vianou, A. (2015). Measurement of Thermal Effusivity and Thermal Conductivityat Various Water Content for Two Tropical Wood Species. *Procedia Engineering*, *127*, 48–55. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.328

Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, *17*(7), 668–675. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007

Hustache, Y., & Arnaud, L. (2008). *Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre*. 93.

Ibrahim, M., Achard, P., Wurtz, E., & Biwole, P. H. (2013). Optimizing insulation-thermal mass wall layer distribution from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. *13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 870–876.

IIe Congrès international des architectes et des techniciens des monuments historiques. (1964). *Charte internationale de Venise sur la conservation et la restauration des monuments et des sites*.

InterChanvre. (2018). *Le chanvre. La culture écologique, agronomique et éco-responsable*.

International Energy Agency, & UN Environment Programme. (2019). *2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. Global Alliance for Buildings and Construction.

International Organization for Standardization. (2003). *ISO 10534-2:2003, Acoustics - Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes - Part 2: Transfer-function Method"*.

International Organization for Standardization. (2007). *ISO 8894-2:2007, Refractory materials - Determination of thermal conductivity - Part 2: Hot-wire method (parallel)*.

International Organization for Standardization. (2008). *NF EN 1097-7:2008, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 7 : détermination de la masse volumique absolue du filler - Méthode au pycnomètre*.

International Organization for Standardization. (2010). *ISO 9277:2010, Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method*.

International Organization for Standardization. (2013). *EN ISO 12571:2013, Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of hygroscopic sorption properties*.

International Organization for Standardization. (2016). *NF EN ISO 12572:2016, Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method*.

International Organization for Standardization. (2018). *NF EN ISO 9053-1:2018, Acoustique - Détermination de la résistance à l'écoulement d'air - Partie 1 : Méthode statique*.

IRABOIS. (1999). Guide professionnel. Assemblages bois : tiges ou goujons collés de grande dimension. In *Les cahiers d'IRABOIS, cahier n°11*.

Iwase, T., Izumi, Y., & Kawabata, R. (1998). A new measuring method for sound propagation constant by using sound tube without any air spaces back of a test material. *Internoise 98*, 4.

James, C. M. (2009). *Heat and Moisture Transfer in a Bed of Gypsum Boards*. University of Saskatchewan.

Jami, T., Karade, S. R., & Singh, L. P. (2019). A review of the properties of hemp concrete for green building applications. *Journal of Cleaner Production*, *239*, 117852. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852

Janssen, H. (2011). Thermal diffusion of water vapour in porous materials: Fact or fiction? *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *54*(7–8), 1548–1562. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.034

Janssen, H., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2007). Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *50*(5–6), 1128–1140. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.048

Janssen, H., Blocken, B., Roels, S., & Carmeliet, J. (2007). Wind-driven rain as a boundary condition for HAM simulations: Analysis of simplified modelling approaches. *Building and Environment*, *42*(4), 1555–1567. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.001

Janssen, H., Carmeliet, J., & Hens, H. (2004). The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. *Building and Environment*, *39*(7), 825–836. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.004

Janssens, A., Woloszyn, M., Rode, C., Sasic-Kalagasidis, A., & De Paepe, M. (2008). From EMPD to CFD - Overview of different approaches for heat air and moisture modeling in IEA annex 41. In & H. J. C. Rode, H. Hens (Ed.), *Proceedings of the IEA ECBCS Annex 41 Closing Seminar* (pp. 9–20).

Japanese Industrial Standard (JIS). (2002). *Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity - Part 1: Response method of humidity*.

Jarabo, R., Monte, M. C., Fuente, E., Santos, S. F., & Negro, C. (2013). Corn stalk from agricultural residue used as reinforcement fiber in fiber-cement production. *Industrial Crops and Products*, *43*(1), 832–839. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.034

Jerman, M., & Černý, R. (2012). Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*, *53*, 39–46. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.002

Johannesson, B., & Janz, M. (2009). A two-phase moisture transport model accounting for sorption hysteresis in layered porous building constructions. *Building and Environment*, *44*(6), 1285–1294. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.018

Johnson, D. L., Koplik, J., & Dashen, R. (1987). Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, *176*, 379–

402. https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0022112087000727

Jorge, F. C., Pereira, C., & Ferreira, J. M. F. (2004). Wood-cement composites: A review. *Holz Als Roh - Und Werkstoff*, *62*(5), 370–377. https://doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2

Kabore, A. (2020). *Modélisation hygrothermique de l ' enveloppe du bâtiment avec le matériau de chanvre par*. École Technologique Supérieure, Université du Québec.

Kalagasidis, A. S. (2004). *HAM-Tools - An integrated simulation tool for heat, air and moisture transfer analyses in building physics*. Chalmers University of Technology.

Kalamees, T. (2006). Indoor Hygrothermal Loads in Estonian Dwellings. *Proceedings of the 4th European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings and the 27th Conference of the Air Infiltration and Ventilation Centre*, 541–546.

Kalamees, T., Kurnitski, J., Vinha, J., & Korpi, M. (2007). Indoor climate conditions in lightweight detached houses in cold climate. *IAQVEC 2007 Proceedings - 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings: Sustainable Built Environment*, *1*(January), 1019–1026.

Kalamees, T., Vinha, J., Korpi, M., & Kurnitski, J. (2008). Indoor climate conditions and hygrothermal loads in Finnish and Estonian dwellings. *IEA ECBCS Annex 41 Closing Seminar*, 81–92.

Kari, B., Perrin, B., & Foures, J. C. (1991). Perméabilité h la vapeur d'eau de matériaux de construction: calcul numérique. *Materials and Structures*, *24*, 227–233.

Karibati & Ville et Aménagement Durable. (2017). *BIOMOOC Découvrir le bâtiment biosourcé*.

Karlsson, J. F., & Moshfegh, B. (2006). Energy demand and indoor climate in a low energy building - Changed control strategies and boundary conditions. *Energy and Buildings*, *38*(4), 315–326. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.013

Karolina, R., Muharrisa, R., & Handana, M. A. P. (2020). The effect of rice straw fiber addition as sound silencer and its effect to concrete mechanical properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *725*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/725/1/012035

Kazeoui, H., Seguir, A., Bennai, F., Saibi, N., Tahakourt, A., Belarbi, R., & Ait-Mokhtar, A. (2014). Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans les parois de bâtiment. *International Symposium on Sciences, Engineering, and Technology*.

Khan, M. A. (2015). Chapter 4 - Innovative ABC Techniques. In *Accelerated Bridge Construction* (pp. 159–212). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407224-4.00004-6

Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N., & Hirunlabh, J. (2001). New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, *23*(1), 65–70. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00072-X

Khristova, P., Yossifov, N., & Gabir, S. (1996). Particle board from sunflower stalks: Preliminary trials. *Bioresource Technology*, *58*(3), 319–321. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(96)00112-5

Kieβl, K. (1983). *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen.*

Kinloch, A. (1987). *Adhesion and Adhesives.* Springer. https://www.springer.com/us/book/9780412274404

Kinnane, O., Reilly, A., Grimes, J., Pavia, S., & Walker, R. (2016). Acoustic absorption of hemp-lime construction. *Construction and Building Materials*, *122*, 674–682. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106

Kirchhoff, G. (1868). Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung. *Annalen Der Physik Und Chemie*, *134*(6). https://doi.org/10.1007/978-3-662-55076-2

Knowles, R. L., & Berry, R. D. (1980). *Solar envelope concepts: moderate density building applications : final report.* Solar Energy Research Institute.

Kočí, V., Vejmelková, E., Čáchová, M., Koňáková, D., Keppert, M., Maděra, J., & Černý, R. (2017). Effect of Moisture Content on Thermal Properties of Porous Building Materials. *International Journal of Thermophysics*, *38*(2). https://doi.org/10.1007/s10765-016-2164-8

Krischer, O., & Görling, P. (1938). Versuche über die Trocknung poriger Stoffe und ihre Deutung. *Z. VDI Beiheft Verfahrenstechnik*, *4*.

Kuishan, L., Xu, Z., & Jun, G. (2009). Experimental investigation of hygrothermal parameters of building materials under isothermal conditions. *Journal of Building Physics*, *32*(4), 355–370. https://doi.org/10.1177/1744259108102832

Künzel, H. M. (1994). *Verfahren zur ein- und zweidimesionalen Berechnung des dekoppelten Warme und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten.* Universität Stuttgart.

Künzel, H. M. (1995). Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters. In *Fraunhofer IRB Verlag.*

Kwiatkowski, J. (2009). *Moisture in Buildings Air-Envelope Interaction.* INSA de Lyon.

Laborel-Préneron, A., Magniont, C., & Aubert, J. E. (2018). Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. *Energy and Buildings*, *178*, 265–278. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021

Lafarge, D. (1993). *Propagation du son dans les matériaux poreux à structure rigide saturés par un fluide viscothermique: définition de paramètres géométriques, analogie électromagnétique, temps de relaxation.* Université du Maine.

Lafarge, D., Lemarinier, P., Allard, J. F., & Tarnow, V. (1997). Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *102*(4), 1995–2006.

https://doi.org/https://doi.org/10.1121/1.419690

Lagouin, M., Magniont, C., Sénéchal, P., Moonen, P., Aubert, J. E., & Laborel-préneron, A. (2019). Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal and mechanical properties of vegetal concretes. *Construction and Building Materials*, *222*, 852–871. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004

Lanos, C., & Amziane, S. (2020). *Benchmark B1 : Modélisation du comportement mécanique d'un composite.*

Lanos, C., Reuge, N., & Amziane, S. (2020). *Benchmark B2 : Transferts couplés thermiques et hygriques au sein d'une paroi.*

Latif, E., Ciupala, M. A., Tucker, S., Wijeyesekera, D. C., & Newport, D. J. (2015). Hygrothermal performance of wood-hemp insulation in timber frame wall panels with and without a vapour barrier. *Building and Environment*, *92*, 122–134. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.025

Latif, E., Lawrence, M., Shea, A., & Walker, P. (2015). Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. *Building and Environment*, *93*, 199–209. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.011

Latif, E., Tucker, S., Ciupala, M. A., Wijeyesekera, D. C., & Newport, D. (2014). Hygric properties of hemp bio-insulations with differing compositions. *Construction and Building Materials*, *66*, 702–711. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.021

Laurent, J.-P. (1986). *Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires* (Issue January 1986). Institut National Polytechnique de Grenoble.

Laurent, J. P., & Guerre-Chaley, C. (1995). Influence de la teneur en eau et de la température sur la conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé. *Materials and Structures*, *28*(8), 464–472. https://doi.org/10.1007/BF02473166

Le, A. T., Gacoin, A., Li, A., Mai, T. H., Rebay, M., & Delmas, Y. (2014). Experimental investigation on the mechanical performance of starch-hemp composite materials. *Construction and Building Materials*, *61*, 106–113. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.084

Lelièvre, D. (2015). *Simulation numérique des transferts de chaleur et d ' humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés.* Université de Bretagne Sud.

Lenormand, H., Glé, P., & Leblanc, N. (2017). Investigation of the acoustical and thermal properties of sunflower particleboards. *Acta Acustica United with Acustica*, *103*(1), 149–157. https://doi.org/10.3813/AAA.919040

Li, M., Khelifa, M., & El Ganaoui, M. (2017). Mechanical characterization of concrete containing wood shavings as aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, *6*(2), 587–596. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.12.005

Li, Q., Rao, J., & Fazio, P. (2009). Development of HAM tool for building envelope analysis. *Building and Environment*, *44*(5), 1065–1073. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.017

Liu, M., Li, C., & Wang, Q. (2019). Microstructural characteristics of larch wood treated by high-intensity microwave. *BioResources*, *14*(1), 1174–1184. https://doi.org/10.15376/biores.14.1.1174-1184

Loeb, A. (1954). Thermal Conductivity : VIII , A Theory of Thermal Conductivity of Porous Materials. *Journal of the American Ceramic Society*, *37*(2), 96–99.

Lou, W., Huang, M., Zhang, M., & Lin, N. (2012). Experimental and zonal modeling for wind pressures on double-skin facades of a tall building. *Energy and Buildings*, *54*, 179–191. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.025

Louis, A., Evrard, A., Biot, B., Courard, L., & Lebeau, F. (2013). De l ' expérimentation à la modélisation des propriétés hygrothermiques de parois isolées en paille. *31èmes Rencontres de l'AUGC*, 12.

Lozano, A. L. (2007). *Etude expérimentale du changement de phase liquide/gaz dans un sol hygroscopique - Evaporation et condensation de l'eau, dissolution du CO2*. Université Montpellier 2.

Luikov, A. V. (1966). *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*. Pergamon. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2013-0-08150-9

Magniont, C. (2010). *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources* [Université Toulouse III - Paul Sabatier]. https://doi.org/10.1177/019263659507957205

Magniont, C., Escadeillas, G., Coutand, M., & Oms-Multon, C. (2012). Use of plant aggregates in building ecomaterials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *16*(SUPPL. 1). https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682452

Marceau, S., Glé, P., Guéguen-Minerbe, M., Gourlay, E., Moscardelli, S., Nour, I., & Amziane, S. (2017). Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, *139*, 524–530. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.11.129

Marechal, V., & Rigal, L. (1999). Characterization of by-products of sunflower culture – commercial applications for stalks and heads. *Industrial Crops and Products*, *10*(3), 185–200. https://doi.org/10.1016/S0926-6690(99)00023-0

Maref, W., Lacasse, M., & Booth, D. G. (2004). Large-scale laboratory measurements and benchmarking of an advanced hygrothermal model. *CIB T1S1*.

Martínez-Garrido, M. I., Aparicio, S., Fort, R., Anaya, J. J., & Izquierdo, M. A. G. (2014). Effect of solar radiation and humidity on the inner core of walls in historic buildings. *Construction and Building Materials*, *51*, 383–394. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.068

Mathias, J. D., Alzina, A., Grédiac, M., Michaud, P., Roux, P., De Baynast, H., Delattre, C., Dumoulin, N., Faure, T., Larrey-Lassalle, P., Mati-Baouche, N., Pennec, F., Sun, S., Tessier-Doyen, N., Toussaint, E., & Wei, W. (2015). *Upcycling sunflower stems as natural fibers for biocomposite applications*. BioResources. https://doi.org/10.15376/biores.10.4.8076-8088

Mati-Baouche, N. (2015). *Conception d'isolants thermiques à base de broyats de tiges de*

tournesol et de liants polysaccharidiques. Universit´e Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

Mazhoud, B., Collet, F., Pretot, S., & Chamoin, J. (2016). Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters. *Building and Environment*, *96*, 206–216. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.013

Mazhoud, B., Collet, F., Pretot, S., & Lanos, C. (2017). Mechanical properties of hemp-clay and hemp stabilized clay composites. *Construction and Building Materials*, *155*, 1126–1137. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.121

Mbailassem, F., Leclere, Q., Redon, E., & Gourdon, E. (2014). Absorption acoustique large bande par résonateurs quart-d'onde couplés. *12e Congrès Français d'Acoustique CFA 2014*, 1985–1991.

McGregor, F., Fabbri, A., Ferreira, J., Simões, T., Faria, P., & Morel, J. C. (2017). Procedure to determine the impact of the surface film resistance on the hygric properties of composite clay/fibre plasters. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *50*(4). https://doi.org/10.1617/s11527-017-1061-3

McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., & Shea, A. (2014). Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. *Building and Environment*, *75*, 11–18. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.009

McGregor, F., Heath, A., Shea, A., & Lawrence, M. (2014). The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment*, *82*, 599–607. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027

Mchirgui, W. (2012). *Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique : Application aux matériaux cimentaires*. Université de La Rochelle.

McLean, R. C., Galbraith, G. H., & Sanders, C. H. (1990). Moisture transmission testing of building materials and the presentation of vapour permeability values. *Batiment International, Building Research & Practice*, *18*(2), 82–91. https://doi.org/10.1080/01823329008727018

Medic, D., Darr, M., Shah, A., & Rahn, S. (2012). The effects of particle size, different corn stover components, and gas residence time on torrefaction of corn stover. *Energies*, *5*(4), 1199–1214. https://doi.org/10.3390/en5041199

Medjelekh, D., Ulmet, L., & Dubois, F. (2017). Characterization of hygrothermal transfers in the unfired earth. *Energy Procedia*, *139*, 487–492. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.242

Medjelekh, D., Ulmet, L., Gouny, F., Fouchal, F., Nait-Ali, B., Maillard, P., & Dubois, F. (2016). Characterization of the coupled hygrothermal behavior of unfired clay masonries: Numerical and experimental aspects. *Building and Environment*, *110*, 89–103. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.037

Merakeb, S., Dubois, F., & Petit, C. (2009). Modeling of the sorption hysteresis for wood. *Wood Science and Technology*, *43*, 575–589.

Merckx, B., Dudoignon, P., Garnier, J. P., & Marchand, D. (2012). Simplified transient

hot-wire method for effective thermal conductivity measurement in geo materials: Microstructure and saturation effect. *Advances in Civil Engineering*, *2012*(1), 10. https://doi.org/10.1155/2012/625395

Mercury, L., Vieillard, P., & Tardy, Y. (2001). Thermodynamics of ice polymorphs and "ice-like" water in hydrates and hydroxides. *Applied Geochemistry*, *16*(2), 161–181. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00025-1

Mhiri, T., Bonnard, P., & Zégers, J.-P. (2016). *L'observatoire national des ressources en biomasse. Évaluation des ressources disponibles en France.* http://www.franceagrimer.fr/content/download/15926/119849/file/2015-Publication-ONRB-VF.pdf

Mihoubi, D., & Bellagi, A. (2006). *Thermodynamic analysis of sorption isotherms of bentonite. 38*, 1105–1110. https://doi.org/10.1016/j.jct.2005.11.010

Miki, Y. (1990a). Acoustical properties of porous materials - Generalization of empirical models. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, *11*(1), 25–28.

Miki, Y. (1990b). Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany-Bazley models. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, *11*(1), 19–24. https://doi.org/https://doi.org/10.1250/ast.11.19

Montavon, M. (2010). *Optimisation of urban form by the evaluation of the solar potential.* Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Moro, F., & Böhni, H. (2002). Ink-bottle effect in mercury intrusion porosimetry of cement-based materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, *246*(1), 135–149. https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7962

Morsy, M. I. N. (2011). *Properties of rice straw cementitious composite.* Technische Universität Darmstadt.

Moujalled, B., Aït Ouméziane, Y., Moissette, S., Bart, M., Lanos, C., & Samri, D. (2018). Experimental and numerical evaluation of the hygrothermal performance of a hemp lime concrete building: A long term case study. *Building and Environment*, *136*(December 2017), 11–27. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.025

Mukhopadhyaya, P., Batcheller, D., Kumaran, M. K., Lackey, J. C., Van Reenen, D., & Normandin, N. (2011). Correlation between water vapour and air permeability of building materials: experimental observations. *Journal of ASTM International (JAI)*, *8*(3), 1–14. https://doi.org/https://doi.org/10.1520/JAI102924

Murphy, F., Pavia, S., & Walker, R. (2010). An assessment of the physical properties of lime-hemp concrete. *BRI/CRI*, *2*, 431–439.

Naono, H., & Hakuman, M. (1993). Analisys of porous texture by menas of water vapor adsorption isotherm with particular attention to lower limit of hysteresis loop. *Journal of Colloid and Interface Science*, *158*, 19–26.

Nations Unies. (2019). *Rapport sur les objectifs de développement durable 2019.*

Nguyen, S. T., Tran Le, A. D., Vu, M. N., To, Q. D., Douzane, O., & Langlet, T. (2016). Modeling thermal conductivity of hemp insulation material: A multi-scale

homogenization approach. *Building and Environment*, *107*, 127–134. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.026

Nguyen, T.-T., Picandet, V., Amziane, S., & Baley, C. (2009). Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *13*(9), 1039–1050. https://doi.org/10.3166/ejece.13.1039-1050

Nguyen, T. T. (2010). *Contribution à l ' étude de la formulation et du procédé de fabrication d ' éléments de construction en béton de chanvre*. Université de Bretagne Sud.

Niedermann, R., Psikuta, A., & Rossi, R. M. (2014). Heat flux measurements for use in physiological and clothing research. *International Journal of Biometeorology*, *58*(6), 1069–1075. https://doi.org/10.1007/s00484-013-0697-0

Nield, D. A., & Bejan, A. (2013). *Convection in Porous Media*. Springer.

Niez, B. (2015). *Développement d ' un matériau bio -sourcé pour la construction : le béton de tournesol* (Issue 0). Polytech'Clermont Ferrand.

Niyigena, C. (2016). *Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne*. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

Nozahic, V., & Amziane, S. (2012). Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *43*(11), 1837–1849. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2012.07.011

Nozahic, V., Amziane, S., Torrent, G., Saïdi, K., & De Baynast, H. (2012). Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder. *Cement and Concrete Composites*, *34*(2), 231–241. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002

Nuamah, A., Malmgren, A., Riley, G., & Lester, E. (2015). Biomass co-firing. In *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 55–73). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00506-0

O'Connell, B. M., McGloughlin, T. M., & Walsh, M. T. (2010). Factors that affect mass transport from drug eluting stents into the artery wall. *BioMedical Engineering Online*, *9*(15). https://doi.org/10.1186/1475-925X-9-15

Olny, X., & Boutin, C. (2003). Acoustic wave propagation in double porosity media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *114*(1), 73–89. https://doi.org/10.1121/1.1534607

Olny, X., & Panneton, R. (2008). Acoustical determination of the parameters governing thermal dissipation in porous media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *123*(2), 814–824. https://doi.org/10.1121/1.2828066

Ouali, S. (2009). Thermal Conductivity in Relation To Porosity and Geological Stratigraphy. In *United Nations University - Geothermal Training Program* (Issue 23).

Oumeziane, Y. A. (2013). *Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre*. INSA de Rennes.

Ouméziane, Y. A., Moissette, S., Bart, M., & Lanos, C. (2012). Effect of coating on the hygric performance of a hemp concrete wall To cite this version : Effect of coating on the hygric performance of a hemp concrete wall. *5th IBPC*, 109–116. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00801140

PACTE. (2017). *Analyse détaillée du parc résidentiel existant*.

PACTE. (2020). *MOOC rénovation performante : les clés de la réhabilitation énergétique*.

Palumbo, M. (2015). *Contribution to the development of new bio-based thermal insulation materials made from vegetal pith and natural binders : hygrothermal performance , fire reaction and mould growth resistance*.

Panneton, R., & Olny, X. (2006). Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *119*(4), 2027–2040. https://doi.org/10.1121/1.2169923

Parc naturel régional Livradois-Forez. (2015). parc-livradois-forez.org

Paul, S. K., & Chakraborty, S. (2018). Microwave-assisted ionic liquid-mediated rapid catalytic conversion of non-edible lignocellulosic Sunn hemp fibres to biofuels. *Bioresource Technology*, *253*(January), 85–93. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.010

Pavlík, Z., Žumár, J., Pavlíková, M., & Černý, R. (2012). A Boltzmann transformation method for investigation of water vapor transport in building materials. *Journal of Building Physics*, *35*(3), 213–223. https://doi.org/10.1177/1744259111418329

Peng, C. (2016). Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 453–465. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.078

Perrot, C. (2006). *Microstructure et Macro-Comportement Acoustique : Approche par reconstruction d ' une Cellule Élémentaire Représentative*. Université de Sherbrooke, Institut national des sciences appliquées de Lyon.

Peuhkuri, R., Rode, C., & Hansen, K. K. (2008). Non-isothermal moisture transport through insulation materials. *Building and Environment*, *43*(5), 811–822. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.021

Philip, J. R., & De Vries, D. A. (1957). Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions, American Geophysical Union*, *38*(2), 222–232. https://doi.org/10.1029/TR038i002p00222

Picandet, V., Tronet, P., & Baley, C. (2011). Hemp shiv characterisation : Particle size distribution, Water adsorption and Bulk compressibility. *Biomaterials & Binders for Construction: European Workshop in Darmstadt, November 2011*.

Pinto, J., Vieira, B., Pereira, H., Jacinto, C., Vilela, P., Paiva, A., Pereira, S., Cunha, V. M. C. F., & Varum, H. (2012). Corn cob lightweight concrete for non-structural applications. *Construction and Building Materials*, *34*, 346–351.

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.043

Piot, A. (2009). *Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique*. INSA de Lyon.

