



HAL
open science

Etude du comportement hygrothermique des éco-matériaux à base de terre crue

Ichrak Hamrouni

► **To cite this version:**

Ichrak Hamrouni. Etude du comportement hygrothermique des éco-matériaux à base de terre crue. Génie civil. Normandie Université; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2023. Français. NNT : 2023NORMLH04 . tel-04463397

HAL Id: tel-04463397

<https://theses.hal.science/tel-04463397>

Submitted on 17 Feb 2024

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.



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité GENIE CIVIL

Préparée au sein de l'Université Le Havre Normandie

**En cotutelle internationale avec ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TUNIS ,
TUNISIE**

**Etude du comportement hygrothermique des éco-matériaux à
base de terre crue**

**Présentée et soutenue par
ICHRAK HAMROUNI**

**Thèse soutenue le 16/02/2023
devant le jury composé de**

M. NAJIB BEN JAMAA	PROFESSOR, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS GABES	Rapporteur du jury
M. MOHAMED BOUTOUIL	DIRECTEUR DE RECHERCHE, BUILDERS ECOLE D'INGENIEURS CAEN	Rapporteur du jury
MME HOUDA GUIRAS SKANDAJI	ASSISTANT PROFESSOR, ISET NABEUL	Membre du jury
M. MEHREZ JAMEI	PROFESSOR, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TUNIS	Membre du jury Co-encadrant
M. TARIQ OUAHBI	MAÎTRE DE CONFERENCES (HDR), Université Le Havre Normandie	Membre du jury Co-encadrant
M. JEAN-MARIE FLEUREAU	PROFESSEUR DES UNIVERSITES EMERITE, CENTRALESUPELEC GIF SUR YVETTE	Président du jury
M. SAÏD TAÏBI	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Le Havre Normandie	Directeur de thèse
M. HATEM ZENZRI	PROFESSOR, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TUNIS	Co-directeur de thèse

Thèse dirigée par SAÏD TAÏBI (Laboratoire Ondes et Milieux Complexes) et HATEM ZENZRI (ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TUNIS)



LABORATOIRE ONDES
et MILIEUX COMPLEXES

Résumé

Pour répondre aux défis environnementaux et énergétiques, construire durable devient une nécessité. La construction durable requière l'utilisation de matériaux de construction à faible impact environnemental. Aujourd'hui, les chercheurs sont appelés à trouver des solutions afin de réduire la consommation d'énergie dans la construction et améliorer le confort hygrothermique des bâtiments tout au long de leur durée de vie. La terre crue est l'un des matériaux permettant de relever ce défi. Elle constitue une alternative comme matériau de construction non énergivore en termes d'énergie grise, présentant des performances mécaniques et hygrothermiques remarquables. L'objectif de cette étude est de contribuer à une meilleure compréhension du comportement hygrométrique, thermique et couplé hygrothermique des matériaux biosourcés à base de terre crue compactés et renforcés avec des fibres végétales. Pour cela, un programme expérimental a été élaboré afin d'étudier les propriétés hygrométrique et thermique de ces matériaux en évaluant l'impact de plusieurs paramètres tels que la température, la teneur en eau, la densité, le taux de fibres, etc. De plus, un dispositif prototype de couplage hygrothermique a été développé au sein du laboratoire permettant d'analyser leurs comportements vis-à-vis des transferts couplés de chaleur et d'humidité. En outre, une modélisation numérique de ces phénomènes a été menée selon deux approches : la première est basée sur le modèle de couplage hygrothermique de Künzel, et la seconde repose sur la théorie de l'homogénéisation périodique. La comparaison des résultats expérimentaux et numériques montre un bon accord entre ces résultats.

Mots-clés : Terre crue, matériaux biosourcés, hygrothermie, approche expérimentale, modélisation numérique, modèle de Künzel, théorie d'homogénéisation.

Abstract

In order to face the environmental and energy challenges, sustainable construction is one of the possible solutions. Sustainable construction requires the use of building materials with low environmental impact. Today, researchers are called upon to find solutions to reduce energy consumption in construction and to improve the hygrothermal comfort of buildings throughout their lifetime. Raw earth is considered as one of the materials to accomplish this challenge. It is an alternative building material that does not consume energy in terms of grey energy, with remarkable mechanical and hygrothermal performances. The objective of this study is to contribute to a better understanding of the hygrometric, thermal and coupled hygrothermal behavior of biosourced materials based on compacted raw earth reinforced with vegetal fibers. For this purpose, an experimental program was developed to study the hygric and thermal properties of these materials by assessing the impact of several parameters such as temperature, water content, density, fiber content, etc. In addition, a prototype hygrothermal coupling device was developed in the laboratory to analyze their behavior regarding coupled heat and moisture transfers. Furthermore, a numerical modeling of these phenomena was approached according to two approaches: the first based on the hygrothermal coupling model, and the second deals with the theory of periodic homogenization. The comparison of the experimental and numerical results shows a good agreement.