Pouget Consultants. (2020). *MOOC "Bâti existant et humidité - Diagnostic avant réhabilitation."*

Poyet, S. (2009). Experimental investigation of the effect of temperature on the fi rst desorption isotherm of concrete. *Cement and Concrete Research*, *39*(11), 1052–1059. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.019

Pozo-Antonio, J. S. (2015). Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Construction and Building Materials*, *77*, 472–478. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115

Pretot, S., Collet, F., & Garnier, C. (2014). Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *Building and Environment*, *72*, 223–231. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.010

Pride, S. R., Morgan, F. D., & Gangi, A. F. (1993). Drag forces of porous-medium acoustics. *Physical Review B*, *47*(9), 4964–4978. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.4964

Progelhof, R. C., Throne, J. L., & Ruetsch, R. R. (1976). Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review. *Polymer Engineering & Science*, *16*(9), 615–625. https://doi.org/10.1002/pen.760160905

Prommas, R. (2011). Theoretical and experimental study of heat and mass transfer mechanism during convective drying of multi-layered porous packed bed. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *38*(7), 900–905. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.03.031

Qin, M., Belarbi, R., Ait-Mokhtar, A., & Nilsson, L. O. (2008). Nonisothermal moisture transport in hygroscopic building materials: Modeling for the determination of moisture transport coefficients. *Transport in Porous Media*, *72*(2), 255–271. https://doi.org/10.1007/s11242-007-9148-x

Qin, M., Belarbi, R., Aït-Mokhtar, A., & Nilsson, L. O. (2009). Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials. *Construction and Building Materials*, *23*(2), 967–975. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.015

Qin, M., Belarbi, R., Aït-Mokhtar, A., & Seigneurin, A. (2006). An analytical method to calculate the coupled heat and moisture transfer in building materials. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *33*(1), 39–48. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.08.001

Quenard, D., & Sallee, H. (1992). Water vapour adsorption and transfer in cement-based materials: a network simulation. *Materials and Structures*, *25*(9), 515–522. https://doi.org/10.1007/BF02472447

Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A. D., Promis, G., Laidoudi, B., Crigny, A., Dupre, B., & Langlet, T. (2015). Characterization of flax lime and hemp lime concretes:

Hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy and Buildings*, *88*, 91–99. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.043

Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A. D., Promis, G., & Langlet, T. (2016). Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete. *Construction and Building Materials*, *102*, 679–687. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021

Ransom, B., & Helgeson, H. C. (1994). Estimation of the standard molal heat capacities, entropies and volumes of 2:1 clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *58*(21), 4537–4547. https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90189-9

Raoof, A. (1998). *Adsorption, distribution et dynamique de l'eau dans les milieux poreux*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Raoof, A., Guilbaud, J. P., Van Damme, H., Porion, P., & Levitz, P. (1998). Analysis of the multilayer thickness relationship for water vapor and nitrogen adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, *206*(1), 1–9. https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5704

Real, S., Bogas, J. A., Glória, G. M., & Ferrer, B. (2016). Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, *68*(15), 798–808. https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00424

Rebaia Remache, L. (2011). *Modelisation des phenomenes de transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux hygroscopiques. Application au séchage et aux parois des bâtiments*. Université de Constantine.

Remki, B., Abahri, K., Mahfoud, T., & Belarbi, R. (2012). Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient. *International Journal of Thermal Sciences*, *57*, 135–141. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.005

RFCP (ouvrage collectif). (2011). *Règles Professionnelles de la construction en paille* (Le Moniteur (Ed.)).

Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, *1*. https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.1745010

River, B. H., Vick, C. B., & Gillespie, R. H. (1991). Wood as an adherend. In *Treatise on adhesion and adhesives* (Vol. 7, pp. 1–23). http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1991/river91a.pdf

Robinson, D., & Stone, A. (2004). Solar radiation modelling in the urban context. *Solar Energy*, *77*(3), 295–309. https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.05.010

Rode, C., Hens, H., & Janssen, H. (2008). IEA Annex 41 whole building heat, air, moisture response. In *Closing seminar, Nordic Building Physics Conference*.

Rode, C., Peuhkuri, R. H., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., & Arfvidsson, J. (2007). Moisture Buffering of Building Materials. *Journal of ASTM International (JAI)*, *4*(5), 1–12.

Rouquerol, J., Avnir, D., Fairbridge, C. W., Everett, D. H., Haynes, J. H., Pernicone, N., Ramsay, J. D. F., Sing, K. S. W., & Unger, K. K. (1994). Recommendations for

the characterization of porous solids. *Pure and Applied Chemistry*, *66*(8), 1739–1758.

Sabapathy, K. A., & Gedupudi, S. (2019). Straw bale based constructions: Measurement of effective thermal transport properties. *Construction and Building Materials*, *198*, 182–194. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.256

Sáez-Pérez, M. P., Brümmer, M., & Durán-Suárez, J. A. (2020). A review of the factors affecting the properties and performance of hemp aggregate concretes. *Journal of Building Engineering*, *31*(March). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101323

Samarasekara, S. A. L., & Coorey, R. V. (2011). Thermal capacity as a function of moisture content of Sri Lankan wood species: Wheatstone bridge method. *Proceedings of the 27th Technical Sessions - Institute of Physics*, *27*(January), 9–16.

Samri, D. (2008). *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.

Sanders, C. (1996). Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts. *IEA Annex 24, Final Report, Volume 2*.

Sanders, C. (2008). Climate change and its implications fot hygrothermal modelling. *IEA ECBCS Annex 41 Closing Seminar*, 105–115.

SCIBO. (2016). *La charpente industrialisée en bois*.

Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., & Chotard, T. (2008). Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*, *28*(1), 183–192. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.019

Sellitto, A., Cimmelli, V. A., & Jou, D. (2016). *Mesoscopic Theories of Heat Transport in Nanosystems*. SEMA SIMAI Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27206-1

Seng, B, Magniont, C., Spagnol, S., & Lorente, S. (2017). Assessment of a precast hemp concrete hygrothermal properties. *2nd International Conference on Bio-Based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical Valorisation of GRAnular and FIbrous Materials*, *35*(2), 386–393.

Seng, Billy, Magniont, C., & Lorente, S. (2019). Characterization of a precast hemp concrete . Part I : Physical and thermal properties. *Journal of Building Engineering*, *24*(July 2018), 100540. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.016

Seng, Billy, Magniont, C., Lorente, S., & Spagnol, S. (2016). Evaluation of Hemp Concrete Thermal Properties. *2016 Intl IEEE Conferences on Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People, and Smart World Congress (UIC/ATC/ScalCom/CBDCom/IoP/SmartWorld)*. https://doi.org/10.1109/UIC-ATC-ScalCom-CBDCom-IoP-SmartWorld.2016.0154

Shea, A., Lawrence, M., & Walker, P. (2012). Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building. *Construction and Building Materials*, *36*, 270–275.

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123

Siau, J. F. (1984). *Transport processes in wood*. Springer.

Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquerol, J., & Siemieniewska, T. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity (IUPAC Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry*, *57*(4), 630–619.

Sing, Kenneth S W. (1995). Physisorption of Nitrogen by Porous Materials Ib. *Journal of Porous Materials*, *2*, 5–8.

SNCCBLC. (2000). *Charpentes en bois lamellé collé. Guide pratique de conception et de mise en oeuvre*. Eyrolles.

Sotehi, N. (2010). *Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation*. Université Mentouri.

Soudani, L. (2016). *Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material*. ENTPE.

Soudani, L., Fabbri, A., Morel, J. C., Woloszyn, M., Chabriac, P. A., Wong, H., & Grillet, A. C. (2016). Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modeling of earth based materials. *Energy and Buildings*, *116*, 498–511. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.025

Souza, A. M., Nascimento, M. F., Almeida, D. H., Lopes Silva, D. A., Almeida, T. H., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2018). Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: A cleaner production alternative. *Journal of Cleaner Production*, *193*, 549–562. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.087

Steeman, H. J., Van Belleghem, M., Janssens, A., & De Paepe, M. (2009). Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage. *Building and Environment*, *44*(10), 2176–2184. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.016

Steeman, M., Janssens, A., Steeman, H. J., Van Belleghem, M., & De Paepe, M. (2010). On coupling 1D non-isothermal heat and mass transfer in porous materials with a multizone building energy simulation model. *Building and Environment*, *45*(4), 865–877. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.006

Svennberg, K. (2006). *Moisture Buffering in the Indoor Environment. Report TVBH-1016 Lund 2006 Building Physics LTH.* https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2011.01.003.Impaired

Talukdar, P., Olutmayin, S. O., Osanyintola, O. F., & Simonson, C. J. (2007a). An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. Part I: Experimental facility and material property data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *50*(23–24), 4527–4539. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.026

Talukdar, P., Olutmayin, S. O., Osanyintola, O. F., & Simonson, C. J. (2007b). An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer

models of hygroscopic building materials. Part II: Experimental, numerical and analytical data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *50*, 4915–4926. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.025

Taoukil, D., El Bouardi, A., Sick, F., Mimet, A., Ezbakhe, H., & Ajzoul, T. (2013). Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite. *Construction and Building Materials*, *48*, 104–115. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.067

Tariku, F., Kumaran, K., & Fazio, P. (2010). Integrated analysis of whole building heat, air and moisture transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *53*(15–16), 3111–3120. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.016

Taylor, P., & Luther, M. B. (2004). Evaluating rammed earth walls: A case study. *Solar Energy*, *76*(1–3), 79–84. https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.026

Thieblesson, L. M. (2018). *Élaboration et caractérisation de matériaux issus de ressources locales recyclées ou biosourcée*. Université de Rennes,Université Félix Houphouët-Boigny.

Thomas, N. L., & Birchall, J. D. (1983). The retarding action of sugars on cement hydration. *Cement and Concrete Research*, *13*(6), 830–842. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846(83)90084-4

Tinker, J. a., & Cabrera, J. G. (1992). Modeling the Thermal Conductivity of Concrete Based on Its Measured Density and Porosity. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings V Proceedings of the ASHRAE/DOE/BTECC Conference*, 91–95. https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/1992 B5 papers/013.pdf

Tonoli, G. H. D., Belgacem, M. N., Bras, J., & Lahr, F. A. R. (2012). Impact of bleaching pine fibre on the fibre / cement interface. *Journal of Materials Science*, *47*, 4167–4177. https://doi.org/10.1007/s10853-012-6271-z

Trabelsi, A. (2010). *Études Numérique Et Expérimentale Des Transferts Hygrothermiques Dans Les Matériaux Poreux De Construction* [La Rochèlle]. http://www.theses.fr/2010LAROS291

Trabelsi, A., Belarbi, R., Abahri, K., & Qin, M. (2012). Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient. *Building Simulation*, *5*(2), 107–115. https://doi.org/10.1007/s12273-012-0063-x

Trabelsi, A., Belarbi, R., Abahri, K., & Qin, M. (2013). Reply on the comments regarding the paper "Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient." *Building Simulation*, *6*(1), 109–110. https://doi.org/10.1007/s12273-013-0100-4

Tran Le, A.D., Samri, D., Rahim, M., Douzane, O., Promis, G., & Langlet, T. (2015). Effect of Temperature-dependent Sorption Characteristics on The Hygrothermal Behavior of Hemp Concrete. *Energy Procedia*, *78*, 1449–1454. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.169

Tran Le, Anh D., Samri, D., Douzane, O., Promis, G., Nguyen, A. T., & Langlet, T. (2020). Effect of Temperature Dependence of Sorption on Hygrothermal

Performance of a Hemp Concrete Building Envelope. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* (Vol. 2). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.10597-1

Tran Le, Anh Dung. (2010). *Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment*. Université de Reims - Champagne Ardenne.

Tronet, P. (2013). *Contribution a l'étude des materiaux chaux-chanvre : Influence du compactage sur les proprietes*. Université de Bretagne Sud.

Troppová, E., Švehlík, M., Tippner, J., & Wimmer, R. (2015). Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *48*(12), 4077–4083. https://doi.org/10.1617/s11527-014-0467-4

Uchaipichat, A. (2005). *Experimental investigation and constitutive modelling of thermo-hydro-mechanical coupling in unsaturated soils*. University of New South Wales.

Umnova, O., Attenborough, K., Shin, H. C., & Cummings, A. (2005). Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials. *Applied Acoustics*, *66*(6), 607–624. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.02.005

Vafai, K., Alkire, R. L., & Tien, C. L. (1985). An experimental investigation of heat transfer in variable porosity media. *Journal of Heat Transfer*, *107*, 642–647. https://doi.org/10.1134/S0018151X09050113

Van den Berg, C. (1984). Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the G. A. B. model of sorption. *Engineering Science in the Food Industry*, *1*, 311–321.

Van Der Linden, K., Boerstra, A. C., Raue, A. K., & Kurvers, S. R. (2002). Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response. *Energy and Buildings*, *34*(7), 737–744. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00144-X

van Schijndel, A. W. M. (2009). Integrated modeling of dynamic heat, air and moisture processes in buildings and systems using simulink and COMSOL. *Building Simulation*, *2*(2), 143–155. https://doi.org/10.1007/S12273-009-9411-x

Verdier, T., Balthazard, L., Montibus, M., Magniont, C., Evon, P., & Bertron, A. (2020). Using glycerol esters to prevent microbial growth on sunflower-based insulation panels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 1–28. https://doi.org/https://doi.org/10.1680/jcoma.20.00002

Vermeulen, T. (2014). *Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire*. Université de Technologie de Compiègne.

Viel, M., Collet, F., & Lanos, C. (2017). Thermal Insulation Materials From Renewable Resources : Thermal and Hygric Performances. *International Conference of Bio-Based Building Materials*.

Vinceslas, T. (2019). *Caractérisation d'éco-matériaux Terre-Chanvre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement* [Université de Bretagne

Sud]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02569445

Vo, T. T. L., & Navard, P. (2016). Treatments of plant biomass for cementitious building materials – A review. *Construction and Building Materials*, *121*, 161–176. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.125

Vololonirina, O., Coutand, M., & Perrin, B. (2014). Characterization of hygrothermal properties of wood-based products - Impact of moisture content and temperature. *Construction and Building Materials*, *63*, 223–233. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.014

Vololonirina, O., & Perrin, B. (2016). Inquiries into the measurement of vapour permeability of permeable materials. *Construction and Building Materials*, *102*, 338–348. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.126

Vu, T. L., Spagnol, S., & Magniont, C. (2015). Experimental study of the hygrothermal behaviour of hemp shives-based precast blocks at material and wall scales. *Proceedings of the First International Conference on Bio-Based Building Materials*, *June*, 575–582.

Walker, R., Pavia, S., & Mitchell, R. (2014). Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials*, *61*, 340–348. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065

Walker, Rosanne, & Pavía, S. (2015). Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings. *Building and Environment*, *94*(P1), 155–165. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.033

Wang, G., & Han, Y. (2018). Research on the Performance of Straw Fiber Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *394*(3). https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/3/032080

Wang, J., Zuo, Y., Xiao, J., Li, P., & Wu, Y. (2019). Construction of compatible interface of straw / magnesia lightweight materials by alkali treatment. *Construction and Building Materials*, *228*, 116712. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116712

Wastiels, L., Schifferstein, H. N. J., Heylighen, A., & Wouters, I. (2012). Relating material experience to technical parameters: A case study on visual and tactile warmth perception of indoor wall materials. *Building and Environment*, *49*(1), 359–367. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.009

Weart, S. R. (2008). *The discovery of global warming*. Hardvard University Press.

Wei, Y., Song, C., Chen, B., & Ahmad, M. R. (2019). Experimental investigation on two new corn stalk biocomposites based on magnesium phosphate cement and ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials*, *224*, 700–710. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.100

Wenzel, R. N. (1936). Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, *28*(8), 988–994.

Whitaker, S. (1977). Toward a Diffusion Theory of Drying. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, *16*(4), 408–414. https://doi.org/10.1021/i160064a003

Williams, J., Lawrence, M., & Walker, P. (2016). A method for the assessment of the internal structure of bio-aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, *116*, 45–51. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.088

Williams, J., Lawrence, M., & Walker, P. (2018). The influence of constituents on the properties of the bio-aggregate composite hemp-lime. *Construction and Building Materials*, *159*, 9–17. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.10.109

Woloszyn, M., Le Pierrès, N., Kedowidé, Y., Virgone, J., Trabelsi, A., Slimani, Z., Mougel, E., Reymond, R., Rafidiarison, H., Perré, P., Pierre, F., Belarbi, R., Issaadi, N., Abahri, K., Bejat, T., Piot, A., Wurtz, E., Duforestel, T., Colmet Daâge, M., ... Legrand, O. (2014). Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants. *Conférence IBPSA*. http://www.agence-nationale-recherche.fr/Projet-ANR-10-HABI-0005

Woloszyn, M., May, M., & Kwiatkowski, J. (2006). Influence des conditions aux limites sur les mesures de « l'inertie hygrique » des matériaux de construction. *24ème Rencontres Universitaires Du Génie Civil*, 1–8.

Woloszyn, M., & Rode, C. (2008). Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings. *Building Simulation*, *1*(1), 5–24. https://doi.org/10.1007/s12273-008-8106-z

Wu, Q. (2015). Estimation du volume élémentaire représentatif associé à la détermination d ' isothermes de désorption sur bétons. *Rencontres Universitaires de Génie Civil.*

Wu, T., Temizer, I., & Wriggers, P. (2013). Computational thermal homogenization of concrete. *Cement and Concrete Composites*, *35*(1), 59–70. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.026

Xu, M. (2016). *Polysaccharides from Sunflower Stalk Pith : Chemical , Structural , and Partial Physicochemical Characterization.* University of Guelph.

Yin, Z., Pan, Z., Wang, C., Dong, Y., & Ou, Y. (2007). Composition, structure and mechanical properties of several natural cellular materials. *Chinese Science Bulletin*, *52*(21), 2903–2908. https://doi.org/10.1007/s11434-007-0432-5

Youssef, A., Picandet, V., Lecompte, T., & Challamel, N. (2015). Comportement du béton de chanvre en compression simple et cisaillement. *Rencontres Universitaires de Génie Civil.*

Yu, Z. T., Xu, X., Fan, L. W., Hu, Y. C., & Cen, K. F. (2011). Experimental measurements of thermal conductivity of wood species in China: Effects of density, temperature, and moisture content. *Forest Products Journal*, *61*(2), 130–135. https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.2.130

Zach, J., Hubertova, M., & Hroudova, J. (2009). Possibilities of determination of thermal conductivity of lightweight concrete with utilization of non stationary hot-wire method. *10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering*, *February*, 207–213.

Zadeh, V. Z., & Bobko, C. P. (2014). Nanomechanical characteristics of lightweight

aggregate concrete containing supplementary cementitious materials exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, *51*, 198–206. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.034

Zaknoune, A., Glouannec, P., Salagnac, P., & Chauvelon, P. (2009). Estimation of hydrous diffusion coefficients of building materials during drying. *Colloque AFSIA*.

Zakri, T., Laurent, J. P., & Vauclin, M. (1998). Theoretical evidence for "Lichtenecker's mixture formulae" based on the effective medium theory. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *31*(13), 1589–1594. https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/13/013

Ze-Zu, L. (1982). Reduction of energy consumption by enhancing the thermal resistance of cold storage building. *Conference on Energy, Resources and Environment*, 413–424. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-029396-7.50057-4

Zwikker, C., & Kosten, C. W. (1949). *Sound Absorbing Materials*. Elsevier Publishing Company.

Annexe A - Comparaison de matériaux isolants

Tableau A. 1 - Récapitulatif des performances des matériaux.

	Références	**Masse volumique ρ [kg/m³]**	**Porosité ϕ [%]**	**Conductivité thermique λ [W/(m·K)]**	**Résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ**	**Energie grise** [kWh/m³]
Matériaux biosourcés						
Béton moelle de tournesol	Thèse Abbas	200 à 240	92 – 94%	0,065 à 0,075	4,5 à 6	
Béton de chanvre	(Antonin Fabbri et al., 2015; Hustache & Arnaud, 2008)	400 à 560	60 à 80 % (moy 70%)	0,07 à 0,3 (moy 0,13)	5-8	50 à 90
Laine de chanvre	(El Sawalhi, 2015)	25 à 80	85 à 95%	0,026 à 0,040	1-2	48
Chaux-chanvre	(Barclay et al., 2014)	304	72 à 80%	0,07 à 0,1 (selon le taux d'humidité)	3-6,5	50
Ouate de cellulose	(Thieblesson, 2018)	25 à 70	97%	0,037 à 0,042	2	50
Fibre de bois	(Thieblesson, 2018)	40 à 250	98%	0,037 à 0,005	3-5	1400
Paille	(Louis et al., 2013)	80-120	93%	0,06 à 0,072	1-2	0 à 20
Laine de lin	(Aghahadi, 2019)	20 à 35	50 à 70% Selon l'état hydrique	0,037 à 0,047	1	30 à 48
Matériaux non biosourcés utilisés traditionnellement en isolation						
Laine de verre	(Cox et al., 2016)	25 à 30		0,032 à 0,046	1	250
Laine de roche		20 à 60		0,033 à 0,44	1	150
Polystyrène		10 à 30		0,027 à 0,040	60 à 150	795
Polyuréthane		28 à 32		0,22 à 0,028	150	974
Béton cellulaire		350	4 à 12%	0,09 à 0,016	5	400

Annexe B - Méthodes de mesure de la conductivité thermique

Tableau B. 1 - Caractérisation des méthodes de conductivité thermique (Aghahadi, 2019).

Nom de la méthode	**Régime**	**Description**	**Avantage(s)**	**Inconvénient(s)**
Plaque chaude gardée	Permanent	A partir d'un élément chauffant, un transfert de chaleur unidirectionnel s'établit à travers les deux échantillons, supposés des plaques infinies et disposés de part et d'autre de l'élément chauffant	Précision des valeurs de lambda	-Adaptée pour la mesure de conductivité thermique de matériaux denses et peu poreux -Nécessite des échantillons de grande taille -Durée de mesure relativement longue
Méthode flash ou impulsionnelle	Transitoire	Consiste à faire absorber un flux de chaleur impulsionnel par une face de l'échantillon et relever l'évolution de la température pendant ce même laps de temps Différents types de montage : Flash face arrière Flash face avant Flash à deux températures	Possibilité de définir plusieurs paramètres tels que la diffusivité et l'effusivité en plus de la conductivité	Adaptée à l'estimation de la diffusivité thermique des matériaux conducteurs mais pas des biosourcés
Méthode du ruban chaud	Transitoire	Méthode intermédiaire entre plan chaud et fil chaud	- Précision, rapidité et simplicité - Milieu non sensible à l'humidité	Choix des dimensions du ruban
Méthode du hot disc – source plane instationnaire (Transient Plane Source)	Transitoire	Assimilable à la méthode du ruban chaud pour un ruban de la forme d'un disque	Effets de bord négligeables	Température moyenne de l'élément chauffant difficile à évaluer Perturbations générées par la connexion filaire
Méthode tri-couche	Transitoire	Mesure de la température moyenne de deux plaques de laiton entre lesquelles	Rapidité de mesure Echantillons de taille réduite	Modélisation et estimation des paramètres compliqués Echantillons de taille réduite (il faut

		l'échantillon est coincé Deux méthodes : Tri-couche cylindre Tri-couche sphère		s'assurer que l'échantillon soit représentatif)
Méthode du fil chaud/ou du sonde fil	Transitoire ou quasi-stationnaire	Distribution radiale du flux de chaleur autour d'un fil chaud. Le fil est coincé entre deux échantillons identiques	-Simplicité de mise en œuvre -Mesure rapide -Applicable aux solides et liquides	-Nécessité de respecter l'hypothèse de semi-infini

Il est important de noter que toutes ces méthodes ne sont pas forcément pertinentes dans l'évaluation d'un matériau biosourcé. Les méthodes à prioriser seront principalement la méthode du ruban chaud, la méthode tri-couche et la méthode du fil chaud (Aghahadi, 2019).

Annexe C - Classification des courbes de sorption et d'hystérésis

Tableau C. 1 - Classification des courbes de sorption (K. S. W. Sing et al., 1985).

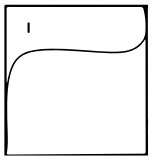
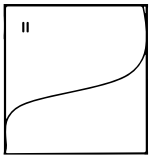
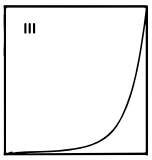
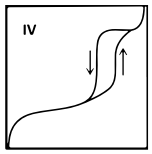
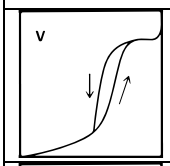
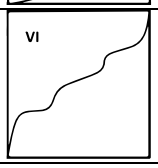
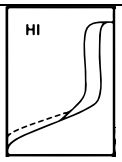
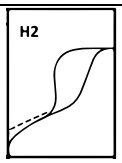
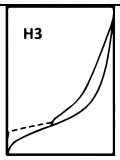
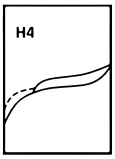
	Classification des courbes de sorption		
Teneur en eau fonction de l' humidité relative		Type 1	La première catégorie est caractérisée par l'existence d'un plateau horizontal. Il traduit une saturation et signifie qu'aucune adsorption ne se produit pour les valeurs plus élevées d'humidité relative. Elle a tendance à se saturer pour des faibles hygrométries. La microstructure du milieu est microporeuse. Le faible écart de pression relative indique notamment une faible diversité en ce qui concerne la taille des pores. Ce premier type découle de la théorie de Langmuir (1918).
		Type 2	L'adsorption augmente progressivement avec la hausse de l'humidité relative. Le fluide adsorbé peut s'épaissir sur plusieurs couches. Elle est caractéristique d'une adsorption multicouche. Le squelette solide est relativement non poreux ou macroporeux.
		Type 3	Le milieu poreux est de même nature que celui du type II. Cependant, l'adsorption du fluide est relativement faible, ce type d'isotherme est rarement rencontré. Ce type d'isotherme indique de fortes interactions adsorbant – adsorbat.
		Type 4	L'isotherme est identique que celui du type II pour les basses humidités relatives. Un palier de saturation se développe pour les hautes pressions de vapeur. Le milieu est mésoporeux et une condensation capillaire se produit. Une hystérésis est observée entre les phases d'adsorption et de désorption.
		Type 5	L'isotherme a le même comportement que celui du type IV avec une faible interaction entre le milieu solide et le fluide adsorbé. Ces isothermes sont rares et indiquent de même que pour le type III de fortes interactions adsorbants – adsorbat.
		Type 6	L'isotherme peut être définie comme isotherme à palier. Elle correspond à un milieu poreux dans lequel l'adsorption se fait progressivement en formant plusieurs couches. Elle est caractéristique d'une adsorption sur une surface uniforme.

Tableau C. 2 - Classification des courbes hystérésis (K. S. W. Sing et al., 1985).

	Classification des cycles d'hystérésis		
Teneur en eau fonction de		Type 1	Généralement obtenu pour des structures poreuses de forme sphérique, et pour les isothermes de type IV. Il est observé dans le cas d'adsorbants ayant une distribution très étroite de mésopores.

		Type 2	Observé pour les matériaux caractérisés par une large distribution porale, avec des mésopores en intercommunication. Ce type d'hystérésis est le plus fréquent.
		Type 3	Rencontrés dans le cas de particules plates séparées par des pores inter- feuillets. Ils apparaissent pour des isothermes de type II. La boucle H3 est observée principalement dans le cas où le milieu poreux contient des agrégats. La boucle H4 est quant à elle observée pour des adsorbants microporeux avec des feuillets liés entre eux entre lesquels peut se produire une condensation capillaire. Ainsi, ces types s'appliquent à des particules plates séparées par des pores interfeuillets.
		Type 4	

Annexe D -Méthodes de mesure

D.1. Aire de la surface spécifique

Théorie Brunauer-Emmett-Teller (BET)

Cette théorie, présentée par (Stephen Brunauer et al., 1938) est une généralisation de la théorie de Langmuir. Lorsque ce dernier explique l'adsorption en couches monomoléculaires à la surface d'un solide, la théorie BET explique le phénomène pour l'adsorption en couches multimoléculaires (Raoof, 1998). Pour cela, Brunauer, Emmett et Teller adoptent les hypothèses suivantes :

- La vitesse d'évaporation des molécules adsorbées dans une couche est égale à la vitesse de condensation de l'adsorbat sur la couche précédente ;
- La chaleur d'adsorption dans toutes les couches autres que la première est égale à la chaleur de liquéfaction de l'adsorbat ;
- A saturation ($P=P_0$), l'adsorbat se condense comme un liquide libre sur la surface du solide. Le nombre de couches adsorbées devient alors infini (phénomène d'adsorption capillaire).

L'équation obtenue en appliquant ces hypothèses est la suivante :

$$\frac{n}{n_m} = \frac{c\,(P/P_0)}{(1-P/P_0)\big(1+(c-1)(P/P_0)\big)} \qquad \text{(D.1)}$$

Qui est généralement appelée l'équation BET et qui peut être réécrite ainsi :

$$\frac{P}{n\,(P-P_0)} = \frac{1}{n_m c} + \frac{(c-1)}{n_m c}\frac{P}{P_0} \qquad \text{(D.2)}$$

Avec

P [Pa] la pression de vapeur à l'équilibre ;

P_0 [Pa] la pression de vapeur à saturation de l'adsorbat ;

n [kg/kg] la quantité de vapeur adsorbée ;

n_m [kg/kg] la quantité de vapeur nécessaire pour recouvrir l'adsorbant d'une couche monomoléculaire ;

c [-] la constante BET, qui s'exprime comme $c = exp\frac{E_1-E_L}{RT}$, où E_1 correspond à la chaleur de sorption de la première couche, E_L représente la chaleur de liquéfaction caractéristique de la vapeur, R la constante des gaz parfaits et T la température absolue à laquelle a lieu l'adsorption.

Méthode BET

Cette théorie est utilisée pour déterminer l'aire spécifique d'un solide, qui représente l'aire géométrique interne et externe de celui-ci, rapportée à l'unité de masse. La méthode rend compte des irrégularités de la surface à l'échelle moléculaire.

Quand on trace l'équation BET ($\frac{P}{n\,(P-P_0)}$ en fonction de $\frac{P}{P_0}$) aux faibles pressions ($\frac{P}{P_0} <$ 0,35), la fonction est une relation linéaire. La pente est appelée s et elle est égale à $\frac{(c-1)}{n_m c}$. L'ordonnée à l'origine est appelée i et elle est égale à $\frac{1}{n_m c}$. Ce système d'équations donne n_m et c comme solution avec :

$$n_m = \frac{1}{s+i} \qquad c = \frac{s}{i} + 1 \qquad \text{(D.3)}$$

L'aire spécifique S [m^2/g] est alors déduite à partir de la capacité d'une monocouche n_m comme le produit entre le nombre de molécules adsorbé (N_m) et l'encombrement d'une molécule de vapeur adsorbée (Antonin Fabbri, 2006), sachant que $N_m = \frac{n_m}{M} \cdot N_A$. L'expression de l'aire spécifique est alors :

$$S = \frac{n_m}{M} \cdot N_A \cdot A_m \cdot 10^{-20} \quad [\mathrm{m^2/g}] \qquad \text{(D.4)}$$

Avec

M [g/mol] la masse molaire de l'adsorbat ;

A_m [Å^2] l'encombrement d'une molécule de vapeur adsorbée à la surface du solide ;

N_A [1/mol] le nombre d'Avogadro, qui est égal à 6,022·10^{23} molécules par mole.

L'encombrement de la molécule A_m dépend de la topologie de la surface et de la forme de la molécule, et c'est un paramètre dont l'évaluation est délicate (Raoof, 1998). Pour l'azote, (Emmett & Brunauer, 1937) obtiennent une valeur d'A_m de 16,27 Å^2 à partir de la masse volumique de l'azote liquide.

Le protocole de mesure de l'aire de la surface spécifique est décrit dans la norme ISO 9277 standard (International Organization for Standardization, 2010). Dans le cadre de ce projet, la mesure a été menée à l'aide du dispositif NOVAtouch de Quantachrome Instruments (voir **Figure D. 1**).

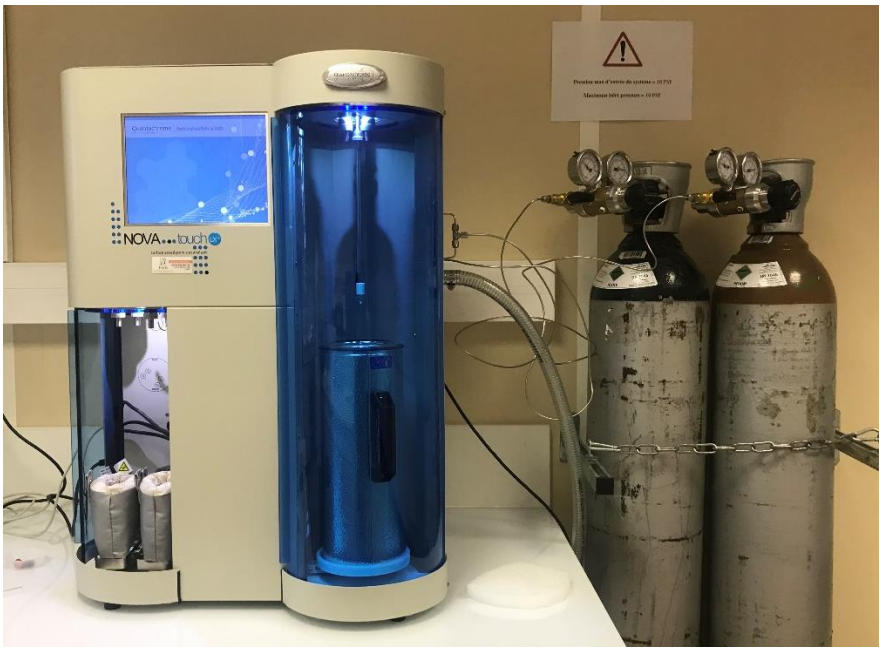


Figure D. 1 - Dispositif de mesure NOVAtouch pour la détermination de la surface spécifique et de la distribution de la taille des pores.

L'appareil est équipé de deux cellules, la cellule gauche sert au dégazage et la cellule droite, à l'acquisition de l'isotherme d'adsorption. Sur la **Figure D. 1**, on peut voir deux bouteilles de gaz, l'une contient de l'hélium pour le dégazage et l'autre de l'azote pour l'adsorption des gaz.

L'échantillon est d'abord écrasé, puis introduit dans le tube à essai. Le dispositif NOVAtouch dégaze l'échantillon par l'effet combiné du chauffage et du vide pendant 24 heures afin d'éliminer de sa surface toutes les substances physiquement adsorbées. Dans cette étude, la température a été limitée à 60 °C pour le test des agrégats végétaux afin d'éviter leur détérioration. Lors du dégazage des échantillons de liant, la température maximale choisie était de 105 °C.

L'unité NOVAtouch effectue un second dégazage en rinçant l'échantillon avec de l'hélium, qui est inerte. L'échantillon est ensuite refroidi à 23 °C. Le tube à essai contenant l'échantillon peut être retiré et pesé pour mesurer la masse sèche de l'échantillon, la masse du tube vide étant connue. Il est ensuite connecté à la cellule d'acquisition, où il sera à nouveau dégazé à l'hélium pour éliminer l'air qui aurait pu pénétrer dans le tube lors de la pesée. Enfin, l'isotherme d'adsorption est déterminé entre 5% et 30% de pression relative (P/P_0) à l'aide d'azote à 77 K.

D.2. Distribution de la taille des pores : Modèle Barrett-Joyner-Halenda (BJH)

Le modèle développé par Barrett, Joyner et Halenda (Barrett et al., 1951) décrit le phénomène de désorption au sein des pores supposés cylindriques. Il intègre deux

phénomènes : la désorption de la vapeur condensée dans les pores, décrite par la loi de Kelvin, et la diminution de la couche d'eau sur la surface avec la pression de vapeur relative (Raoof, 1998). Ce deuxième phénomène n'a lieu qu'une fois le pore s'est vidé de la vapeur condensée par capillarité.

La méthode BJH est une technique répandue pour analyser la répartition de la taille des pores d'un solide. Le principe consiste à étudier en détail l'isotherme de désorption pour relier les changements de teneur en adsorbat à la taille des pores, en utilisant la dépendance entre la sorption physique (monocouche, multicouche et condensation capillaire) et la pression relative (Antonin Fabbri, 2006). Le rayon du pore dans lequel a lieu la désorption pour une pression relative de l'adsorbat donné est défini selon **(D.5)** :

$$R^{BJH}(P/P_0) = r(P/P_0) + t(P/P_0) \qquad \text{(D.5)}$$

Où $r(P/P_0)$ est le rayon du ménisque formé par condensation capillaire, dont la dépendance de la pression relative est bien connue grâce à la loi de Kelvin, et où $t(P/P_0)$ correspond à l'épaisseur de la multicouche adsorbée dans la surface du pore. Cette dernière dépend de la nature du solide (adsorbant) et de l'adsorbat et est définie expérimentalement (Raoof et al., 1998). Dans la littérature, l'évolution de cette épaisseur est appelée « t-curve ». Généralement, il est considéré que deux solides présentent la même « t-curve » pour un adsorbat donné s'ils ont une constante BET c proche.

La méthode BJH peut être appliquée en utilisant la vapeur d'eau à température ambiante ou l'azote à 77 K comme adsorbat. Lorsque l'intervalle de mesure est entre 1,5 et 100 nm avec l'azote, la vapeur d'eau permet également d'analyser des pores légèrement plus petits, à partir de 1,1 nm (Naono & Hakuman, 1993), car la vapeur peut condenser en formant des ménisques de plus petit rayon.

(Kenneth S W Sing, 1995) classifia les pores des adsorbants poreux selon leur taille en micropores (largeur en dessous de 2 nm), mesopores (largeur entre 2 et 50 nm) et macropores (largeur au-dessus de 50 nm). Etant donné que la méthode BJH ne permet pas d'étudier la plupart des macropores, la RILEM suggère l'utilisation de la porosimétrie au mercure pour l'étude des pores au-dessus de 100 nm (Amziane & Collet, 2017).

Dans le cadre de ce projet, la méthode BJH à l'azote à 77 K a été utilisée à l'aide du dispositif NOVAtouch, utilisé également pour le BET. La procédure est la même que pour le BET, à l'exception que l'isotherme d'adsorption est déterminé entre 0 et 99 % de pression relative (P/P_0) au lieu d'entre 5% et 30%.

Annexe E - Autres modèles acoustiques

Le comportement des ondes acoustiques dans un fluide libre est caractérisé par la masse volumique ambiante du fluide ρ_0 et par le module d'incompressibilité adiabatique du fluide K_a. Le nombre d'onde k et l'impédance caractéristique du milieu Z_c peuvent être déduits à partir de ρ_0 et de K_a et ils sont réels (Perrot, 2006). Quand le fluide est confiné dans un solide poreux, les variables qui décrivent son comportement macroscopique sont la densité dynamique $\rho\,(\omega)$ et le module d'incompressibilité dynamique du milieu $K(\omega)$, qui sont des fonctions complexes et dépendent de la pulsation. Elles sont liées à $k(\omega)$ et $Z_c(\omega)$ à travers les formules suivantes :

$$\rho(\omega) = \frac{Z_c(\omega)k(\omega)}{\omega} \qquad \text{(E.1)}$$

$$K(\omega) = \frac{\omega Z_c(\omega)}{k(\omega)} \qquad \text{(E.2)}$$

Où ω représente la pulsation. D'autres paires de fonctions comme les facteurs de réponse adimensionnels $\alpha_{dyn}(\omega)$ (appelé tortuosité dynamique) et $\beta(\omega)$ (facteur de compressibilité dynamique) servent aussi à décrire le matériau.

De nombreuses théories et modèles ont été développés pour décrire le comportement des ondes acoustiques au sein des matériaux poreux. Dans tous les cas, au moins deux fonctions doivent être formulées en fonction d'un nombre de paramètres et suivant un ensemble d'hypothèses et de simplifications.

Concernant le réseau poreux, il est nécessaire d'adopter des géométries simplifiées, comme celles montrées dans la Figure E. 1. La complexité de celle-ci joue un rôle important dans le nombre de paramètres requis pour chaque modèle.

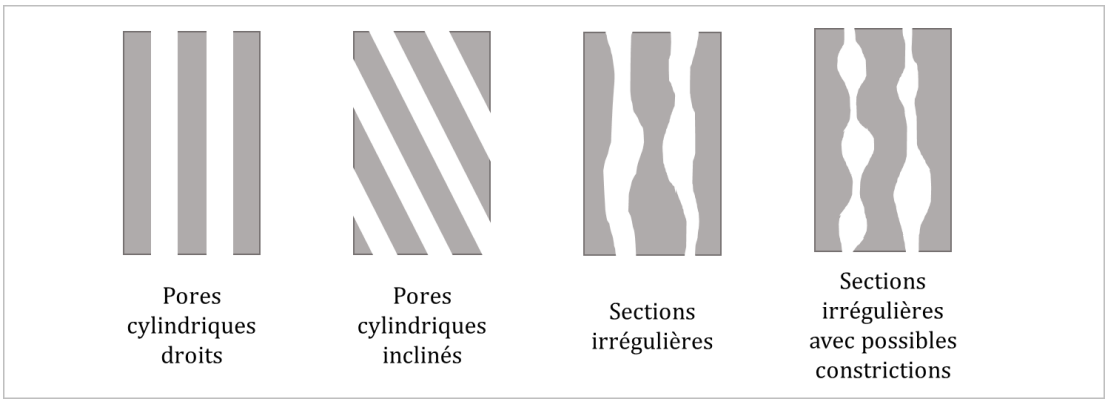


Figure E. 1 - Différentes structures de réseau poreux

En ce qui respecte les mécanismes de dissipation de l'énergie de l'onde acoustique, cités dans l'introduction du Chapitre 3 (pour rappel : les dissipations visqueuses, les

dissipations thermiques et les dissipations structurelles), il est commun d'adopter des simplifications également.

Selon la théorie de la propagation d'onde acoustique visco-thermique, dans un milieu acoustique borné, il existe une couche limite visqueuse **(E.3)** et une couche limite thermique **(E.4)** qui déterminent l'ampleur de la dissipation de l'énergie par frottements visqueux et par conduction thermique entre le fluide et le squelette solide, respectivement.

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_{air,0} \cdot \omega}} \qquad \text{(E.3)}$$

$$\delta_t = \sqrt{\frac{\lambda_{air}}{\rho_{air,0} \cdot C_p \cdot \omega}} \qquad \text{(E.4)}$$

Avec μ [Pa·s] la viscosité de cisaillement de l'air, $\rho_{air,0}$ [kg/m^3] la masse volumique de l'air au repos, ω [rad/s] la pulsation, λ_{air} [W/(m·K)] la conductivité thermique de l'air, C_p [J/(kg·K)] la chaleur spécifique et δ_v, δ_t mesurées en [m]. Si leur dimension est négligeable devant les dimensions caractéristiques du milieu, alors les effets de ces deux couches peuvent être négligés.

D'une autre part, l'hypothèse de squelette rigide consiste à négliger la dissipation structurelle dans la matrice poreuse solide. Elle peut être adoptée pour les matériaux poreux qui sont beaucoup plus rigides ou beaucoup plus lourds que le fluide, et pour une excitation par une onde acoustique à une fréquence beaucoup plus élevée que la fréquence de découplage de phase. Le cas échéant, la matrice solide peut être considérée comme rigide et statique.

La fréquence de découplage de phase f_d [Hz] est définie comme la fréquence à laquelle les effets inertiels dans la matrice solide sont égaux aux effets visqueux dans la phase fluide et sa formule a été donnée par Zwikker & Kosten (Zwikker & Kosten, 1949) :

$$f_d = \frac{\sigma \cdot \phi^2}{2 \cdot \pi \cdot \rho_{app}} \qquad \text{(E.5)}$$

Avec :

σ résistance au passage de l'air [N·s/m^4]
ϕ porosité totale [-]
ρ_{app} masse volumique apparente du matériau [kg/m^3]

A partir de cette fréquence, on considère que les ondes acoustiques ne se propagent que dans l'air (hypothèse du squelette rigide). Les modèles qui partent de l'hypothèse de squelette rigide sont dénommés modèles « fluide-équivalent ».

Plusieurs des modèles acoustiques semi-phénoménologiques et empiriques les plus significatifs seront expliqués ci-après.

E.1. Modèles semi-phénoménologiques

Kirchhoff, 1868

Le premier modèle acoustique développé fut (Kirchhoff, 1868). Il fut le premier à adresser la propagation et l'absorption des ondes acoustiques dans les milieux poreux. Son modèle s'adresse aux solides saturés par un fluide, dont la porosité est décrite comme des tubes cylindriques à section constante.

Dans ce modèle, les variables qui déterminent l'état du fluide sont :

P : pression totale
$\boldsymbol{V}$: vitesse particulaire
T : température totale
ρ_t : densité totale

Les équations au cœur de la théorie de Kirchhoff sont l'équation de Navier-Stokes linéarisée **(E.6)**, l'équation de continuité **(E.7)**, l'équation de chaleur **(E.8)** et l'équation des gaz parfaits **(E.9)**.

$$\rho_s \frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial t} = -\nabla P + \frac{1}{3}\eta \nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{V}) + \eta \Delta \boldsymbol{V} \tag{E.6}$$

$$\rho_s \nabla \cdot \boldsymbol{V} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{E.7}$$

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + \frac{\partial P}{\partial t} \tag{E.8}$$

$$P = \rho R_0 T \tag{E.9}$$

Avec :

ρ_s : densité statique du fluide (c'est-à-dire, de l'air)
η : viscosité dynamique du fluide
C_p : chaleur spécifique à pression constante du fluide
λ : conductivité thermique du fluide
R_0 : constante spécifique de l'air

Etant donné que ces équations ne dépendent que des caractéristiques du fluide, ce seront les hypothèses postérieures qui adaptent la théorie à la géométrie du solide : ces hypothèses sont un fluide uniforme et stagnant, un écoulement laminaire et l'absence de sources de force ou chaleur (Mbailassem et al., 2014).

Enfin, les effets thermiques et visqueux sont caractérisés par le module d'incompressibilité $K(\omega)$ et la densité dynamique $\rho(\omega)$ du milieu. La dissipation structurelle est négligée (hypothèse de squelette rigide). La solution étant compliquée à calculer pour des géométries plus complexes, plusieurs auteurs postérieurs ont basé leurs modèles sur l'approche de Kirchhoff mais en réalisant des simplifications additionnelles.

Théorie de Biot

Plus tard, Biot développa un modèle pour prédire les contraintes et déformations d'un matériau poreux à squelette élastique, avec des pores interconnectés et rempli de fluide. En 1941, il publia une théorie pour les matériaux isotropes (Biot, 1941) et en 1956, pour les matériaux anisotropes.

Plus concrètement, Biot publia en 1956 deux articles où il décrivit la propagation d'ondes élastiques au sein d'un matériau poreux saturé de fluide, pour des longueurs d'onde supérieures aux dimensions des hétérogénéités. Le premier (Biot, 1956a) décrivit le comportement à basse fréquence, lorsque le deuxième (Biot, 1956b) s'adressa au domaine des hautes fréquences. Il considère l'existence de trois ondes : deux ondes de compression (une dans le fluide et une autre dans le solide) et une troisième onde de cisaillement dans le solide. L'existence d'un grand nombre de degrés de liberté rend le calcul des solutions de ce modèle long, mais il constitue néanmoins le point de départ de nombreux modèles acoustiques.

Johnson-Champoux-Allard-Lafarge (JCAL), 1997

(Lafarge et al., 1997) introduisent des modifications à la formule qui définit le module d'incompressibilité dynamique $K(\omega)$ dans le modèle JCA (voir **Chapitre 3**, **§3.3**), justifiées par le manque d'information pour les effets thermiques à basse fréquence du modèle. Pour cela, ils présentent un nouveau paramètre, la perméabilité thermique statique k_0', le modèle étant défini alors par 6 paramètres. Le module K est défini ainsi :

$$K(\omega) = \frac{\gamma\, P_0/\phi}{\gamma - (\gamma - 1)\left[1 - j\,\frac{\phi\lambda}{k_0' C_p \rho_0 \omega}\sqrt{1 + j\,\frac{4\, {k_0'}^2 C_p \rho_0 \omega}{\lambda \Lambda'^2 \phi^2}}\right]^{-1}} \qquad \text{(E.10)}$$

Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge (JCAPL), 1997

Dans ce modèle fluide-équivalent, les effets visco-inertiels sont décrits à partir du modèle semi-phénoménologique de (Johnson et al., 1987) pour des matériaux avec des formes de pore arbitraires. Modifié par (Pride et al., 1993) pour prendre en compte des pores avec des constrictions et corrigé ultérieurement par (Lafarge, 1993), l'expression de la densité dynamique $\tilde{\rho}(\omega)$ est la suivante :

$$\rho(\omega) = \frac{\rho_0 \alpha(\omega)}{\phi} \tag{E.11}$$

$$\alpha(\omega) = \alpha_\infty \left[1 + \frac{1}{j\bar{\omega}} F(\omega)\right] \tag{E.12}$$

$$F(\omega) = 1 - P + P\sqrt{1 + \frac{M}{2P^2} j\bar{\omega}} \tag{E.13}$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega \rho_0 k_0 \alpha_\infty}{\eta \phi} \tag{E.14}$$

$$M = \frac{8 k_0 \alpha_\infty}{\phi \Lambda^2} \tag{E.15}$$

$$P = \frac{M}{4\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_\infty} - 1\right)} \tag{E.16}$$

Elle est donc définie à partir de 5 paramètres : la résistivité σ ou la perméabilité visqueuse statique $k_0 = \frac{\eta}{\sigma}$ (avec η la viscosité dynamique de l'air), la porosité ϕ, la tortuosité α_∞, la longueur caractéristique visqueuse Λ et la tortuosité visqueuse statique α_0.

Quant aux effets thermiques, ils sont décrits initialement par (Champoux & Allard, 1991), qui se basent à la fois sur le travail de (Johnson et al., 1987). Comme dans le cas des effets visqueux, le modèle est modifié par (Pride et al., 1993) et (Lafarge, 1993), mais aussi par (Lafarge et al., 1997). Le module d'incompressibilité dynamique $K(\omega)$ obtenu est :

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\phi} \frac{1}{\beta(\omega)} \tag{E.17}$$

$$\beta(\omega) = \gamma - (\gamma - 1)\left[1 + \frac{1}{j\bar{\omega}'} F'(\omega)\right]^{-1} \tag{E.18}$$

$$F'(\omega) = 1 - P' + P'\sqrt{1 + \frac{M'}{2P'^2} j\bar{\omega}'} \tag{E.19}$$

$$\bar{\omega}' = \frac{\omega \rho_0 C_P k_0'}{\kappa \phi} \tag{E.20}$$

$$M' = \frac{8k_0'}{\phi\Lambda'^2} \tag{E.21}$$

$$P' = \frac{M'}{4(\alpha_0' - 1)} \tag{E.22}$$

Par conséquent, le module d'incompressibilité dynamique est défini par 4 paramètres, à savoir : la porosité ϕ, la longueur caractéristique thermique Λ', la perméabilité thermique statique k_0' et la tortuosité thermique statique α_0'.

Les modèles JCA et JCAL sont des cas particuliers du présent modèle en prenant $M' = P = P' = 1$ pour JCA et $P = P' = 1$ pour JCAL.

E.2. Modèles empiriques

Delany & Bazley, 1970

Delany et Bazley présentèrent en 1970 le modèle empirique de caractérisation du comportement acoustique des matériaux poreux le plus connu jusqu'à ce jour (Delany & Bazley, 1970). Ils mesurèrent l'impédance caractéristique Z_c du matériau et le nombre d'onde k de plusieurs matériaux fibreux pour des fréquences entre 0,01 x σ et σ (la résistivité au passage de l'air de chaque matériau). Ils établissent deux lois de puissance pour calculer ces deux propriétés intrinsèques à partir du ratio entre la fréquence et la résistivité (**E.23** et **E.24**). En bref, le comportement acoustique du matériau peut être déterminé, de façon plus ou moins précise, à partir d'un seul paramètre : la résistivité σ.

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 9{,}08\left(10^3\frac{f}{\sigma}\right)^{-0{,}75} - j\,11{,}9\left(10^3\frac{f}{\sigma}\right)^{-0{,}73}\right] \tag{E.23}$$

$$k = \frac{\omega}{c_0}\left[1 + 10{,}8\left(10^3\frac{f}{\sigma}\right)^{-0{,}70} - j\,10{,}3\left(10^3\frac{f}{\sigma}\right)^{-0{,}59}\right] \tag{E.24}$$

Avec ρ_0 la masse volumique ambiante de l'air et c_0 la vitesse du son dans l'air libre et f la fréquence.