Key-words: Raw earth, bio-based materials, hygrothermal, experimental study, numerical study, Künzel model, homogenization theory.

Table des matières

I. 1 Introduction.....	6
I. 2 Construction en terre crue	7
I. 2. 2 Confort hygrothermique.....	7
I. 2.3 Techniques de construction en terre crue.....	8
I. 2. 3. 1 <i>Techniques de construction en terre compactée</i>	8
I. 2. 4 Exemples de construction en terre crue dans le monde	11
I. 2. 4. 1 <i>En Asie</i>	12
I. 2. 4. 2 <i>En Europe</i>	12
I. 2. 4. 3 <i>En Afrique</i>	13
I. 3 Transfert thermique	13
I. 3. 1 Modes de transfert thermique dans les matériaux poreux.....	13
I. 3. 1. 1 <i>La conduction thermique</i>	14
I. 3. 1. 2 <i>Le rayonnement thermique</i>	14
I. 3. 1. 3 <i>La convection thermique</i>	15
I. 3. 2 Techniques expérimentales de mesure de transfert thermique.....	15
I. 3. 2. 1 <i>Méthode de la boîte chaude</i>	15
I. 3. 2. 2 <i>Boîtier KD2 Pro</i>	17
I. 3. 2. 3 <i>Méthode de mesure par le « Hot Disk »</i>	17
I. 4 Transfert hygrométrique	17
I. 4. 1 Hygrométrie dans les matériaux poreux	18
I. 4. 2 Transfert hygrométrique sous forme vapeur d'eau	18
I. 4. 3 Mécanismes de transfert hygrométrique	19
I. 4. 4 Transfert hygrométrique sous forme eau liquide	20
I. 4. 5 Techniques expérimentales de mesure de transfert de vapeur d'eau	20
I. 4. 5. 1 <i>Méthode de la coupelle</i>	20
I. 4. 5. 2 <i>Appareil Gravitest 6400</i>	21
I. 4. 5. 3 <i>Isothermes d'adsorption/désorption</i>	22

I. 5 Transferts couplés hygrothermiques.....	25
I. 5. 1 Transferts couplés hygrothermiques dans les matériaux poreux.....	25
I. 5. 2 Techniques expérimentales de mesure des transferts couplés hygrothermiques.....	26
I. 5. 2. 1 A l'échelle du matériau	26
I. 5. 2. 2 A l'échelle d'une paroi.....	28
I. 5. 3 Modélisations numériques des transferts couplés hygrothermiques	31
I. 5. 3. 1 Modélisation phénoménologique	31
I. 5. 3. 2 Théorie d'homogénéisation.....	35
I. 6 Transferts hygrothermiques dans les matériaux bio-sourcés	38
I. 6. 1 Terre crue	38
I. 6. 2 Fibres végétales.....	42
I. 6. 3 Transferts hygrothermiques dans les matériaux composites terre crue-fibres végétales	46
I. 6. 3. 1 Transferts hygrométriques et thermiques.....	46
I. 6. 3. 2 Transferts couplés hygrothermiques	49
I. 7 Conclusion	51
II. 1 Introduction	56
II. 2 Matériaux.....	56
II. 2. 1 Matrice minérale : Limon Gonfreville l'Orcher (GO).....	56
II. 2. 2 Fibres végétales : Fibres de lin	58
II. 2. 3 Caractérisation physique du limon GO.....	58
II. 2. 3. 1 Limites d'Atterberg.....	58
II. 2. 3. 2 Essai bleu de méthylène (NF P 94-068)	60
II. 2. 3. 3 Mesure de la succion à l'aide du papier filtre Whatman 42.....	60
II. 2. 3. 4 Essai pesée au Kerdane	61
II. 3 Confection des échantillons	63
II. 3. 1 Fibres de lin	63
II. 3. 2 Terre crue : Limon GO	64
II. 3. 3 Matériau composite limon-fibres de lin.....	64
II. 3. 3. 1 Limon- fibres de lin aléatoires.....	64