Delany-Bazley-Miki, 1990

Yasushi Miki propose des corrections à ce modèle (Miki, 1990b) car il réalise que le modèle ne marche pas pour des bases fréquences dans certains cas (la partie réelle de l'impédance de surface devient négative). Cela donne lieu aux expressions suivantes :

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 5{,}50\left(10^3\frac{f}{\sigma}\right)^{-0{,}632} - j\,8{,}43\left(10^3\frac{f}{\sigma}\right)^{-0{,}632}\right] \tag{E.25}$$

$$k = \frac{\omega}{c_0}\left[1 + 7{,}81\left(10^3\frac{f}{\sigma}\right)^{-0{,}618} - j\,11{,}41\left(10^3\frac{f}{\sigma}\right)^{-0{,}618}\right] \qquad \text{(E.26)}$$

Pour la même plage de fréquences entre 0,01 x σ et σ.

Miki, 1990

Dans la même année, Miki publie un deuxième article (Miki, 1990a) proposant un modèle pour décrire le comportement des ondes acoustiques dans des matériaux à pores cylindriques inclinés (voir **Figure E. 1**) à partir de trois paramètres : la résistivité σ, la porosité ouverte ϕ et la tortuosité α_∞. Les équations proposées dans ce modèle sont les suivantes :

$$Z_c = \frac{\alpha_\infty}{\phi}\left[1 + 0{,}070\left(\frac{f}{\sigma_e}\right)^{-0{,}632} - j\,0{,}107\left(\frac{f}{\sigma_e}\right)^{-0{,}632}\right] \qquad \text{(E.27)}$$

$$k = \frac{\omega\alpha_\infty}{c_0}\left[1 + 0{,}109\left(\frac{f}{\sigma_e}\right)^{-0{,}618} - j\,0{,}160\left(\frac{f}{\sigma_e}\right)^{-0{,}618}\right] \qquad \text{(E.28)}$$

Avec $\sigma_e = \frac{\phi}{(\alpha_\infty)^2}\sigma_p$ la résistivité effective en unités du SI, $\sigma_p = \frac{S(\alpha_\infty)^2 R}{\phi}$ la résistivité du modèle, S la section du pore et $R = \frac{8\pi\mu}{A^2}$ la résistivité d'un pore cylindrique avec μ le coefficient de viscosité.

Annexe F - Modèles mathématiques existants

Philip et De Vries (1957)

La théorie de Philip and de Vries (Philip & De Vries, 1957) pour les transferts simultanés dans les milieux poreux (les sols en particulier) (Mchirgui, 2012) fut développée en 1957 (Trabelsi, 2010). L'approche y est phénoménologique. Les auteurs décrivent le transfert hygrothermique comme étant fonction de la teneur en eau et de la température (Ferroukhi, 2015).

- Le transfert d'humidité sous un gradient thermique est pris en compte.
- Le transfert de chaleur est décrit uniquement par conduction pure et un transfert lié au changement de phase. L'advection thermique liée aux gradients de pression de vapeur et de pression totale est non considérée (Bennai, 2017).

Les flux sont de la forme suivante :

$$\begin{cases} J_v = -\rho_l(D_{v\theta}\nabla\theta - D_{vT}\rho_s\nabla\mathrm{T}) \\ J_l = -\rho_l(D_{l\theta}\nabla\theta - D_{lT}\rho_s\nabla\mathrm{T} - \mathrm{K}) \end{cases}$$

- J_v Densité de flux massique de vapeur d'eau [kg/m^2·s]
- J_l Densité de flux massique de l'eau liquide [kg/m^2·s]
- $D_{v\theta}$ *et* $D_{l\theta}$ Coefficients de diffusion isotherme de la vapeur d'eau et de l'eau liquide [m^2/s]
- D_{vT} *et* D_{lT} Coefficients de diffusion non-isotherme de la vapeur d'eau et de l'eau [m^2/s·K]
- ρ_l Masse volumique de la phase liquide [kg/m^3]
- K Conductivité hydraulique du matériau [m/s]
- θ Teneur en eau volumique [m^3/m^3]
- T Température [K]

Le système d'équations est le suivant :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(D_T\nabla T) + \nabla(D_\theta\nabla\theta) + \nabla K \\ \rho C_p\dfrac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda\nabla T) + L_v\nabla(D_{v\theta}\nabla\theta) \end{cases}$$

Avec

- D_T Coefficient de diffusion d'humidité non-isotherme [m^2/s·K]
- D_θ Coefficients de diffusion d'humidité isotherme [m^2/s]
- λ Conductivité thermique [W/(m·K)]
- C_p Chaleur spécifique du matériau [J/(kg·K)]
- L_v Chaleur latente de changement de phase [J/kg]

Parmi les limitations de cette formulation il y a la détermination des paramètres dans le cas multicouche comme c'est le cas par exemple des murs de façade (Trabelsi, 2010), mais aussi le fait que l'ajout de facteurs de correction artificiel soit nécessaire dans les

cas non isothermes (Mchirgui, 2012). Les équations du modèle ne sont, en outre, utilisées que pour la « région capillaire de l'isotherme de sorption » i.e. la première période de séchage (Hernandez Rodriguez & Quinto Diez, 2005).

Krischer (1962)

(Krischer & Görling, 1938) supposent que pendant le séchage l'humidité peut se déplacer sous forme liquide par capillarité, et sous forme vapeur sous l'action d'un gradient de concentration en vapeur (Hernandez Rodriguez & Quinto Diez, 2005). Les travaux de Krischer aboutissent plus tard (1956) à la publication d'un ouvrage où, l'auteur analyse les transferts de chaleur et de masse (Ben Mabrouk, 1999).

Equations de conservation de la chaleur (Hernandez Rodriguez & Quinto Diez, 2005) *:*

$$\alpha\nabla^2\mathrm{T} + \frac{L}{\rho_s c'}\left(K_v\left[(a-w_h)\nabla^2\rho_v - \nabla w_h\rho_l\right] - (a-w_h)\frac{\partial\rho_v}{\partial t} + \rho_v\frac{\partial w_h}{\partial t}\right) = \frac{\partial T}{\partial t}$$

- α Diffusivité thermique [m^2/s]
- a Teneur en air volumétrique [-]
- c' Chaleur spécifique du corps mouillé [J/kg·K]
- K_v Coefficient de diffusion de vapeur [m^2/s]
- ρ_l Masse volumique du liquide [kg/m^3]
- ρ_v Masse volumique de la vapeur [kg/m^3]
- ρ_s Masse volumique du solide [kg/m^3]
- w_h Teneur en humidité [kg$_{hum}$/kg$_{sec}$]

Equations du bilan de masse (Hernandez Rodriguez & Quinto Diez, 2005) :

$$K_l\rho_l\nabla^2 w_h + K_v[(a-w_h)\nabla^2 w_h\rho_v - \nabla w_h\nabla\rho_v] = (\rho_l - \rho_v)\frac{\partial w_h}{\partial t} + (a-w_h)\frac{\partial\rho_v}{\partial t}$$

Avec

- K_l Coefficient de diffusion du liquide [m^2/s]

Modèle de Luikov (1954 - 1966)

Aujourd'hui la plupart des modèles reprenne les travaux de Luikov qui a proposé un modèle mathématique prenant en compte le terme de pression et introduisant un terme de thermodiffusion. Le modèle de Luikov (Luikov, 1966) suit une approche phénoménologique (Ferroukhi, 2015) qui introduit la notion de potentiel de transfert de masse (Trabelsi, 2010).

Dans le développement de sa théorie, Luikov a utilisé les principes de la thermodynamique des processus irréversibles. Pour ce travail cependant, le modèle utilisé ne bénéficiera pas de cette particularité. Tout comme le modèle de Phillip et De Vries, la méthode de Luikov assimile les matériaux poreux à une « boite noire » dans laquelle l'humidité est transportée en raison de la température et des gradients de teneur en eau (Künzel, 1995). En outre, son modèle met en évidence le phénomène de thermodiffusion

ou effet Sorret[13] et considère la diffusion de l'eau sous forme de vapeur et sous forme de liquide (dépendant des gradients de teneur en eau massique, de la température et de la pression totale) (Bennai, 2017). On retrouve alors les flux suivants :

$$\begin{cases} J_v = -D_{v\theta}\rho_s\nabla \mathrm{u} - D_{vT}\rho_s\nabla \mathrm{T} \\ J_l = -D_{l\theta}\rho_s\nabla \mathrm{u} - D_{lT}\rho_s\nabla \mathrm{T} \end{cases}$$

Puis les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (D_m(\nabla \mathrm{u} + \delta_s \nabla \mathrm{T}) \\ \rho_s C_p \dfrac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D_T \nabla \mathrm{T}) + L_v \varepsilon \rho_s \dfrac{\partial u}{\partial t} \end{cases}$$

Avec :

- u Teneur en eau massique [kg/kg]
- $D_m = D_v + D_l$ Coefficient de diffusion totale [m^2/s]
- D_T Coefficient de diffusion de l'humidité non isotherme [kg/(m·s·K)]
- δ_s Coefficient de thermodiffusion
- ε Rapport entre le flux de vapeur d'eau et le flux massique total [-][14]
- $\varepsilon\rho_s \frac{\partial u}{\partial t}$ Taux de changement de phase [kg/(m^3·s)]

Il est important de noter l'ajout d'un coefficient de changement de phase. L'inconvénient de ce modèle est la définition expérimentale de ce coefficient qui correspond au rapport entre le flux de vapeur d'eau et le flux massique total. Cette variable doit se trouver expérimentalement, mais selon (Bennai, 2017) sa définition empirique est délicate.

En outre, dans le modèle Luikov classique, le coefficient de diffusion d'humidité et le coefficient de diffusion thermique dépendent des deux potentiels. Il est assez difficile de déterminer expérimentalement la double dépendance.

En tant que modèle « le plus mathématique », le modèle de Luikov a des solutions exactes dans de nombreuses circonstances, qui peuvent servir à évaluer la précision de solutions approximatives ou numériques. C'est l'un des principaux avantages du modèle, et la raison pour laquelle ces équations sont fréquemment utilisés encore aujourd'hui (Qin et al., 2008).

Modèle de Duforestel (1992)

Le modèle est caractérisé par le fait qu'au lieu d'utiliser la teneur en eau, le potentiel de transfert de masse ou la teneur en humidité, Duforestel utilise la pression partielle de vapeur comme variable caractéristique des transferts de masse (Duforestel, 1992). En outre, la variation d'énergie interne est définie comme la somme de trois termes :

[13] Thermo-diffusion : Un thermo-gradient provoque le déplacement de l'humidité à l'intérieur d'un matériau (Ben Mabrouk, 1999).

[14] Si $\varepsilon = 1$ le transfert d'humidité se réalise sous forme de vapeur, sinon sous forme liquide

stockage, évaporation/condensation, sorption/désorption. Les équations bilans ont ainsi la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_v}{\partial t}\varepsilon + \frac{\partial \tau_v}{\partial t} = \nabla\left[\left(\frac{\delta_v}{P_T} + k_n + \rho_l K_l r_v \frac{T}{P_v}\right)\nabla P_v + \rho_l K_l r_v \left(lnHR - \frac{L(T)}{r_v T}\right)\nabla \mathrm{T}\right] \\ C'\frac{\partial T}{\partial t} + L(T)\varepsilon\frac{\partial \rho_v}{\partial t} - h^m \frac{\partial \tau_v}{\partial t} = div(\lambda\, \nabla \mathrm{T}) + \mathrm{L(T)}\, div(J_v) \end{cases}$$

Avec

- ε Porosité du matériau humide
- τ_v Taux d'humidité volumique [kg/m^3]
- P_l Pression du liquide [Pa]
- P_T Pression totale de la phase gazeuse [Pa]
- P_v Pression de vapeur [Pa]
- δ_v Perméabilité à la vapeur "vraie" [s·Pa]
- k_n Coefficient de transfert de Knüdsen [s]
- r_v Constante des gaz parfaits de la vapeur d'eau [J/kg·K]
- K_l Perméabilité liquide [m/s]
- ρ_l Masse volumique du liquide [kg/m^3]
- ρ_v Masse volumique de la vapeur [kg/m^3]
- C' Chaleur volumique du matériau humide [J/(m^3·K)]
- h^m Chaleur supplémentaire de sorption [J/kg]
- L Chaleur latente d'évaporation [J/kg]

Elles sont ensuite reformulées par le système suivant (Trabelsi, 2010) :

$$\begin{cases} b_1\frac{\partial P_v}{\partial t} + b_2\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K_1\nabla P_v + K_2\nabla T) \\ b_3\frac{\partial P_v}{\partial t} + b_4\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K_3\nabla P_v + K_4\nabla T) \end{cases}$$

Les équations sont ensuite comparées au modèle de (Philip & De Vries, 1957) par l'application du principe de changement de variable. Duforestel ajoute que le modèle s'applique à des matériaux non hygroscopiques. On remarque que le modèle qu'il propose est défini pour une résolution numérique plus facile.

Modèle de Künzel (1992-1995)

Le modèle de Künzel est un modèle Fickien utilisé au sein du logiciel de simulation WUFI ou WUFIZ (Wärme-und Feuchtetransport instationär zweidimensional / transport transitoire à une ou deux dimensions de la chaleur et de l'humidité). Il est basé sur le modèle de Kießl (Kießl, 1983) ainsi que sur de nouveaux résultats (Künzel, 1995). L'objectif pour l'auteur était d'adapter son modèle à des applications unidimensionnel et bidimensionnelle. Les équations sont alors de la forme (Aït Oumeziane et al., 2011) :

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) + L_v\frac{\partial}{\partial x}\left(\delta_v\,\frac{\partial}{\partial x}(HR\,P_{v,sat})\right) \\ \frac{\partial w}{\partial HR}\frac{\partial HR}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(k_l\frac{\partial HR}{\partial x} + \delta_v\frac{\partial}{\partial x}(HR\,P_{v,sat})) \end{cases}$$

Avec :

- HR Humidité relative [%]
- H Enthalpie totale du matériau [J]
- w Teneur en eau du matériau [kg/m^3]
- $P_{v,sat}$ Pression de vapeur saturante [Pa]
- λ Conductivité thermique du matériau [W/m·K]
- k_l Conductivité liquide [kg/m·s]
- δ_v Perméabilité à la vapeur d'eau du matériau [kg/m·s·Pa]
- L_v Chaleur latente de changement de phase [J/kg]

Modèle Hagentoft & al. (2004)

Au lieu d'utiliser la pression de vapeur comme moteur de transfert, (C. E. Hagentoft et al., 2004) ont préféré utiliser la pression capillaire. Le modèle qu'ils ont proposé repose sur les hypothèses suivantes :

- Pas de transfert d'air ;
- Pas de transfert de liquide sous gradient thermique ;
- L'effet de la gravité est négligé ;
- Pas de transfert radiatif ;
- La rétention de l'humidité est indépendante de la température ;
- La phase gazeuse ne contribue pas de manière significative dans la rétention de l'humidité ou le stockage de la chaleur ;
- La température reste en dessous de la température d'ébullition de l'eau.

Le système d'équations résultant est par conséquent (Trabelsi, 2010) :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial w}{\partial P_c}\dfrac{\partial P_c}{\partial t} = -\nabla^T(J_{m,l} + J_{m,v}) \\ (c_0\rho_0 + c_l w)\dfrac{\partial T}{\partial t} + \left(c_l\, T\dfrac{\partial w}{\partial P_c}\right)\dfrac{\partial P_c}{\partial t} = -\ \nabla^T(J_{h,c} + J_{h,a}) \\ J_{m,l} = -K_l \nabla P_c \\ J_{m,v} = -\dfrac{\delta_v P_v}{\rho_l RT}\,\nabla P_c - \dfrac{\delta_v P_v}{\rho_l RT^2}\,\nabla P_c\big(\rho_l L_v + P_c(T\gamma - 1)\big)\nabla \mathrm{T} \\ J_{h,c} = -\lambda\,\nabla \mathrm{T} \\ J_{h,a} = (c_l T)J_l + (c_v T + L_v)J_v \end{cases}$$

- w Teneur en eau [kg/m^3]
- P_c Pression capilaire [Pa]
- $J_{m,l}$ Densité de flux massique de la phase liquide [kg/m^2·s]
- $J_{m,v}$ Densité de flux massique de la phase vapeur [kg/m^2·s]
- c_0 Capacité calorifique du matériau à l'état sec [J/kg·K]
- ρ_0 Masse volumique du matériau à l'état sec [kg/m^3]
- c_l Capacité thermique massique du liquide [J/kg·K]
- ρ_l Masse volumique du liquide [kg/m^3]
- J_h Densité de flux de chaleur [J/m^2·s]
- K_l Perméabilité à l'eau liquide [kg/(Pa·s·m)]

- δ_v Perméabilité à la vapeur d'eau [kg/(Pa·s·m)]
- c_v Capacité thermique massique de la vapeur [J/kg·K]

Modèle Champs (2007)

Les équations de Champs sont définies à partir des flux de transferts de diffusion, et de convection. (Trabelsi, 2010) ajoute que l'écoulement de la vapeur d'eau se fait par diffusion/convection, l'écoulement de l'eau liquide se fait par convection et le transfert de chaleur par conduction. Les principaux flux sont définis ci-dessous :

$$\begin{cases} J_{diff}^{m_v} = \dfrac{D_v(\theta_l, T)}{R_v T} \dfrac{\partial P_v}{\partial x} \\ J_{conv}^{m_g} = \delta_a\,(\theta_l)\,(\dfrac{\partial P_g}{\partial x} + \rho_g g) \\ J_{conv}^{m_l} = \delta_l(\theta_l)\,(\dfrac{\partial P_l}{\partial x} + \rho_l g) \\ J_{diff}^{U} = \lambda(\theta_l)\,\dfrac{\partial T}{\partial x} \end{cases}$$

Avec

- $J_{diff}^{m_v}$ Densité de flux massique associé à la diffusion de la vapeur [kg/(m²·s)]
- J_{diff}^{U} Densité de flux de chaleur associé à la diffusion [kg/(m²·s)]
- D_v Diffusivité effective de la vapeur [m²/s]
- R_v Constante des gaz parfaits de la vapeur d'eau [J/kg·K]
- $J_{conv}^{m_g}$ Densité de flux massique associé à la convection de la phase gaz [kg/(m²·s)]
- $J_{conv}^{m_l}$ Densité de flux massique associé à la convection de la phase liquide [kg/(m²·s)]
- P_l Pression du liquide [Pa]
- P_v Pression partielle de vapeur [Pa]
- δ_a Perméabilité à l'air [kg/(m·s·Pa)]
- δ_l Perméabilité à l'eau [kg/(m·s·Pa)]
- θ_l Teneur en eau volumique [m³/m³]
- r_v Constante des gaz parfaits de la vapeur d'eau [J/kg·K]
- ρ_g Masse volumique apparente de l'air [kg/m³]
- ρ_l Masse volumique apparente de l'eau [kg/m³]

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho^{m_{v+w}}}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}(J_{diff}^{m_v} + J_{conv}^{m_v} + J_{conv}^{m_l}) \\ \dfrac{\partial \rho^{m_a}}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}(J_{diff}^{m_a}) \\ \dfrac{\partial \rho^{U}}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}(J_{diff}^{U} + J_{conv}^{U}) \end{cases}$$

Modèle de Qin (2009)

Le modèle de Qin est un modèle de transfert non isotherme phénoménologique, où les variables caractéristiques sont la teneur en vapeur et la température (Ferroukhi, 2015). L'objectif était de créer un nouveau modèle sans les difficultés techniques des modèles de Luikov et de Philip et de Vries (Qin et al., 2009) :

- Le profil de teneur en humidité est discontinu à l'interface entre deux milieux poreux.
- Le coefficient de diffusion d'humidité et le coefficient de diffusion thermique dépendent des deux potentiels (dans les équations classiques de Luikov).
- Les équations gouvernantes fortement couplées sont difficiles à gérer.

$$\begin{cases} \rho C_m \dfrac{\partial u_v}{\partial t} = \nabla(\varepsilon\delta\nabla T) + \nabla(\delta\nabla u_v) \\ \rho C_p \dfrac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda\nabla T) + \rho C_m(\sigma L_v + \gamma)\dfrac{\partial u_v}{\partial t} \end{cases}$$

Avec

- u_v Teneur en vapeur d'eau [kg/m^3]
- δ Coefficient de diffusion d'humidité [m^2/s]
- ε Coefficient de thermogradient [kg/(m^3·K)]
- σ Critère de changement de phase [-]
- γ Chaleur d'absorption ou de désorption [kJ/kg]
- C_m Capacité de stockage d'humidité [m^3/kg]

Modèle de Abahri (2012)

(Abahri, 2012) a proposé un modèle plus détaillé de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiment. Pour le transfert d'humidité, en plus de la diffusion, l'apport du gradient de pression totale, exprimé par un coefficient d'infiltration, est considéré, ainsi que l'apport du gradient thermique traduit par un coefficient de thermogradient. Les deux coefficients ont été évalués expérimentalement par des essais développés en laboratoire (Remki et al., 2012) et (Abahri et al., 2013). Les bilans massiques et énergétiques sont présentés dans le système d'équation suivant :

$$\frac{\partial \omega}{\partial T} = \nabla \cdot (D_m(\nabla\omega + \delta\nabla T + \alpha\nabla P))$$
$$\rho_s C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (a_t\nabla T + \delta_t\nabla u + \alpha_t\nabla P) + L_v\rho_s\chi\frac{\partial \omega}{\partial t}$$
$$h_a\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\lambda_f\nabla P\right) + \rho_s\chi\frac{\partial \omega}{\partial t}$$

Avec

- ω Teneur en eau [kg/kg]
- D_m Coefficient de diffusion de l'humidité [m^2/s]

- α Coefficient traduisant l'infiltration d'eau due à un gradient de pression totale [1/Pa)]
- δ Coefficient de thermogradient [$kg_{humidité}$/(kg·K)]
- α_t Coefficients traduisant l'advection thermique due aux gradients d'humidité et de pression totale [m^2/s]
- a_t Conductivité thermique modifiée [W/(m·K)]
- χ Ratio entre le coefficient de diffusion de vapeur et le coefficient de diffusion de l'humidité [-]
- λ_f Coefficient d'infiltration d'air [kg/(m·s·Pa)]
- h_a Capacité d'air humide [1/Pa]

Annexe G -Etude des causes et influences des transports de masse et de chaleur

Tableau G. 1 - Tableau récapitulatif des phénomènes hygrothermiques.

Mécanisme de transport		**Causes et influences du transport**	**Etudes réalisées sur le sujet**	**Références**
Transport de chaleur	Conduction thermique	Température		
		Etat hydrique, teneur en eau, humidité relative	Etude de différents bétons isolants (bétons de liège, de polystyrène) L'auteur étudie aussi les caractéristiques physiques comme le dosage de fibre ou la masse volumique	(Sotehi, 2010)
			Etude sur différents types d'isolants	(Jerman & Černý, 2012)
			Etude du béton de bois sur 5 échantillons contenant un pourcentage différent de copeaux de bois	(Taoukil et al., 2013)
			Le but de cet article est d'étudier expérimentalement l'impact de la teneur en humidité sur la conductivité des matériaux isolants fibreux couramment utilisés. Trois types de matériaux de densités différentes sont étudiés en mettant l'accent sur la fibre de verre.	(Abdou & Budaiwi, 2013)
			L'étude se concentre sur l'influence de l'humidité relative sur la conduction	(Antonin Fabbri et al., 2015)
			Etude d'un mortier isolant en fibre de palmiers dattiers	(Boukhattem et al., 2017)
			Cinq matériaux différents ont été testés avec un disque chaud et un tube d'impédance. 190 tests de conductivité thermique et 370 tests d'absorption acoustique ont été réalisés.	(D'Alessandro et al., 2018)
	Diffusion thermique	Gradient de température	Définition de la diffusion thermique et mise en exergue de son aspect négligeable Définition de la diffusion moléculaire	(Janssen, 2011; Philip & De Vries, 1957)
	Rayonnement thermique	Agitation de particules dans la matière		
	Transferts d'énergie par advection	Transfert de masse	Mise en valeur de ce phénomène de couplage par simulation Validation en laboratoire et sur le terrain de la théorie de Philip et de Vries sur l'advection de chaleur sensible par l'eau (Uchaipichat, 2005)	(Ferroukhi, 2015; Janssen et al., 2004)

Transport de vapeur	Gradient de pression de vapeur	Thermodiffusion de Luikov ou effet Sorret	Etude de la réponse hygrothermique d'un mur en béton de chanvre. Les résultats expérimentaux conduisent à une identification claire du couplage entre la variation de l'humidité relative à l'intérieur du mur et sa température.	(Antonin Fabbri et al., 2015)
			Les auteurs mettent en exergue le fait que la diffusion de vapeur n'est pas significativement affectée par les gradients de température. Ils ajoutent que les effets combinés de la teneur en humidité, de la conductivité hydraulique et du gradient de température, pourraient affecter le transfert de liquide	(Galbraith et al., 1998)
			Analyse de l'effet du gradient thermique sur l'humidité par études théoriques, expérimentales et numériques	(Trabelsi et al., 2012, 2013)
	Effusion ou diffusion de Knudsen	Pression de vapeur		
	Diffusion de liquide	Pression de vapeur	Mesure des courbes de sorption et déduction du coefficient de diffusion hydrique Estimation des coefficients de diffusion à partir d'expériences de séchage	(Thibaut Colinart et al., 2010; Collet, 2004; Zaknoune et al., 2009)
	Convection	Gradient de pression total	Les articles sur le sujet de la convection ne cessent d'être publiés. Le livre de (Nield & Bejan, 2013) recense une majorité de ces articles et des résultats sur le sujet.	
Transport liquide	Conduction capillaire	Contrainte de succion capillaire	Etude de l'écoulement capillaire et donc de la conduction capillaire	(Richards, 1931)
	Diffusion surfacique, moléculaire ou de Knusden	Humidité relative		
		Thermodiffusion de Luikov ou effet Sorret	Mesure du transport d'humidité dû à un gradient de température dans les matériaux isolants très poreux.	(Peuhkuri et al., 2008)
	Débit d'infiltration	Gravitation	Non étudié dans le cas de ce travail pour le modèle numérique	
	Débit hydraulique	Différence de pression totale		
	Transport de particules à l'aide d'un champ électrique (electrokinesis en anglais)	Champs électriques		
	Osmose	Concentration ionique		

Annexe H -Modèle mathématique des transferts couplés de masse et de chaleur

H.1. Hypothèses du modèle choisi

De nombreux travaux traitent les matériaux poreux comme une superposition d'un squelette solide et d'un réseau poreux, qui peut être partiellement saturé d'eau liquide supposé pure, et où le reste de l'espace poreux est rempli par une phase gazeuse continue qui est supposée être un mélange idéal de gaz parfait (Bear & Bachmat, 1990; Soudani et al., 2016; T. Wu et al., 2013). Dans le présent travail, le béton de moelle est défini de la même manière.

Soient L l'épaisseur du mur, t_f le temps final et T, P_v les moteurs respectifs de chaleur, et d'humidité tels que :

$$\begin{array}{ll} T : [0, L] \times [0, t_f] \to \mathbb{R}_{>0} & P_v : [0, L] \times [0, t_f] \to \mathbb{R}_{>0} \\ (x, t) \longmapsto T(x, t) & (x, t) \longmapsto P_v(x, t) \end{array}$$

Nous nous plaçons ainsi dans le cadre simplifié d'une configuration géométrique 1D (une seule variable d'espace x). Les hypothèses retenues pour développer le modèle sont les suivantes :

(H1) Le milieu poreux est considéré comme un milieu continu, homogène et isotrope. Toutes les phases le constituant (squelette solide, eau liquide, air humide) sont supposées connexes ;

(H2) Le milieu solide est indéformable ;

(H3) L'effet gravitationnel est considéré très faible par rapport aux autres modes de transferts : on travaille sur un plan perpendiculaire, les effets de la gravité sont donc négligeables ;

(H4) La loi de Fick avec écoulement d'air n'est pas considérée dans ce modèle. En effet, cette loi s'applique dans des cadres particuliers où s'applique de forte pression entre l'intérieur et l'extérieur : de l'ordre de plus de 4 Pa. Ce n'est pas le cas dans ce travail puisqu'il est étudié des bétons biosourcés pour des bâtiments anciens ;

(H5) Un équilibre thermodynamique local (au niveau du pore) est supposé exister entre les deux phases gazeuse et liquide ; cette hypothèse très forte est nécessaire pour l'utilisation des équations physiques usuelles. On se trouve dans un modèle phénoménologique. On étudie donc à l'échelle macroscopique les phénomènes microscopiques.

(H6) La phase liquide est constituée uniquement d'eau pure (les paramètres thermo-physiques retenus sont ceux de l'eau pure) et elle est supposée incompressible ;

(H7) La phase gazeuse obéit à la loi des gaz parfaits ;

(H8) L'hystérésis entre les phénomènes d'adsorption et de désorption est négligée ;

(H9) Les réactions chimiques susceptibles de se produire entre les phases fluides et les phases solides sont négligées ;

(H10) La variation de la teneur en eau avec la température à humidité relative constante est négligée ;

(H11) La variation de masse de la vapeur d'eau dans les pores est négligeable ;

(H12) L'air ambiant est supposé à pression constante et homogène (égale à 100 kPa). Ainsi les transports d'air au sein du réseau poreux ne sont pas considérés dans les équations de conservation ;

(H13) Les transferts de chaleur par radiation sont négligés au sein du matériau.

H.2. Equations

Conservation de la masse

La phase solide est considérée immobile et indéformable (H2). Ainsi seules les phases liquides et gazeuses sont considérées dans le bilan massique.

L'eau au sein du réseau poreux peut soit être sous forme liquide, soit sous forme de vapeur. La teneur en eau dans le matériau, notée w, est définie comme la quantité d'eau totale (liquide + vapeur) contenue dans un volume représentatif de matériau, noté V_0. Les teneurs en eau liquide et en vapeur d'eau sont quant à elles notées w_l et w_v respectivement. Ainsi :

$$w = \frac{m_l + m_v}{V_0} \; ; w_l = \frac{m_l}{V_0} \; ; w_v = \frac{m_v}{V_0} \; ; w = w_l + w_v \approx w_l$$

Avec :

m_l la masse d'eau liquide contenue dans V_0 [kg]
m_v la masse de vapeur d'eau liquide contenue dans V_0 [kg]

Suivant ces notations, la forme locale de la conservation de la masse de vapeur d'eau au sein d'un volume élémentaire représentatif de matériau dV_0 s'écrit :

$$\frac{\partial w_v}{\partial t} = -div(\overrightarrow{J_v}) + \dot{r}$$

Avec

$\overrightarrow{J_v}$ la densité de flux massique de la vapeur d'eau [kg·m^2/s]

$\dot{r}$ le taux de désorption des molécules d'eau par unité de volume [kg/(m^3·s)]

De même, pour l'eau liquide :

$$\frac{\partial w_l}{\partial t} = -div(\vec{J_l}) - \dot{r}$$

Avec

$\vec{J_l}$ la densité de flux massique d'eau liquide [kg·m^2/s]

En sommant les deux équations précédentes, on obtient la conservation de la masse d'eau totale (liquide et vapeur) :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -div(\vec{J_v} + \vec{J_l}) \qquad (1)$$

Développement des densités de flux

La densité de flux massique de vapeur, en l'absence d'advection de vapeur due à un transport d'air humide au sein du matériau, s'exprime au travers de la loi de Fick (H4) :

$$\vec{J_v} = -\delta_p \ \overrightarrow{grad}(P_v)$$

Avec

P_v la pression partielle de vapeur d'eau [Pa]

δ_p le coefficient de diffusion effectif de la vapeur d'eau dans le matériau [kg/(m·s·Pa)], qui peut également s'écrire sous la forme :

$$\delta_p = \frac{\delta_a}{\mu}$$

Où μ [-] est le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur et δ_a [kg/(m·s·Pa)] est le coefficient de diffusion effectif de la vapeur dans l'air.

La densité de flux massique d'eau liquide s'exprime au travers de la loi de Darcy (H6) décrivant l'écoulement laminaire à travers des milieux poreux saturés[15] :

$$\vec{J_l} = k_l \ \overrightarrow{grad}(P_c) \qquad (2)$$

Avec

k_l la conductivité hydraulique [kg/(m·s·Pa)]

P_c la pression capillaire, définie comme la différence entre la pression de la phase non mouillante (air) et de la phase mouillante (eau liquide) au sein du réseau poreux [Pa] :

[15] Comme il a été précisé dans la description des modèles mathématiques, Philip est l'un des premiers auteurs à décrire les transferts hydriques en milieu poreux. Il justifie l'application de la loi de Darcy à la phase liquide d'un système non saturé à partir de résultats expérimentaux (Coussy et al., 1999).

$$P_c = P_a - P_l$$

Sous l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local (H5), la pression capillaire et la pression de vapeur sont liées entre elles via la loi de Kelvin :

$$P_c = -\frac{RT\rho_w}{M_w} \ln\left(\frac{P_v}{P_{v,sat}}\right)$$

Avec

ρ_w la masse volumique de l'eau liquide [kg/m^3]

M_w la masse molaire de l'eau [mol/kg]

$P_{v,sat}$ la pression de vapeur saturante, supposée ne dépendre que de la température

La différentielle de la pression capillaire peut alors s'écrire sous la forme :

$$dP_C = -\frac{R\rho_w}{M_w}\left[\left(\ln\left(\frac{P_v}{P_{v,sat}}\right) - T\frac{\partial \ln(P_{v,sat})}{\partial T}\right) dT + \frac{T}{P_v}\, dP_v\right]$$

En négligeant les variations de la chaleur latente de changement de phase liquide-vapeur de l'eau avec la pression et la température, la formule **de Clausius Clapeyron**[16] (H5, H7, H11) (Berger et al., 2019; Lelièvre, 2015) donne :

$$\frac{\partial P_{v,sat}}{\partial T} = \frac{L_v}{RT^2} P_{v,sat}$$

Dont l'intégration donne :

$$P_{v,sat}(T) = P_{v,sat}(T_0) \exp\left(\frac{L_v}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \qquad (3)^{17}$$

Avec

L_v la chaleur latente de changement de phase liquide – vapeur de l'eau à la température T_0 [J/mol]

R la constante des gaz parfaits [J/(K·mol]

T_0 la température de référence [K]

Sous ces hypothèses,

$$\frac{\partial \ln(P_{v,sat})}{\partial T} = \frac{L_v \ln\left(P_{v,sat}(T_0)\right)}{RT^2}$$

La différentielle de la pression capillaire s'exprime donc alors sous la forme :

[16] La formule peut être utilisée car nous avons supposé :

- L'équilibre liquide vapeur dans un corps pur,
- Le volume molaire du liquide négligeable devant celui du gaz,
- Le gaz assimilable à un gaz parfait

[17] Cette formulation de $P_{v,sat}$ sera celle utilisée pour la suite.

$$dP_C = -\frac{R\rho_w}{M_w}\left[\left(\ln\left(\frac{P_v}{P_{v,sat}}\right) - \frac{L_v}{RT}ln\left(P_{v,sat}(T_0)\right)\right)dT + \frac{T}{P_v}dP_v\right] \quad (4)$$

On introduit l'équation (4) dans l'équation (2) et on obtient :

$$\vec{J_l} = -k_l\left(\left(\frac{RT\rho_w}{M_wP_v}\right)\vec{\nabla}(P_v) + \frac{R\rho_w}{M_w}\left(\ln\left(\frac{P_v}{P_{v,sat}}\right) - \frac{L_v}{RT}\right)\vec{\nabla}T\right)$$

Soit :

$$\vec{J_l} = -k_l{}^*\,\vec{\nabla}(P_v) - k_T\vec{\nabla}(T)$$

Avec

$$k_l{}^* = k_l * \left(\frac{RT\rho_w}{M_wP_v}\right)$$

$k_l{}^*$ la conductivité hydraulique due à un gradient de pression partielle de vapeur à température constante. Il est à noter que ce terme diffère du terme de conduction k_l.

$$k_T = k_l * \frac{R\rho_w}{M_w}\left(\ln\left(\frac{P_v}{P_{v,sat}}\right) - \frac{L_v}{RT}\,ln\left(P_{v,sat}(T_0)\right)\right)$$

k_T la conductivité hydraulique due à un gradient de température à pression de vapeur constante (terme de diffusion parasite/de correction dû au choix du moteur de transfert). Attention, ce terme ne correspond pas à une thermodiffusion. Par la suite ce terme sera considéré négligeable (Ibrahim et al., 2013; Künzel, 1995).

Conclusion conservation de la masse

En revenant à l'équation (1) de conservation de la masse, et en remplaçant $\vec{J_l}$ et $\vec{J_v}$ on obtient :

$$\partial w/\partial t = -div((\vec{J_v}) + (\vec{J_l}))$$

$$\Leftrightarrow \quad \partial w/\partial t = -div(-\delta_p\,\vec{\nabla}(P_v) - k_l{}^*\,\vec{\nabla}(P_v))$$

En notant $k_m = \delta_p + k_l{}^*$ on obtient alors :

$$\Leftrightarrow \quad \partial w/\partial t = div(\,k_m\,\vec{\nabla}(P_v)) \quad (5)$$

En supposant que la teneur en eau w ne dépend que de l'humidité relative HR on obtient :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial HR} \times \left(\frac{\partial HR}{\partial t}\right) \quad (6)$$

Avec

$\frac{\partial w}{\partial HR}$ la capacité de stockage hydrique aussi noté ξ, qui est la pente de la courbe de désorption

$HR = \frac{P_v}{P_{v,sat}}$ l'humidité relative

Or dans l'équation (3), nous avons considéré $P_{v,sat}$ comme dépendant uniquement de la température. L'idée est donc d'écrire $\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial HR} \times \left(\frac{\partial HR}{\partial t}\right)$ selon P_v et $P_{v,sat}$, tout en tenant compte du fait que $P_{v,sat}$ n'est pas constant. Pour ce faire on développe ∂HR tel que :

$$dHR = d\left(\frac{P_v}{P_{v,sat}(T)}\right)$$

En utilisant la formule de Clapeyron, la formulation est alors la suivante :

$$dHR = \frac{1}{P_{v,sat}(T)} dP_v - \frac{P_v}{P_{v,sat}} \frac{L_v}{RT^2}\, dT \qquad (7)$$

La combinaison de (5), (6) et (7) donne :

$$\xi \times \frac{1}{P_{v,sat}(T)}\left(\frac{\partial P_v}{\partial t}\right) = div\left(k_m \vec{\nabla}(P_v)\right) + \xi \frac{P_v}{P_{v,sat}(T)} \frac{L_v}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Notons $\xi \frac{P_v}{P_{v,sat}(T)} \frac{L_v}{RT^2} = \gamma$.

L'équation du bilan massique finale est alors de la forme :

$$\xi \times \frac{1}{P_{v,sat}(T)}\left(\frac{\partial P_v}{\partial t}\right) = div\left(k_m \vec{\nabla}(P_v)\right) + \gamma \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (8)$$

Conservation de la chaleur

Le transfert de chaleur dans les milieux poreux se produit sous trois formes (Crausse et al., 1996; Ferroukhi, 2015) :

- Une advection de la chaleur sensible à travers les flux de liquide et de vapeur d'eau (on ne prend pas en compte une advection de chaleur par l'air car négligeable) ;
- Un transfert de chaleur latente de changement de phase porté par la vapeur d'eau ;
- L'écoulement d'air n'est pas pris en compte car négligeable (H4) ;
- Une conduction sous un gradient de température exprimée par la loi de Fourier.

Dans le cas de ce travail, la pression totale sera négligée (H4). La densité du flux de chaleur correspond finalement à la somme de ces transferts.

Conduction

Le vecteur de densité de flux de chaleur sortant est de la forme :

$$\vec{q} = -\lambda\, \overrightarrow{grad}(T) \qquad (9)$$

Advection et transfert de chaleur latente par changement de phase

L'enthalpie totale par unité de volume, qui correspond au stockage de chaleur dans le matériau, nous donne (A. Fabbri, 2020) :

$$H = (1-n)\rho_s h_s + n_l \rho_w h_l + n_v \rho_v h_v + n_a \rho_a h_a$$

Avec

h_i l'enthalpie spécifique de la phase i [J/kg]
n_i la part volumique de la phase i [-]

En bleu, la partie solide (description lagrangienne), en vert, la partie fluide (description eulérienne).

En dérivant par rapport au temps, et en intégrant par rapport au volume, on a :

$$\frac{d}{dt}\int_V H\, d\Omega = \frac{d}{dt}\int_V ((1-n)\rho_s h_s + n_v \rho_v h_v + n_a \rho_a h_a + n_l \rho_w h_l)\, d\Omega$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{d}{dt}\int_V H\, d\Omega = \int_V (1-n)\rho_s \frac{\partial h_s}{\partial t} d\Omega + \int_V \Big(n_v \rho_v \frac{\partial h_v}{\partial t} + n_a \rho_a \frac{\partial h_a}{\partial t} + n_l \rho_w \frac{\partial h_l}{\partial t} + h_v \frac{\partial n_v \rho_v}{\partial t} + div(h_v \vec{J_v}) + h_l \frac{\partial n_l \rho_w}{\partial t} + div(h_l \vec{J_l}) + h_a \frac{\partial n_a \rho_a}{\partial t} + div(h_a \vec{J_a}) \Big) d\Omega$$

Les termes en rouge sont négligeables devant les autres termes. En effet, l'air est considéré comme un gaz parfait et l'écoulement d'air est négligeable (H4, H6).

Ainsi :

$$\frac{d}{dt}\int_V H\, d\Omega = \boxed{\int_V (1-n)\rho_s \frac{\partial h_s}{\partial t} d\Omega + \int_V (n_v \rho_v \frac{\partial h_v}{\partial t} + n_a \rho_a \frac{\partial h_a}{\partial t} + n_l \rho_w \frac{\partial h_l}{\partial t})} \quad \text{Partie A}$$

$$\boxed{+(h_v (\frac{\partial n_v \rho_v}{\partial t} + div(h_v \vec{J_v})) + h_l (\frac{\partial n_l \rho_w}{\partial t} + div(h_l \vec{J_l})))d\Omega} \quad \text{Partie B} \qquad (10)$$

Partie A – Transfert changement de phase et advection

$$A = \boxed{(h_v (\overbrace{\frac{\partial n_v \rho_v}{\partial t} + div(\vec{J_v})}^{+\dot{r}}) + h_l (\overbrace{\frac{\partial n_l \rho_w}{\partial t} + div(\vec{J_l})}^{-\dot{r}}))} + \boxed{(\vec{J_l}\, \overrightarrow{grad}(h_l) + \vec{J_v}\, \overrightarrow{grad}(h_v))}$$

Les termes encadrés en rouge représentant la masse de vapeur d'eau relarguée ou captée par le matériau par les phénomènes d'évaporation/désorption ou de condensation/adsorption (A. Fabbri, 2020).

En posant l'hypothèse que la variation de masse de la vapeur d'eau dans les pores est négligeable (H12), on peut alors écrire (Soudani et al., 2016) :

$$\dot{r} \approx div(\vec{J_v})$$

$\vec{J_v}$ a été défini dans la partie précédente tel que :

$$\vec{J_v} = -\delta_p\, \overrightarrow{grad}(P_v)$$

D'où :

$$\dot{r} \approx -div\left(\delta_p \ \overrightarrow{grad}(P_v)\right)$$

Avec $\Delta h = L_v = h_v - h_l$ par définition, on obtient :

$$\dot{r}\Delta h = -L_v \ div\left(\delta_p \ \overrightarrow{grad}(P_v)\right)$$

Les termes encadrés en vert correspondent à l'advection. Le terme est dû à la chaleur transportée convectivement par l'eau et l'air dans les pores et s'écrit :

$$\vec{J_l}\,\overrightarrow{grad}(h_l) + \vec{J_v}\,\overrightarrow{grad}(h_v) = \vec{J_l}\overrightarrow{grad}(h_l) + \ \vec{J_v}\,\overrightarrow{grad}(h_l + L_v)$$

$$\vec{J_l}\,\overrightarrow{grad}(h_l) + \ \vec{J_v}\ \left(\overrightarrow{grad}(h_l) + \overrightarrow{grad}(L_v)\right) = \ (\vec{J_v} + \vec{J_l})\overrightarrow{grad}(h_l) + \vec{J_v}\,\overrightarrow{grad}(L_v)$$

Or L_v et h_l sont considérés comme constants. Le terme d'advection est donc négligeable.

La Partie A de l'équation (10) s'écrit alors :

$$\boxed{-L_v \ div(\delta_p \ \overrightarrow{grad}(P_v))} \qquad (11)$$

Partie B – Capacité thermique massique

En ce qui concerne la Partie B encadrée en bleu, on utilise aussi les approximations suivantes :

$$\frac{\partial h_l}{\partial t} \approx c_l \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{\rho_w}\frac{\partial P_l}{\partial t}$$

$$\frac{\partial h_v}{\partial t} \approx c_v \frac{\partial T}{\partial t}$$

En effet, la chaleur spécifique à pression constante [J/(kg·K)] est de la forme $c_i = \left(\frac{\partial h_i}{\partial T}\right)_{P_i}$ et ainsi : $\frac{\partial h_i}{\partial t} \approx c_i \frac{\partial T}{\partial t}$.

Cela nous permet ensuite d'écrire :

$$(1-n)\rho_s \frac{\partial h_s}{\partial t} + n_v\rho_v \frac{\partial h_v}{\partial t} + \ n_a\rho_a \frac{\partial h_a}{\partial t} + \ n_l\rho_w \frac{\partial h_l}{\partial t}$$
$$= \ ((1-n)\rho_s + \ n_v\rho_v \, c_v + n_a\rho_a \, c_a) \frac{\partial T}{\partial t} + \ +n_l\rho_w \left(c_l \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{\rho_l}\frac{\partial P_l}{\partial t}\right)$$

En notant $C_p = (1-n)\rho_s + n_v\rho_v \, c_v + n_a\rho_a \, c_a + \ n_l\rho_w \, c_l$

On obtient

$$n_v\rho_v \frac{\partial h_v}{\partial t} + \ n_a\rho_a \frac{\partial h_a}{\partial t} + \ n_l\rho_w \frac{\partial h_l}{\partial t} = C_p \ \frac{\partial T}{\partial t} + \ n_l \frac{\partial P_l}{\partial t}$$

La Partie B de l'équation (10) s'écrit alors :

$$\boxed{C_p \frac{\partial T}{\partial t} + n_l \frac{\partial P_l}{\partial t}} \qquad (12)$$

Conclusion conservation de la chaleur

En remplaçant dans l'équation (10), les valeurs de la partie A (11) et de la partie B (12), on obtient :

$$\frac{d}{dt}\int_V H\, d\Omega = \int_V C_p \frac{\partial T}{\partial t} + n_l \frac{\partial P_l}{\partial t} - L_v\, div(\delta_p\, \overrightarrow{grad}(P_v))d\Omega \qquad (13)$$

En vert, la partie B simplifiée

En rouge, la partie A simplifiée

$$\text{Or} \quad \frac{d}{dt}\int_V H\, d\Omega = -\int_V \vec{q}\, \vec{n} dS + \int_V n_l \left(\frac{dP_l}{dt}\right) d\Omega \qquad (14)$$

En remplaçant (14) dans (13), on obtient :

$$\int_V C_p \frac{\partial T}{\partial t} + n_l \frac{\partial P_l}{\partial t} - L_v\, div(\delta_p\, \overrightarrow{grad}(P_v))d\Omega = \int_V \lambda\, \overrightarrow{grad}(T)\, \vec{n} dS + \int_V n_l \frac{dP_l}{dt}\, d\Omega$$

Appliquée à une forme locale (i.e. à un volume élémentaire représentatif), on peut écrire cette égalité telle que :

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} - L_v\, div(\delta_p\, \overrightarrow{grad}(P_v)) = \mathrm{div}\left(\lambda\, \overrightarrow{grad}(T)\right)$$

$$\Leftrightarrow C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \mathrm{div}\left(\lambda\, \overrightarrow{grad}(T)\right) + L_v\, div(\delta_p\, \overrightarrow{grad}(P_v)) \qquad (15)$$

En vert, la conduction
En rouge, le terme de changement de phase

Conclusion modèle mathématique

Les moteurs de transferts choisis sont la température et la pression de vapeur pour leur caractère de variables continues. Les équations découlant des bilans massique et de chaleur nous permettent de les exprimer sous la forme suivante :

Bilan massique

$$\xi \times \frac{1}{P_{v,sat}(T)}\left(\frac{\partial P_v}{\partial t}\right) = div\left(k_m\, \vec{\nabla}(P_v)\right) + \gamma \frac{\partial T}{\partial t}$$

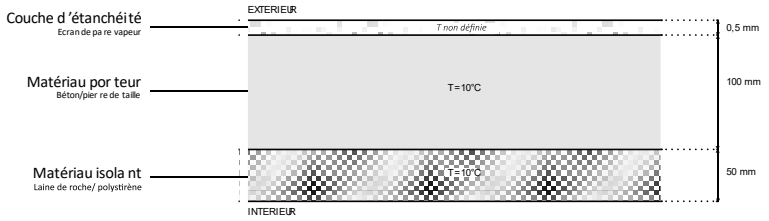
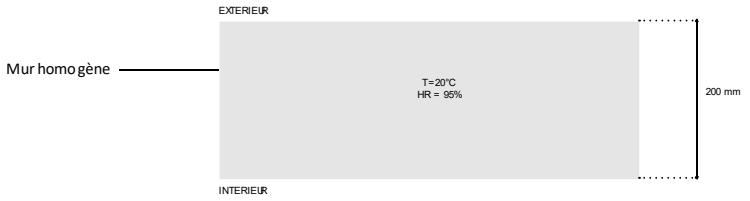
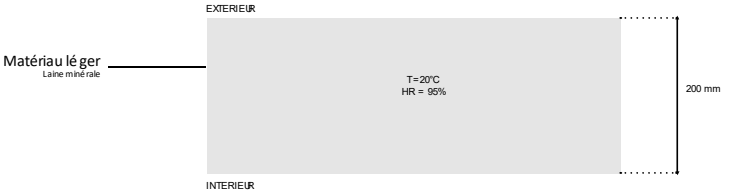
Bilan de chaleur

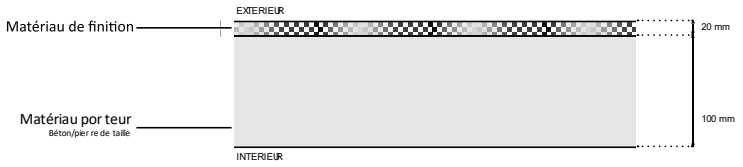
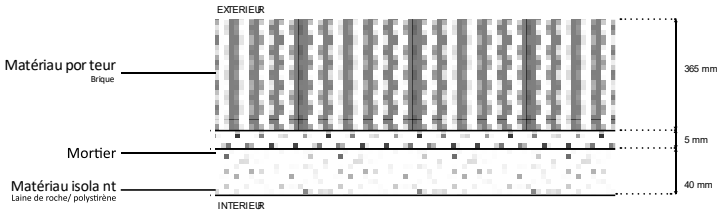
$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \mathrm{div}\left(\lambda\, \vec{\nabla}(T)\right) + L_v\, div(\delta_p\, \vec{\nabla}(P_v))$$

Annexe I - Détails des benchmarks hygrothermiques

HAMSTAD (2001)

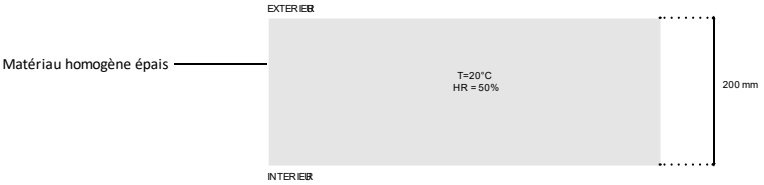
Tableau I. 1 - Détails HAMSTAD 2001 (Adan et al., 2004).

Cas étudié	Détails			Références
HAMSTAD 1 - Toit isolé Etude de la condensation interne à la surface de contact entre deux matériaux				(Aït Oumeziane et al., 2011; C.-E. Hagentoft et al., 2004; Oumeziane, 2013)
	Caractérisation matériau(x) : 1) un matériau porteur qui autorise le transfert d'eau liquide (porteur de charge actif capillaire) 2) Un matériau isolant avec résistance à l'écoulement liquide infini Temps de simulation : 5 ans	Conditions initiales		
		Températures $T_{eq,i}$ = non défini $T_{eq,e}$ = non défini	Humidité relative HR_i = non défini HR_e = non défini	
HAMSTAD 2 - Cas analytique Redistribution d'humidité par changement brusque d'humidité relative dans des conditions isothermes				(C.-E. Hagentoft et al., 2004; Soudani, 2016)
	Caractérisation matériau(x) : Structure étanche, un seul matériau homogène Temps de simulation : 1000 heures	Conditions initiales		
		Températures $T_{eq,i}$ = 20°C $T_{eq,e}$ = 20°C	Humidité relative HR_i = 65% HR_e = 45%	
HAMSTAD 3 - Mur léger Transfert d'humidité dû au flux d'air à travers une				(Aït Oumeziane et al., 2011; C.-E. Hagentoft et al., 2004; James,
	Caractérisation matériau(x) :	Conditions initiales		

couche de matériau	Un matériau seul avec le côté extérieur étanche à la vapeur mais ouvert à l'air Temps de simulation : 100 jours Exfiltration (20 jours) Infiltration (80 jours)	Températures $T_{eq,i} = 20°C$ $T_{eq,e} = 2°C$	Humidité relative $HR_i = 80\%$ $HR_e = 70\%$	2009; Oumeziane, 2013)
HAMSTAD 4 - Analyses de réponse Mouvement de l'humidité à l'intérieur d'un mur avec finition hygroscopique. Fortes variations climatiques. Présence d'eau sur la surface extérieure	 Caractérisation matériau(x) : Partie extérieure d'épaisseur 100 mm, épaisseur du matériau de finition de 20 mm Temps de simulation : 4 à 5 jours	Conditions initiales Températures $T_{eq,i}$ = non défini $T_{eq,e}$ = non défini	Humidité relative HR_i = non défini HR_e = non défini	(Aït Oumeziane et al., 2011; C.-E. Hagentoft et al., 2004; Oumeziane, 2013)
HAMSTAD 5 - Isolation intérieure active capillaire Redistribution de l'humidité à l'intérieur d'un mur avec capillaire actif. Etude du comportement hygrothermique d'une paroi multicouche	 Caractérisation matériau(x) : 3 matériaux ayant des propriétés différentes Temps de simulation : 60 jours	Conditions initiales Températures $T_{eq,i} = 20°C$ $T_{eq,e} = 0°C$	Humidité relative $HR_i = 60\%$ $HR_e = 80\%$	(Aït Oumeziane et al., 2011; C.-E. Hagentoft et al., 2004; Oumeziane, 2013)

EN15026 (2007)

Tableau I. 2 - Détails EN15026.

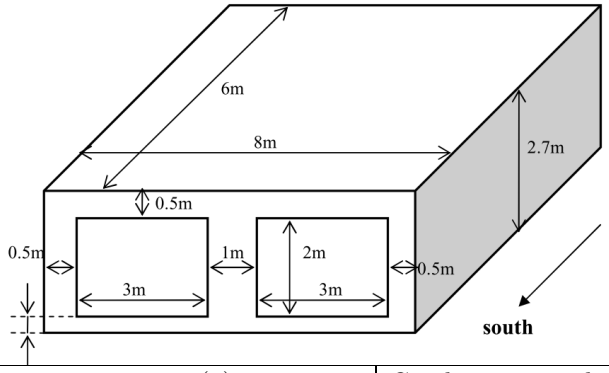
Cas étudié	Détails		Références
Annexe A Influence d'un changement progressif de température et d'humidité	 Caractérisation matériau(x) :	Conditions initiales	(CEN/TC 89, 2007; Soudani, 2016)

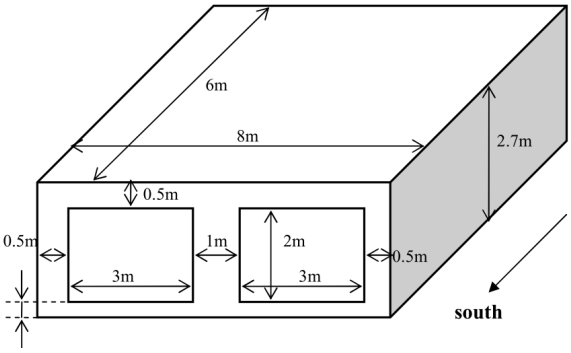
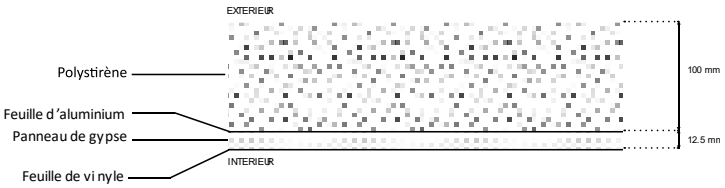
relative sur un mur semi infini	Le matériau est un mur semi-infini, modélisé en 1D avec un climat environnant constant. Le matériau est parfaitement étanche à l'air. Temps de simulation : 365 jours avec une première étape à 7 jours puis une seconde à 30 jours.	Température $T_{eq,i}$ = 20°C $T_{eq,e}$ = 30°C	Humidité relative HR_i = 50% HR_e = 95%	

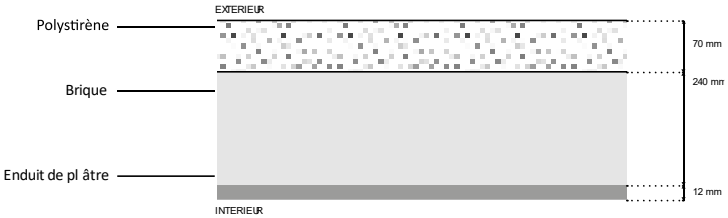
Annex 41 (2003-2007)

Les cas du benchmark de l'Annex 41 étudiés sont regroupés dans la Sous tâche 1 - *Modeling principles and common exercises* (Woloszyn & Rode, 2007). Les 5 cas principaux sont explicités ci-dessous.

Tableau I. 3 - Détails Annex 41.

Cas étudié	**Détails**		
Exercice 0 – BESTEST DIGEST Whole building energy modeling Vérification de la thermique des modèles par comparaison inter-modèle	Etude à l'échelle du bâtiment  		
	Caractérisation matériau(x) : 4 cas sont testés : *Plaque de plâtre, isolant, bois *Béton, isolant, bois *Plaque de plâtre, isolant, bois + chauffage et refroidissement * Béton, isolant, bois + chauffage et refroidissement Temps de simulation : 1 an	Conditions initiales	
		Températures $T_{eq,i}$ = non défini $T_{eq,e}$ = non défini	Humidité relative HR_i = non défini HR_e = non défini

<table>
<tr><td>Exercice 1 – Moisture balance of BESTEST building
Génération de vapeur, prédiction de l'humidité relative dans des conditions isothermes et transitoires
Fait suite au CE-0 précédent</td><td colspan="3">Etude à l'échelle du bâtiment
 
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Exercice 2 – Small climate chamber test
Validation des modèles en simulant les résultats expérimentaux au niveau de la pièce sous conditions non isothermes
Débit de ventilation</td><td colspan="3"> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Caractérisation matériau(x) : /

Temps de simulation :
18h
6h d'humidification
12 sans humidification</td><td colspan="2">Conditions initiales</td></tr>
<tr><td>Températures
$T_{eq,i}$ = non défini
$T_{eq,e}$ = 20°C</td><td>Humidité relative
HR_i = non défini
HR_e = 50%</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Exercice 3 – Test building with two parallel rooms
Mesures MOIST ENG des effets de tampons d'humidité</td><td colspan="3">Le test a été réalisé sur une chambre d'un volume de 50 m^3 et d'une surface de mur de 67 m^2 (sans plancher, porte et fenêtre).
 
</td></tr>
<tr><td>Caractérisation matériau(x) :</td><td colspan="2">Conditions initiales</td></tr>
</table>

	2 pièces sont comparées. Elles ont des géométries similaires mais la pièce de référence est recouverte de papier d'aluminium pour empêcher la sorption des surfaces. Différentes versions de la disposition sont prises en compte : 1) Salle de test uniquement couverte de feuilles d'aluminium sur les murs et le plafond 2) Ajout de plaques de plâtres sur les murs 3) Ajout de panneau de gypse sur les murs et le plafond Temps de simulation : 1 an et 4 mois	Températures $T_{eq,i}$ = 20°C $T_{eq,e}$ = 20°C	Humidité relative HR_i = non défini HR_e = non défini
Exercice 4 – Extension of Common exercise 3 Etude de la consommation d'énergie dans la pièce utilisée pour les mesures non isothermes en supposant un système de ventilation contrôlée appliquée	Non pertinent dans le cadre de ce travail (car se concentre sur la ventilation)		
Exercice 5 Evaluation de l'impact des flux d'infiltration accidentels qui traversent l'enveloppe sur la durabilité et la consommation d'énergie			

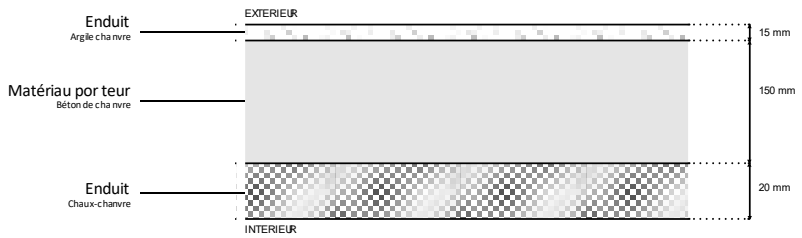
ANR Hygrobat (2014)

Tableau I. 4 - Détails ANR Hygrobat.

Cas étudié	**Détails**			**Références**
Proposer une procédure de caractérisation expérimentale des propriétés hygrothermiques des matériaux de construction utilisés dans les enveloppes des bâtiments	Caractérisation matériau(x) : - Bois d'épicéa avec cernes - Bois d'épicéa avec cernes larges - Panneaux isolants de fibres de bois - Panneaux de bois de type OSB - Enduit extérieur, applicable directement sur la fibre de Temps de simulation : 24h pas de discrétisation de 36 secondes	Conditions initiales		(Berger, 2014; Woloszyn et al., 2014)
		Températures $T_{eq,i} = 23°C$ $T_{eq,e} = 23°C$	Pression de l'air $P_{a,i} = 40\%$ $P_{a,e} = 90\%$	

Gdr MBS (2020)

Tableau I. 5 - Détails Gdr MBS.

Cas étudié	**Détails**		**Références**
B1 Modélisation du comportement mécanique d'un composite	Non adapté dans le cadre de la simulation hygrothermique		(Lanos & Amziane, 2020)
B2 Transferts couplés thermique et hydrique dans une paroi			(Lanos et al., 2020)
	Caractérisation matériau(x) :	Conditions initiales	

	La teneur en eau initiale des matériaux n'est pas connue. Les parois sont soumises à un climat hivernal, froid et humide de type Normand. Le contact est supposé parfait entre les couches. La paroi est protégée de la pluie Temps de simulation : 18 jours après une période de 1 mois sous ce climat Pas de temps de 5 mins	Températures $T_{eq,i}$ = non défini $T_{eq,e}$ = non défini	Pression de l'air $P_{a,i}$ = non défini $P_{a,e}$ = non défini	

Annexe J - Définition des climats pour la modélisation

Température en °C sur un an

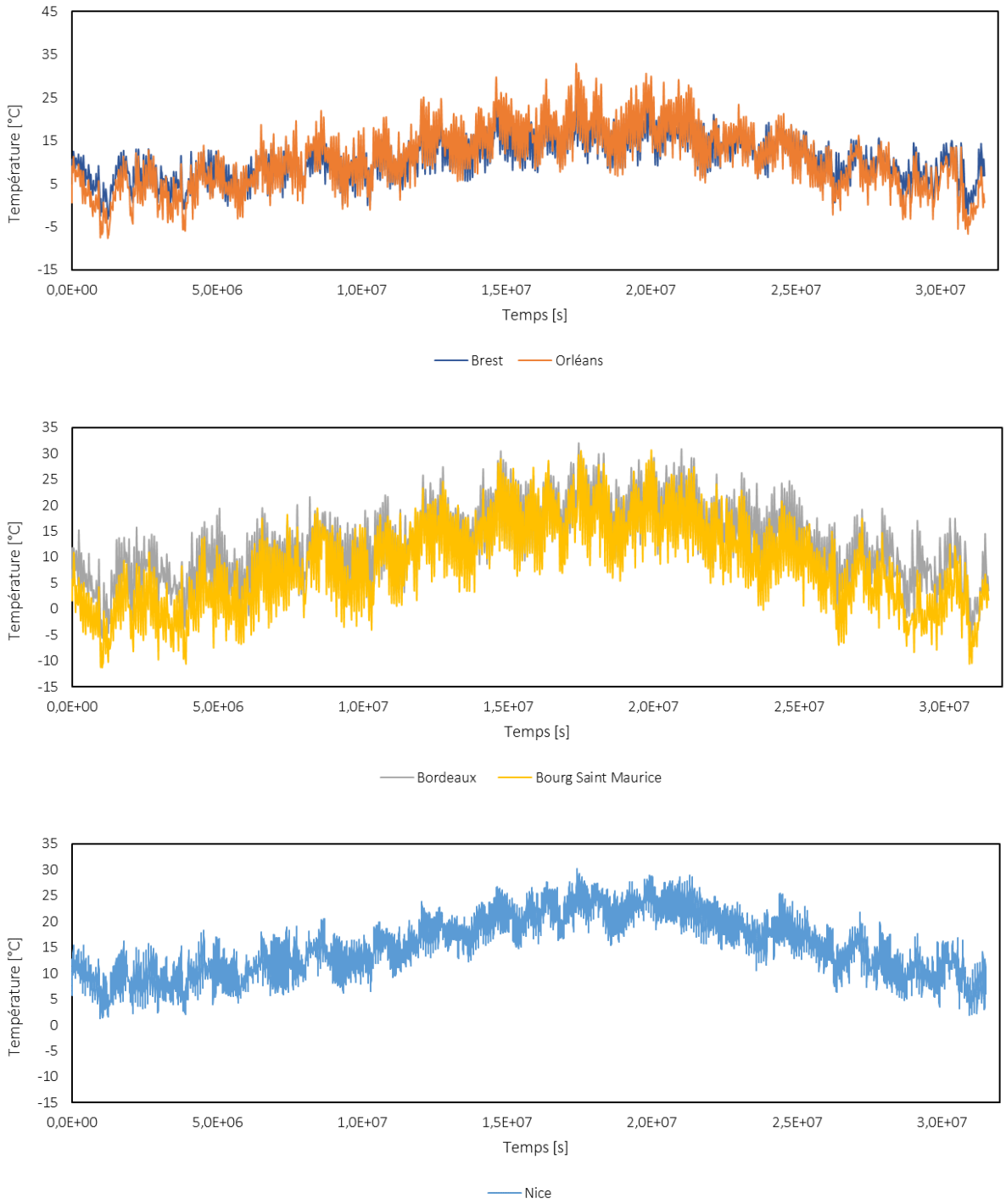


Figure J. 1 - Températures de 2004.

Humidité relative sur un an

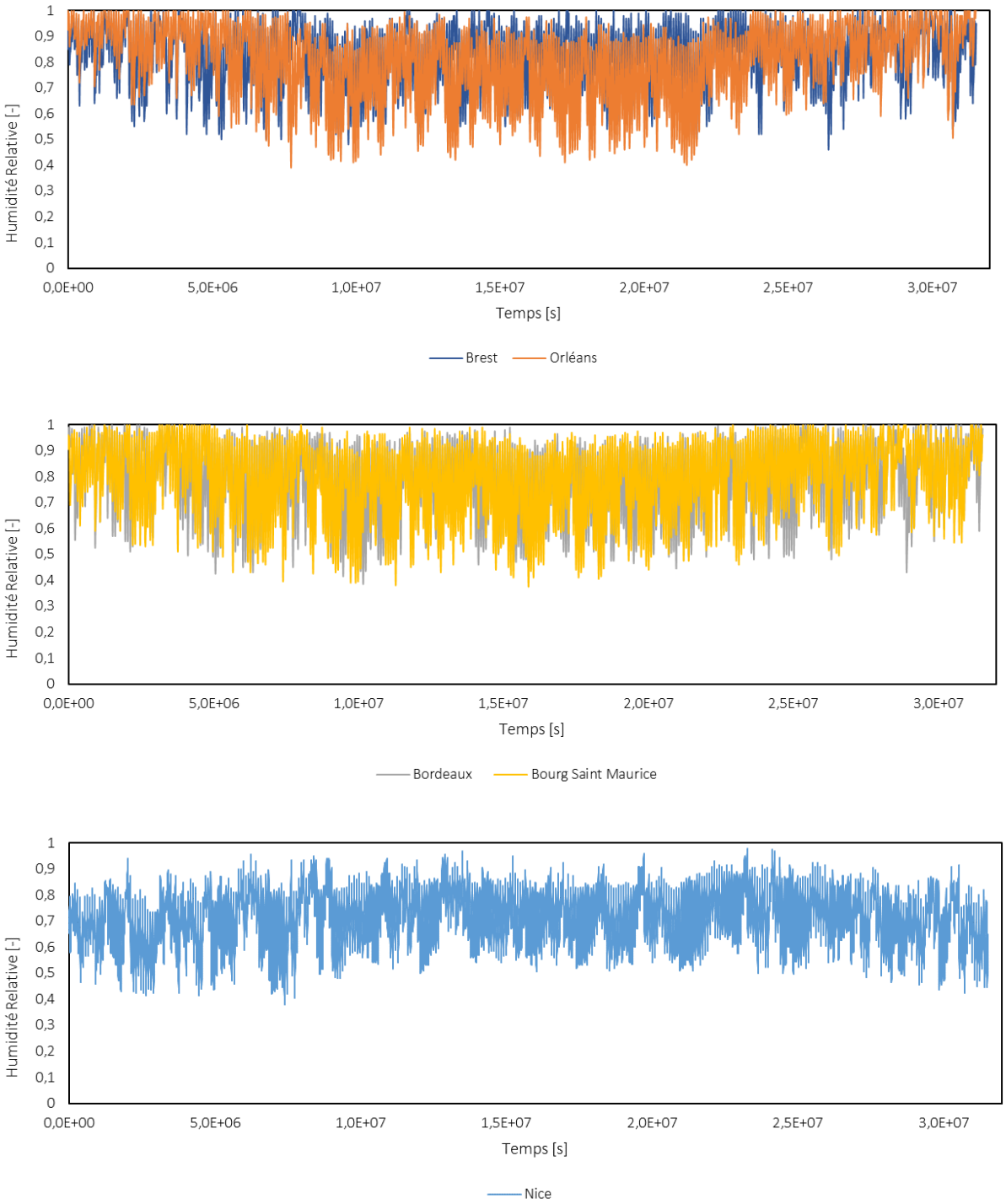


Figure J. 2 - Humidité relative de 2004.

Vent en m/s sur un an

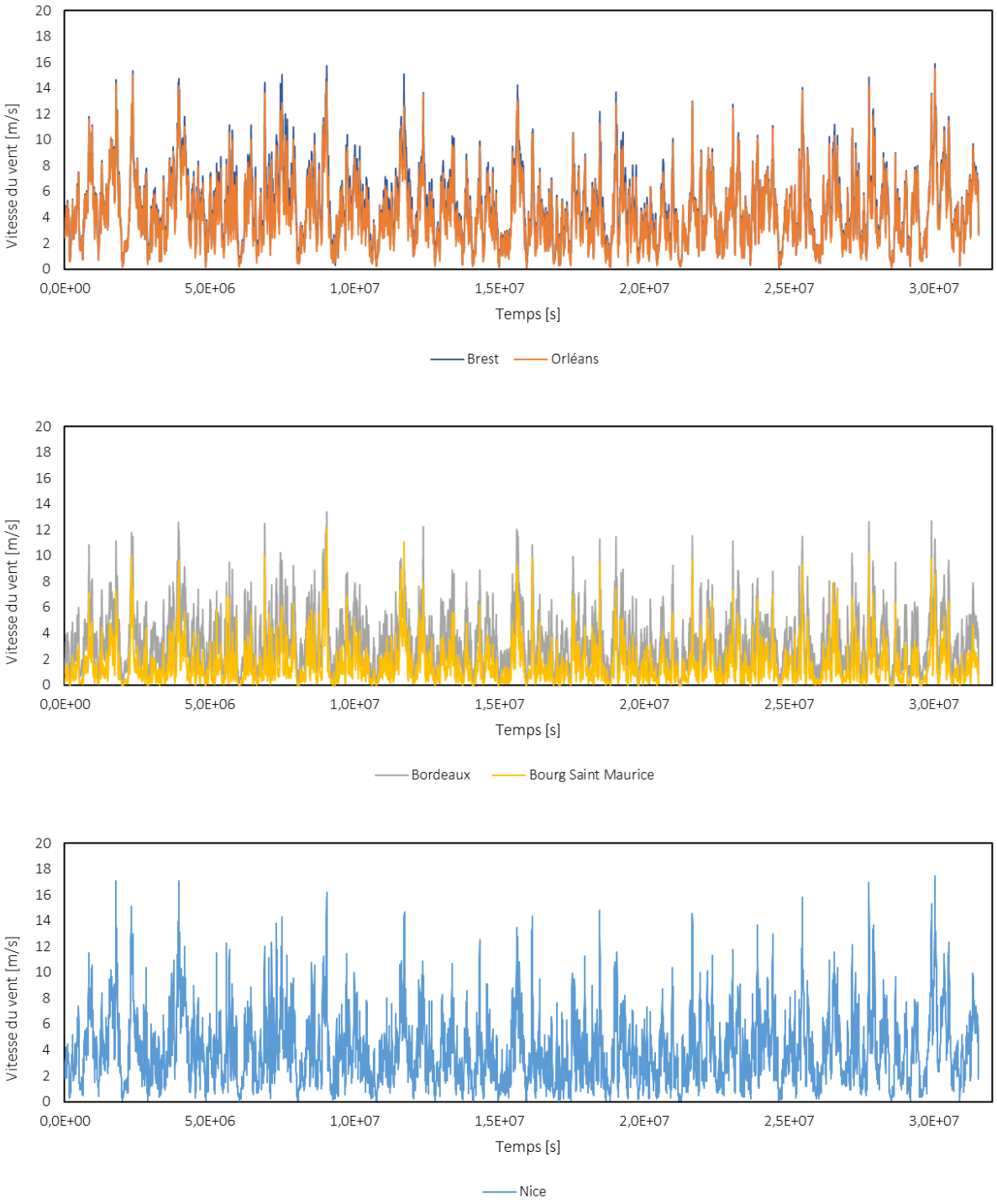


Figure J. 3 - Vitesse du vent en 2004.

Annexe K -Différence entre les climats de Bourg Saint Maurice et Nice sur un an

Critères : température, humidité relative et vitesse du vent

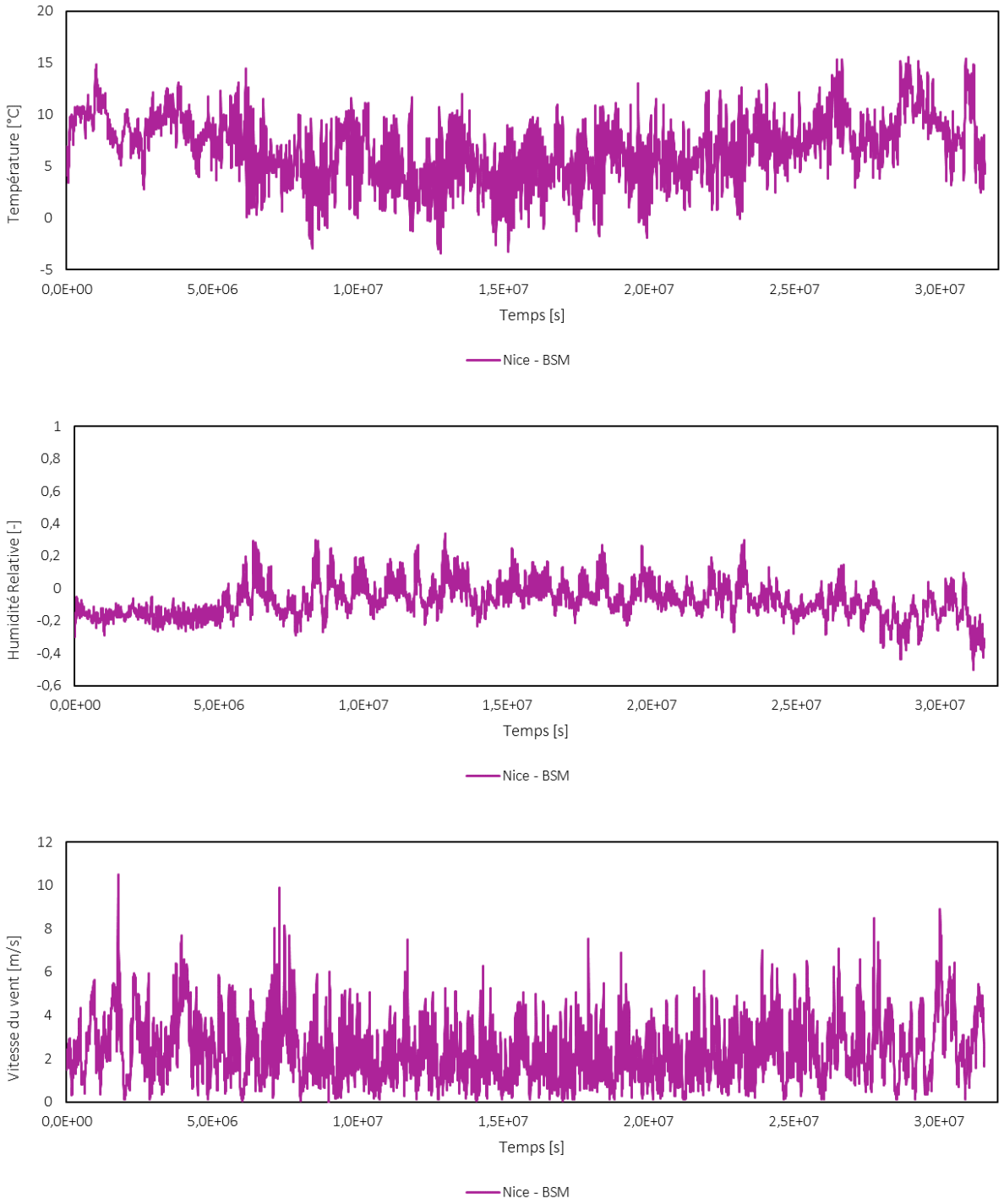


Figure K. 1 - Différence entre les climats de Nice et de Bourg Saint Maurice.

Annexe L - Définition de P_v selon HR et T°C et de la formulation de la $P_{v,sat}$

Domaine d'humidité relative : Entre 30% et 70% (confort thermique dans une habitation)

Domaine de température : entre 15°C et 30°C (fluctuations maximales dans une habitation)

Tableau L. 1 - Définition de P_v en fonction de l'humidité relative et la température.

T [K]	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313
$P_{v,sat}$ [Pa]	1722	1826	1936	2051	2172	2300	2434	2575	2723	2879	3042	3214	3393	3582	3780	3987	4204	4431	4670	4919	5179	5452	5737	6036	6347	6673
HR [-]	**P_v [Pa]**																									
0,30	517	548	581	615	652	690	730	773	817	864	913	964	1018	1075	1134	1196	1261	1329	1401	1476	1554	1636	1721	1811	1904	2002
0,31	534	566	600	636	673	713	755	798	844	892	943	996	1052	1110	1172	1236	1303	1374	1448	1525	1606	1690	1779	1871	1968	2069
0,32	551	584	619	656	695	736	779	824	871	921	974	1028	1086	1146	1210	1276	1345	1418	1494	1574	1657	1745	1836	1931	2031	2135
0,33	568	603	639	677	717	759	803	850	899	950	1004	1060	1120	1182	1247	1316	1387	1462	1541	1623	1709	1799	1893	1992	2095	2202
0,34	586	621	658	697	739	782	828	876	926	979	1034	1093	1154	1218	1285	1356	1429	1507	1588	1672	1761	1854	1951	2052	2158	2269
0,35	603	639	678	718	760	805	852	901	953	1008	1065	1125	1188	1254	1323	1395	1471	1551	1634	1722	1813	1908	2008	2112	2222	2335
0,36	620	657	697	738	782	828	876	927	980	1036	1095	1157	1222	1290	1361	1435	1513	1595	1681	1771	1865	1963	2065	2173	2285	2402
0,37	637	676	716	759	804	851	901	953	1008	1065	1126	1189	1256	1325	1399	1475	1556	1640	1728	1820	1916	2017	2123	2233	2348	2469
0,38	654	694	736	779	826	874	925	979	1035	1094	1156	1221	1290	1361	1436	1515	1598	1684	1774	1869	1968	2072	2180	2294	2412	2536
0,39	672	712	755	800	847	897	949	1004	1062	1123	1186	1253	1323	1397	1474	1555	1640	1728	1821	1918	2020	2126	2238	2354	2475	2602
0,40	689	730	774	820	869	920	974	1030	1089	1152	1217	1285	1357	1433	1512	1595	1682	1773	1868	1968	2072	2181	2295	2414	2539	2669
0,41	706	749	794	841	891	943	998	1056	1117	1180	1247	1318	1391	1469	1550	1635	1724	1817	1915	2017	2124	2235	2352	2475	2602	2736
0,42	723	767	813	861	912	966	1022	1082	1144	1209	1278	1350	1425	1504	1587	1675	1766	1861	1961	2066	2175	2290	2410	2535	2666	2803
0,43	740	785	832	882	934	989	1047	1107	1171	1238	1308	1382	1459	1540	1625	1714	1808	1906	2008	2115	2227	2344	2467	2595	2729	2869
0,44	758	804	852	902	956	1012	1071	1133	1198	1267	1339	1414	1493	1576	1663	1754	1850	1950	2055	2164	2279	2399	2524	2656	2793	2936
0,45	775	822	871	923	978	1035	1095	1159	1225	1295	1369	1446	1527	1612	1701	1794	1892	1994	2101	2213	2331	2454	2582	2716	2856	3003
0,46	792	840	890	943	999	1058	1120	1185	1253	1324	1399	1478	1561	1648	1739	1834	1934	2038	2148	2263	2383	2508	2639	2776	2920	3069
0,47	809	858	910	964	1021	1081	1144	1210	1280	1353	1430	1510	1595	1684	1776	1874	1976	2083	2195	2312	2434	2563	2697	2837	2983	3136

0,48	827	877	929	985	1043	1104	1168	1236	1307	1382	1460	1543	1629	1719	1814	1914	2018	2127	2241	2361	2486	2617	2754	2897	3047	3203
0,49	844	895	949	1005	1064	1127	1193	1262	1334	1411	1491	1575	1663	1755	1852	1954	2060	2171	2288	2410	2538	2672	2811	2957	3110	3270
0,50	861	913	968	1026	1086	1150	1217	1288	1362	1439	1521	1607	1697	1791	1890	1993	2102	2216	2335	2459	2590	2726	2869	3018	3174	3336
0,51	878	931	987	1046	1108	1173	1241	1313	1389	1468	1552	1639	1731	1827	1928	2033	2144	2260	2381	2509	2642	2781	2926	3078	3237	3403
0,52	895	950	1007	1067	1130	1196	1266	1339	1416	1497	1582	1671	1765	1863	1965	2073	2186	2304	2428	2558	2693	2835	2983	3139	3301	3470
0,53	913	968	1026	1087	1151	1219	1290	1365	1443	1526	1612	1703	1799	1898	2003	2113	2228	2349	2475	2607	2745	2890	3041	3199	3364	3537
0,54	930	986	1045	1108	1173	1242	1314	1391	1471	1555	1643	1735	1832	1934	2041	2153	2270	2393	2522	2656	2797	2944	3098	3259	3427	3603
0,55	947	1004	1065	1128	1195	1265	1339	1416	1498	1583	1673	1767	1866	1970	2079	2193	2312	2437	2568	2705	2849	2999	3156	3320	3491	3670
0,56	964	1023	1084	1149	1217	1288	1363	1442	1525	1612	1704	1800	1900	2006	2117	2233	2354	2482	2615	2755	2901	3053	3213	3380	3554	3737
0,57	982	1041	1103	1169	1238	1311	1387	1468	1552	1641	1734	1832	1934	2042	2154	2273	2396	2526	2662	2804	2952	3108	3270	3440	3618	3803
0,58	999	1059	1123	1190	1260	1334	1412	1494	1580	1670	1764	1864	1968	2078	2192	2312	2438	2570	2708	2853	3004	3162	3328	3501	3681	3870
0,59	1016	1077	1142	1210	1282	1357	1436	1519	1607	1699	1795	1896	2002	2113	2230	2352	2480	2615	2755	2902	3056	3217	3385	3561	3745	3937
0,60	1033	1096	1161	1231	1303	1380	1461	1545	1634	1727	1825	1928	2036	2149	2268	2392	2522	2659	2802	2951	3108	3271	3442	3621	3808	4004
0,61	1050	1114	1181	1251	1325	1403	1485	1571	1661	1756	1856	1960	2070	2185	2306	2432	2564	2703	2848	3000	3159	3326	3500	3682	3872	4070
0,62	1068	1132	1200	1272	1347	1426	1509	1597	1688	1785	1886	1992	2104	2221	2343	2472	2607	2748	2895	3050	3211	3380	3557	3742	3935	4137
0,63	1085	1150	1220	1292	1369	1449	1534	1622	1716	1814	1917	2025	2138	2257	2381	2512	2649	2792	2942	3099	3263	3435	3615	3802	3999	4204
0,64	1102	1169	1239	1313	1390	1472	1558	1648	1743	1842	1947	2057	2172	2293	2419	2552	2691	2836	2989	3148	3315	3489	3672	3863	4062	4271
0,65	1119	1187	1258	1333	1412	1495	1582	1674	1770	1871	1977	2089	2206	2328	2457	2592	2733	2880	3035	3197	3367	3544	3729	3923	4126	4337
0,66	1137	1205	1278	1354	1434	1518	1607	1700	1797	1900	2008	2121	2240	2364	2495	2631	2775	2925	3082	3246	3418	3598	3787	3983	4189	4404
0,67	1154	1224	1297	1374	1455	1541	1631	1725	1825	1929	2038	2153	2274	2400	2532	2671	2817	2969	3129	3296	3470	3653	3844	4044	4253	4471
0,68	1171	1242	1316	1395	1477	1564	1655	1751	1852	1958	2069	2185	2308	2436	2570	2711	2859	3013	3175	3345	3522	3708	3901	4104	4316	4537
0,69	1188	1260	1336	1415	1499	1587	1680	1777	1879	1986	2099	2217	2341	2472	2608	2751	2901	3058	3222	3394	3574	3762	3959	4165	4380	4604
0,70	1205	1278	1355	1436	1521	1610	1704	1803	1906	2015	2130	2250	2375	2507	2646	2791	2943	3102	3269	3443	3626	3817	4016	4225	4443	4671

L'écriture de $P_{v,sat}$ peut être déduite de la formule de Clapeyron comme cela a été effectué dans le développement mathématique. La pression de vapeur saturante revêt alors la forme :

$$P_{v,sat}(T) = P_{v,sat}(T_0)\exp\left(\frac{L_v}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

Avec :

- L_v Chaleur latente de changement de phase [J/mol] $L_v = \frac{L}{M}$
  avec
  L la chaleur latente de vaporisation égale à 2470 kJ/kg
  M la masse molaire de l'eau égale à 0,01801 kg/mol
- T_0 Température de référence – Ici défini à 293,15K
- $P_{v,sat}(T_0)$ égale à 2300 Pa

Une autre écriture utilisée dans la littérature pour sa simplification est de la forme (Berger et al., 2019; Ferroukhi, 2015) :

$$P_{v,sat}(T) = \mathrm{e}^{\left(23{,}5771 - \frac{4042{,}9}{\mathrm{T} - 37{,}58}\right)}$$

Une analyse graphique a été réalisée pour définir quelle formulation serait la plus adéquate pour la modélisation.

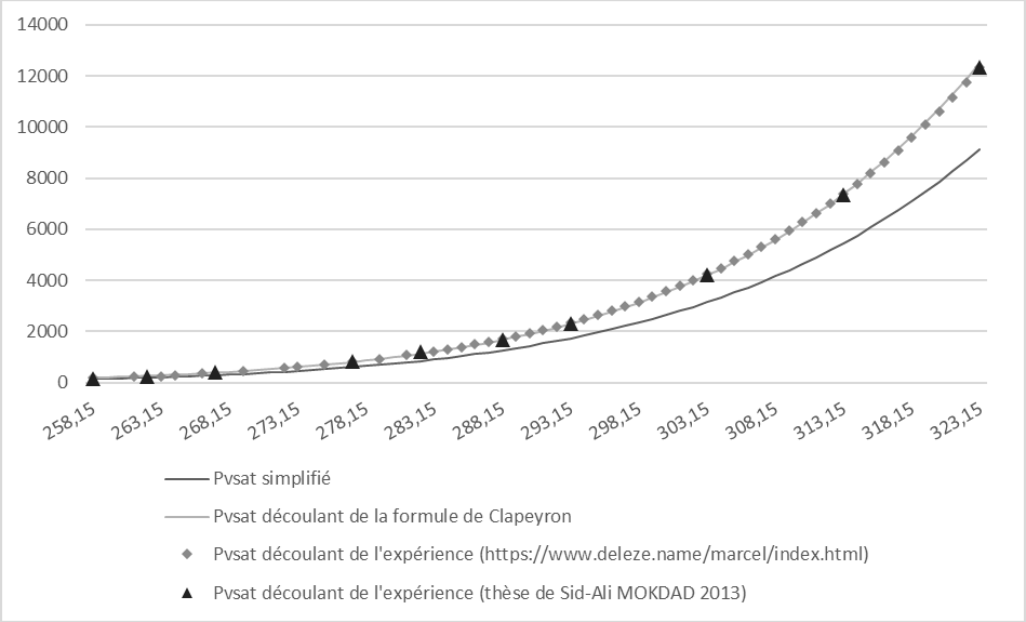


Figure L. 1 - Analyse des courbes de Pression de vapeur saturante.

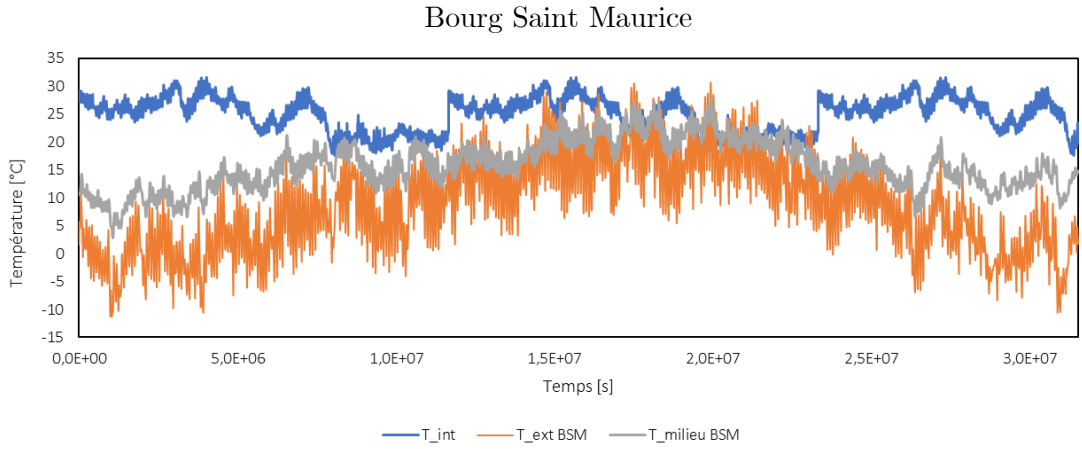
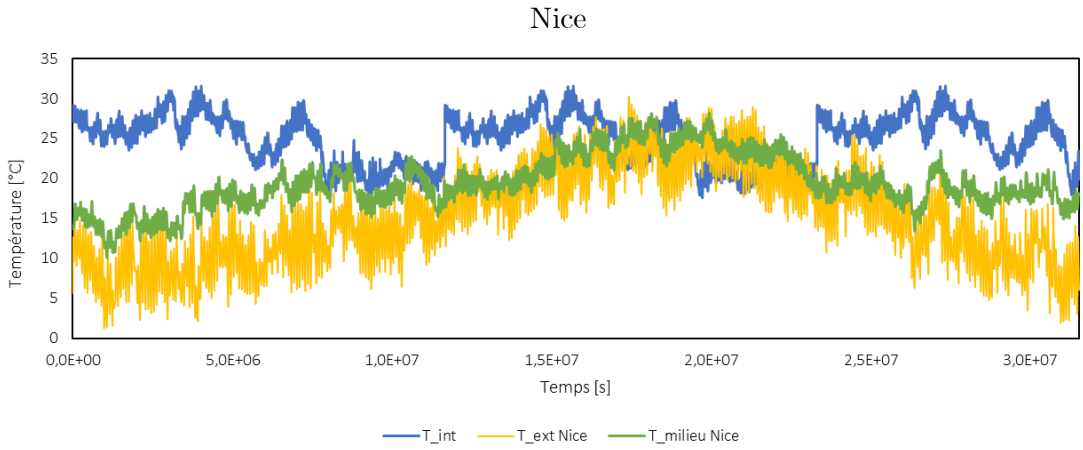
Après analyse des courbes, la formulation la plus proche des résultats expérimentaux s'avèrent être la $P_{v,sat}$ déduit de la formule de Clapeyron.

Annexe M - Courbes complémentaires obtenues à partir de la simulation

Température

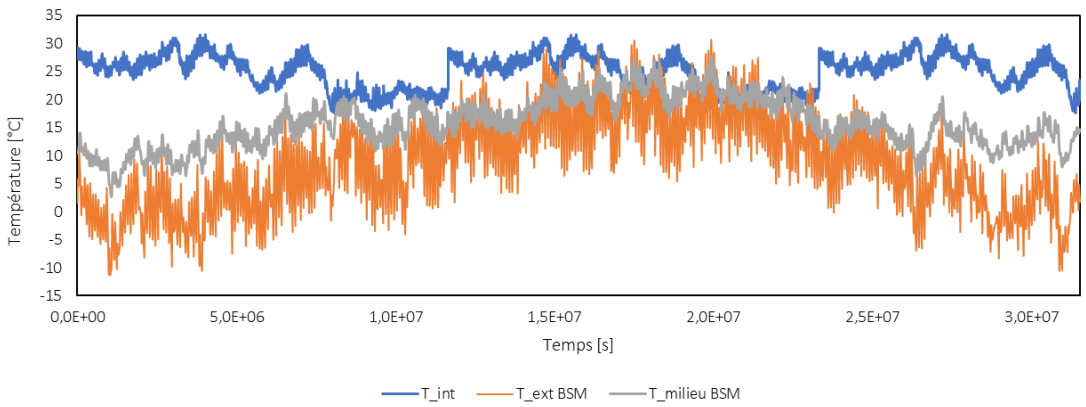
Comparaison entre la température de l'ambiance intérieure, de l'ambiance extérieure et au milieu du matériau biosourcé pour les deux climats (Bourg Saint Maurice et Nice) et les trois ensembles bicouche (béton+C2-H*, béton+C2-S et béton+HB-S), simulation C2 hygrothermique salle de bains.

Tableau M. 1 - Courbes de température relatives à la modélisation.

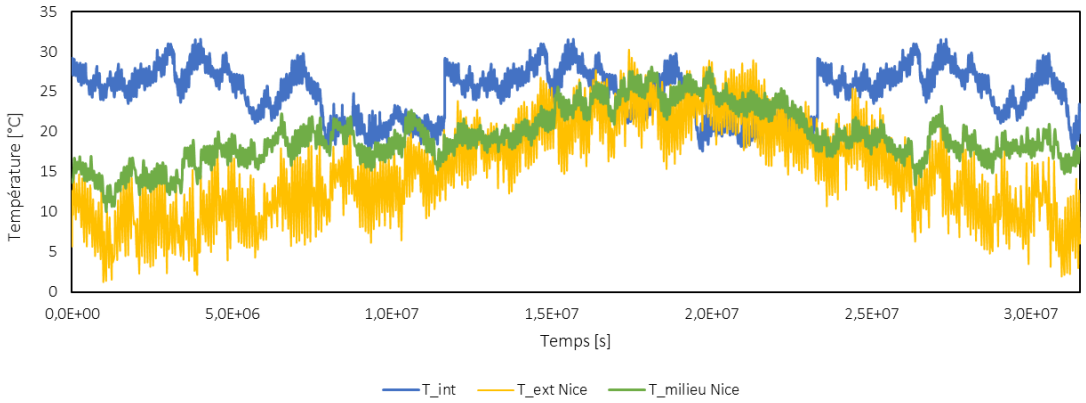
C2-H*	 

C2-S

Bourg Saint Maurice

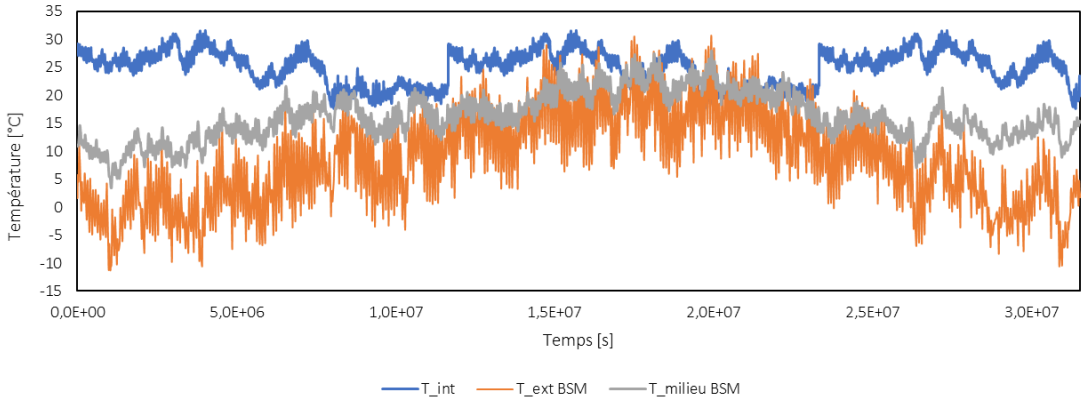


Nice

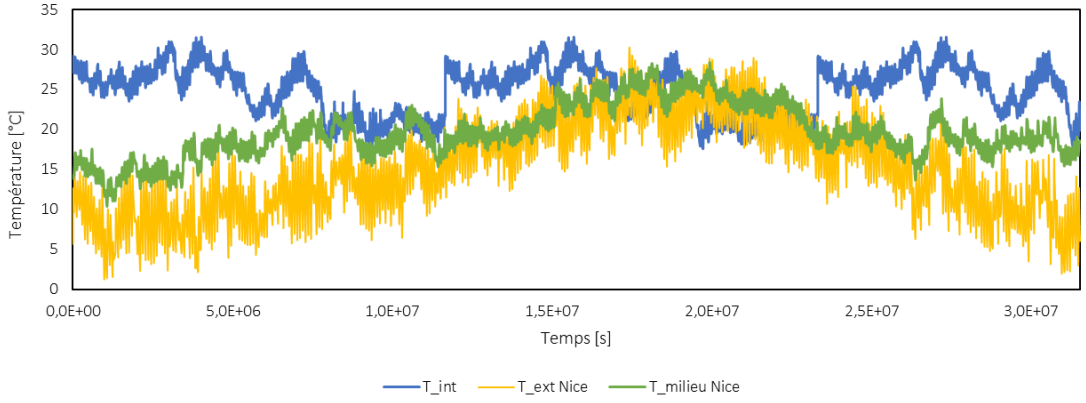


HB-S

Bourg Saint Maurice



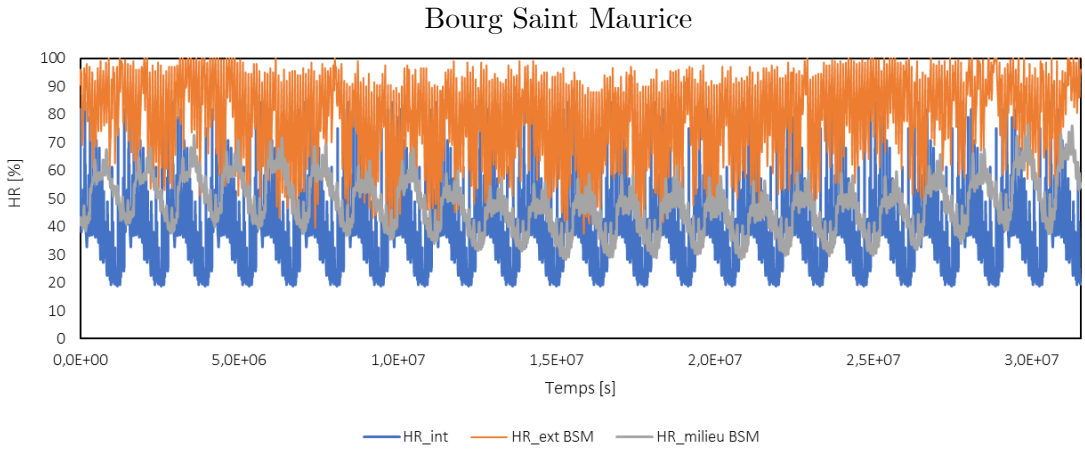
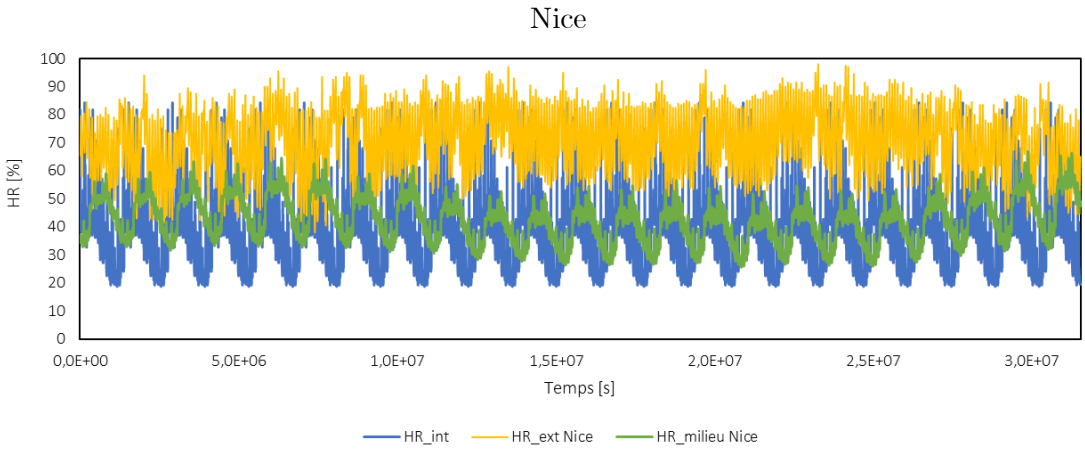
Nice



Humidité relative

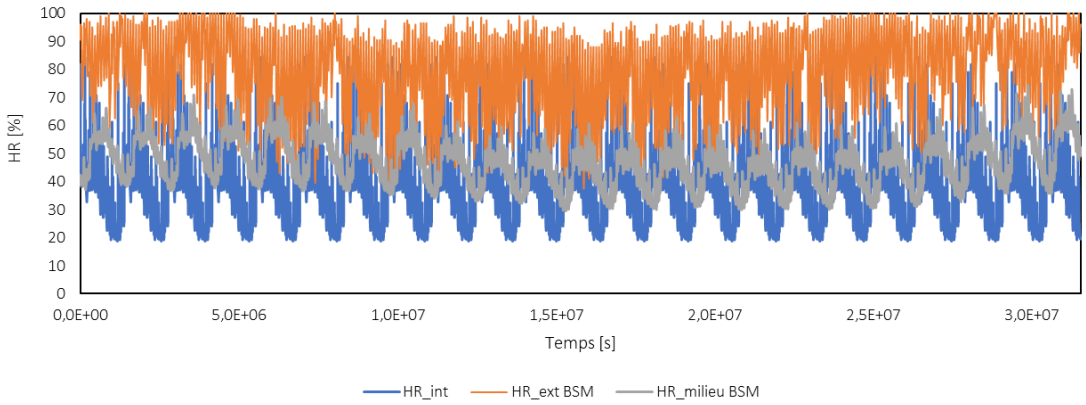
Comparaison entre l'humidité relative de l'ambiance intérieure, de l'ambiance extérieure et au milieu du matériau biosourcé pour les deux climats (Bourg Saint Maurice et Nice) et les trois ensembles bicouche (béton+C2-H*, béton+C2-S et béton+HB-S), simulation C2 hygrothermique salle de bains.

Tableau M. 2 - Courbes d'humidité relative liées à la modélisation.

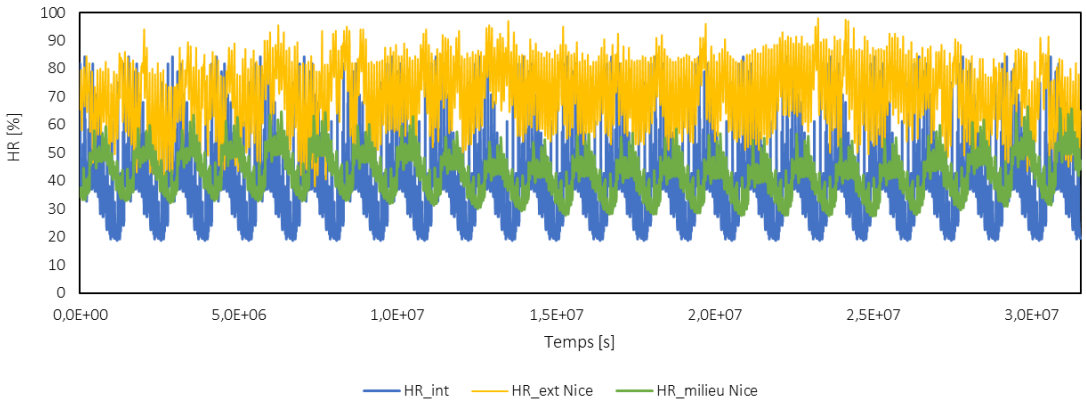
C2-H*	 

C2-S

Bourg Saint Maurice

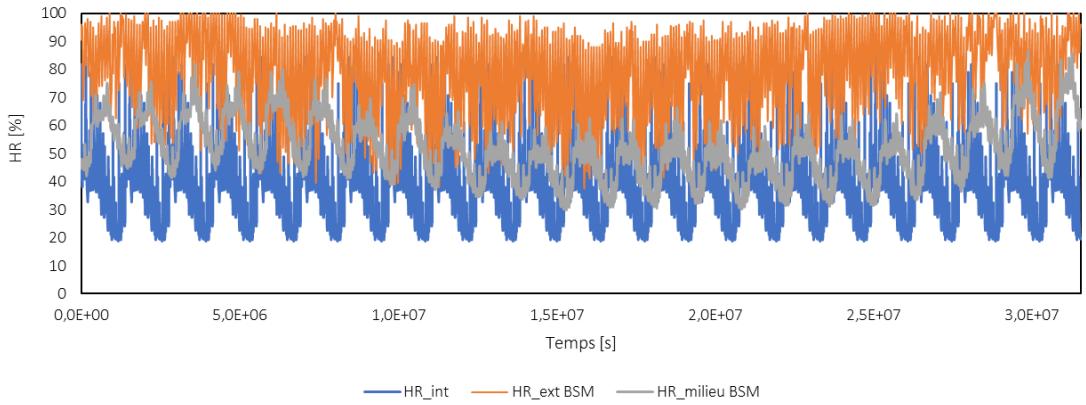


Nice

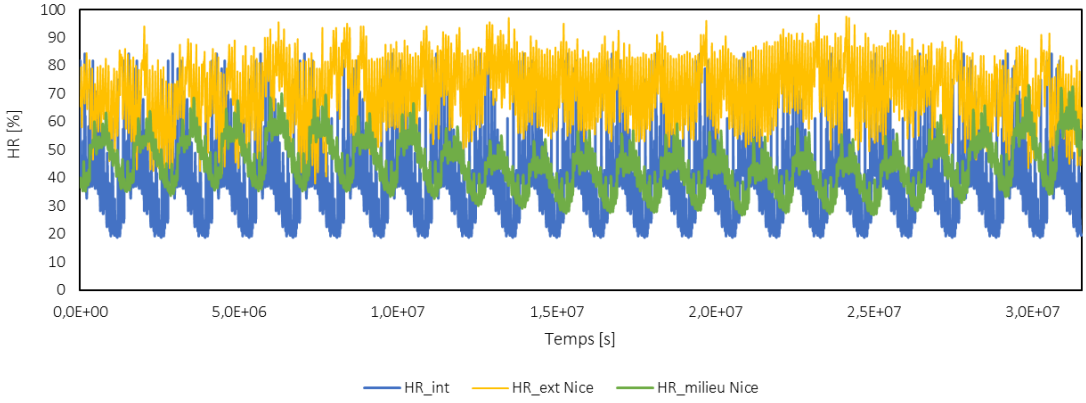


HB-S

Bourg Saint Maurice



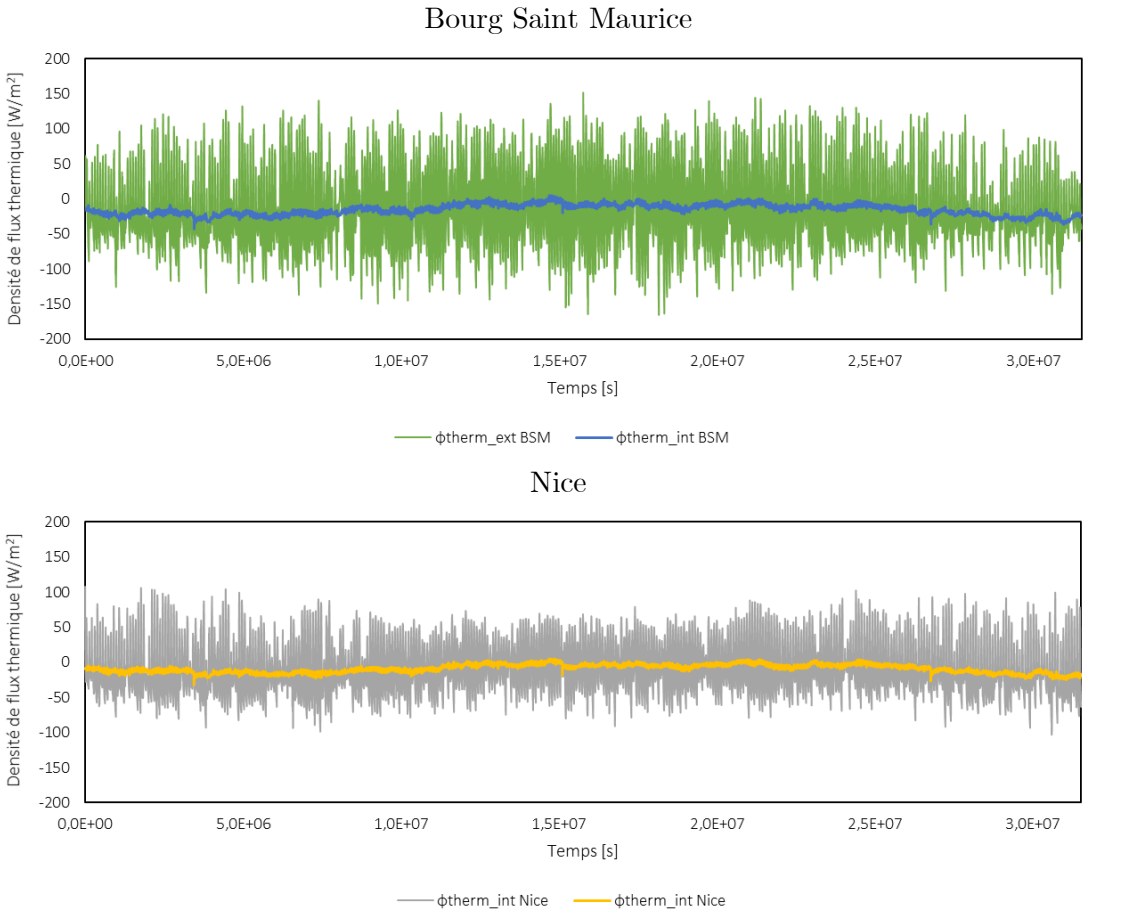
Nice



Densité de flux thermique

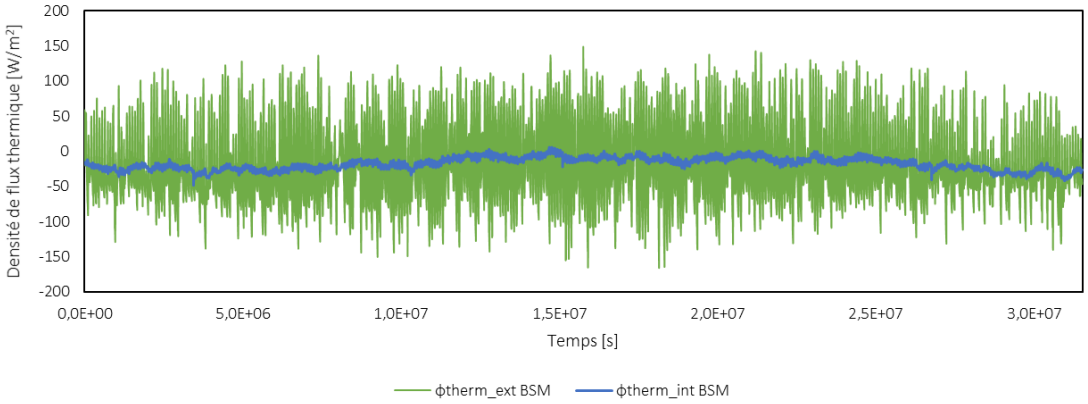
Comparaison entre la densité de flux thermique à la surface extérieure et à la surface intérieure pour les deux climats (Bourg Saint Maurice et Nice) et les trois ensembles bicouche (béton+C2-H*, béton+C2-S et béton+HB-S), simulation C2 hygrothermique salle de bains.

Tableau M. 3 - Courbes de densité de flux thermique liées à la modélisation.

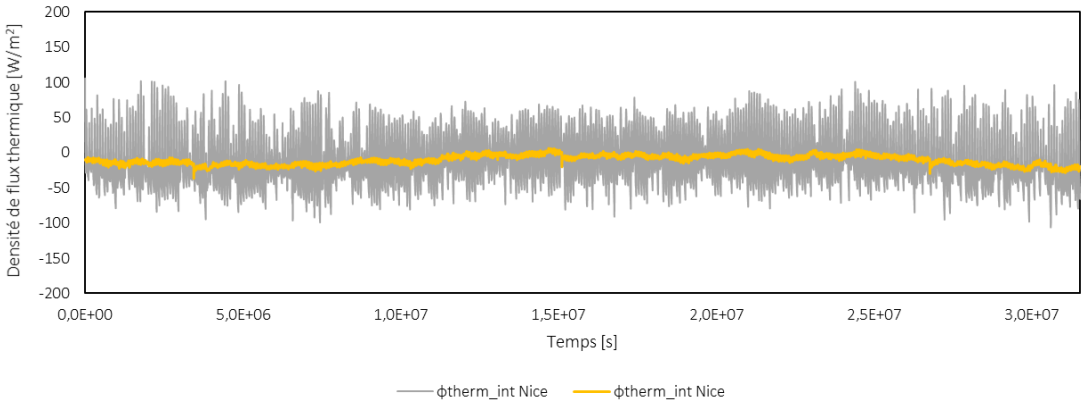
C2-H*	

C2-S

Bourg Saint Maurice

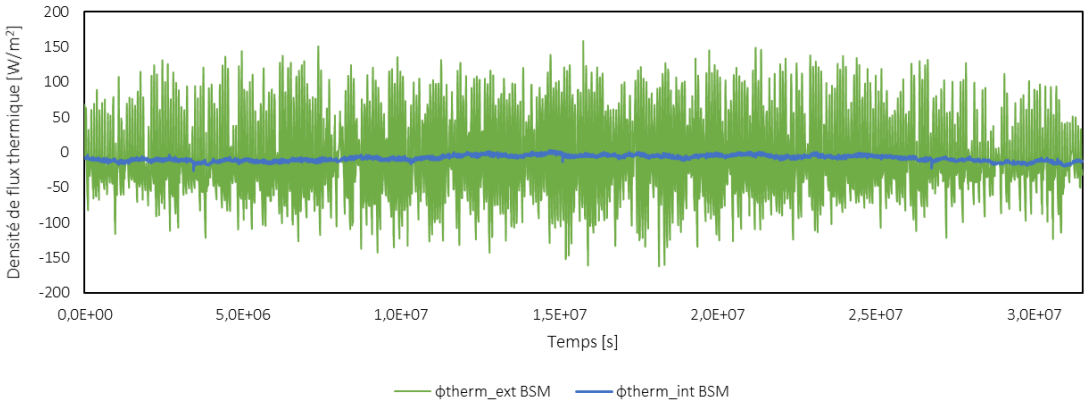


Nice

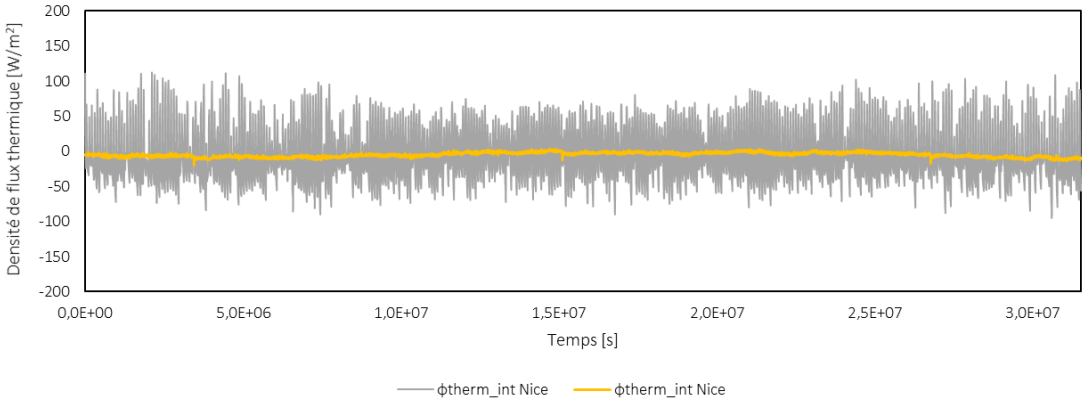


HB-S

Bourg Saint Maurice



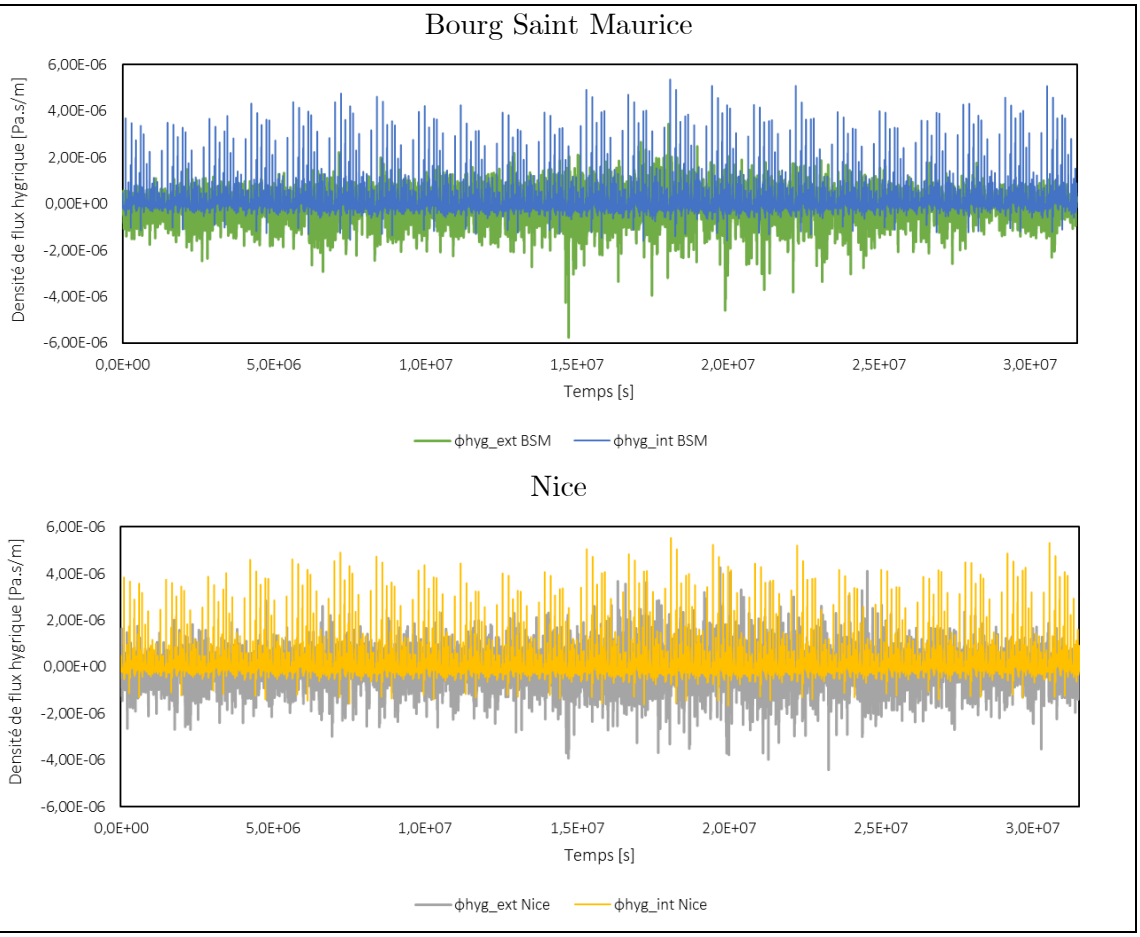
Nice



Densité de flux hygrique

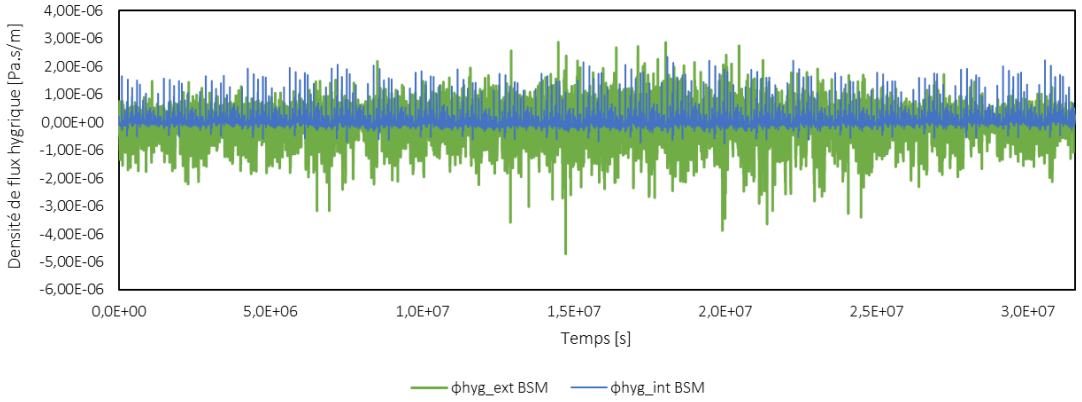
Comparaison entre la densité de flux hygrique à la surface extérieure et à la surface intérieure pour les deux climats (Bourg Saint Maurice et Nice) et les trois ensembles bicouche (béton+C2-H*, béton+C2-S et béton+HB-S), simulation C2 hygrothermique salle de bains.

Tableau M. 4 - Courbes de densité de flux massique liées à la modélisation.

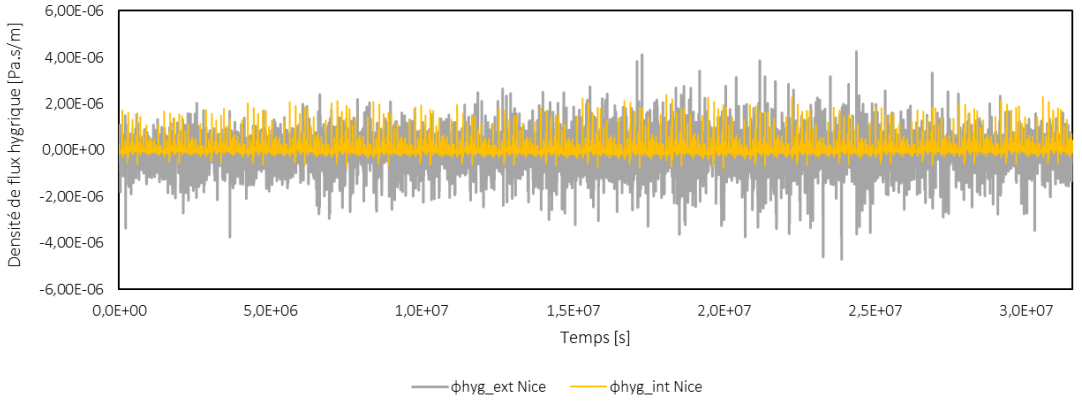
C2-H*	

C2-S

Bourg Saint Maurice

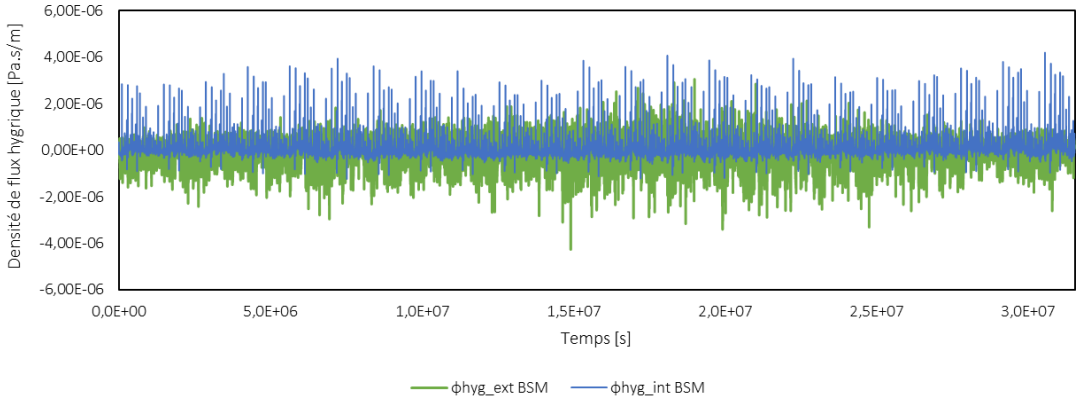
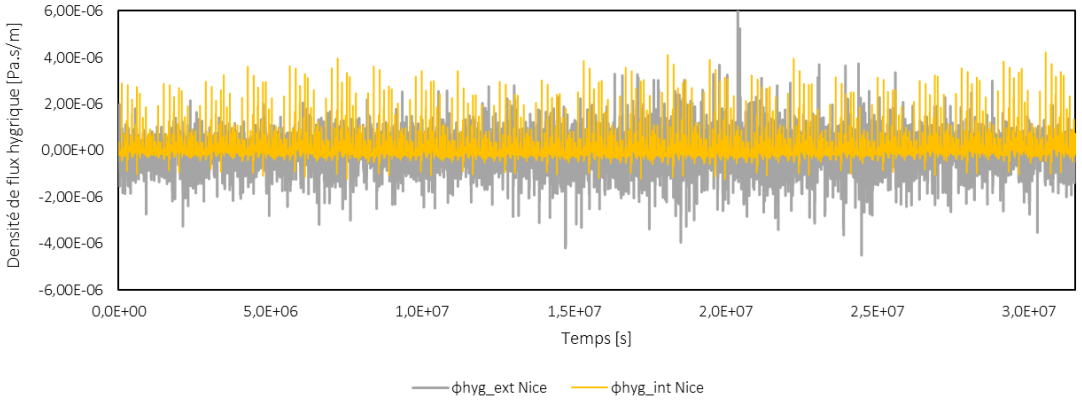


Nice



HB-S

Bourg Saint Maurice



Nice