II. 3. 3. 2 Limon - fibres de lin disposées en lits transversaux	65
II. 3. 3. 3 Limon - fibres de lin disposées en fagots longitudinaux	65
II. 4 Méthodes et protocoles expérimentaux	67
II. 4. 1 Caractérisation hygrométrique.....	67
II. 4. 1. 1 Détermination des Isothermes d'adsorption/désorption.....	67
II. 4. 1. 2 Mesure de la perméabilité à la vapeur	68
II. 4. 2 Caractérisation thermique	72
II. 4. 2. 1 Dispositif de mesure en régime transitoire : système « Tempos Meter »	72
II. 4. 2. 2 Dispositif de mesure de la résistance thermique en régime stationnaire	75
II. 5 Conclusion.....	77
III. 1 Introduction.....	80
III. 2 Fibres de lin	80
III. 2. 1 Propriétés hygrométriques.....	80
III. 2. 1. 1 Isothermes d'adsorption-désorption.....	80
III. 2. 2 Propriétés thermiques	83
III. 2. 2. 1 Dispositif « Tempos Meter » de mesure de la conductivité thermique en régime transitoire	83
III. 2. 2. 2 Dispositif « Mesure de la conductivité thermique » en régime permanent	88
III. 3 Limon GO.....	91
III. 3. 1 Propriétés hygrométriques.....	91
III. 3. 1. 1 Isothermes d'adsorption/désorption.....	91
III. 3. 1. 2 Perméabilité à la vapeur d'eau	95
III. 3. 2 Propriétés thermiques	104
III. 3. 2. 1 Conductivité thermique	104
III. 3. 2. 2 Capacité thermique	107
III. 3. 2. 3 Diffusivité thermique	108
III. 4 Matériau composite limon - fibres de lin	109
III. 4. 1 Propriétés hygrométriques.....	109
III. 4. 1. 1 Isothermes d'adsorption/désorption.....	109

III. 4. 1. 2 Perméabilité à la vapeur d'eau	112
III. 4. 2 Propriétés thermiques	115
III. 4. 2. 1 Conductivité thermique	115
III. 4. 2. 2 Capacité thermique	119
III. 5 Conclusion	122
IV. 1 Introduction.....	126
IV. 2 Dispositif expérimental prototype de couplage hygrothermique.....	126
IV. 2. 1 Description du dispositif	126
IV. 2. 2 Principe de mesure	130
IV. 3 Essais préliminaires	131
IV. 3. 1 Transfert thermique.....	131
IV. 3. 1. 1 Hypothèses.....	131
IV. 3. 1. 2 Evaluation du coefficient de déperdition thermique du dispositif de couplage.....	132
IV. 3. 1. 3 Essais sur un matériau de référence : béton de terre « Cématerre »	133
IV. 3. 1. 4 Essais d'étalonnage avec le Plâtre plein.....	135
IV. 3. 2 Transfert hygrométrique.....	136
IV. 3. 3 Transferts couplés hygrothermiques	137
IV. 3. 3. 1 Calibration des capteurs SHT40	137
IV. 3. 3. 2 Essai préliminaire de transferts couplés hygrothermiques	138
IV. 3. 3. 3 Résultats et discussions.....	140
IV. 4 Transferts couplés hygrothermiques dans la terre crue.....	142
IV. 4. 1 Essai n°1	142
IV. 4. 2 Résultats et discussions (Essai n°1)	143
IV. 4. 3 Essai n°2.....	146
IV. 4. 3 Résultats et discussions (Essai n°2)	147
IV. 5 Conclusion	151
V. 1 Introduction	154
V.2 Choix du modèle de Künzel.....	154
V.3 Validation du modèle de Künzel	156

V. 3. 1 Benchmark de simulations mathématiques de transferts hygrothermiques	156
V. 3. 2 Transferts couplés hygrothermiques dans des matériaux de construction [Driss, 2008].....	159
V.4 Prédiction des transferts hygrothermiques à travers des échantillons à base de terre crue	161
V. 4. 1 Modélisation de l'essai expérimental N°1	164
V. 4. 1. 1 Configuration n°1	164
V. 4. 1. 2 Configuration n°2	166
V. 4. 2 Modélisation de l'essai expérimental N°2.....	168
V. 4. 2. 1 Configuration n°1	168
V. 4. 2. 2 Configuration n°2	170
V.5 Etude comparative du comportement hygrothermique du limon GO compacté et du béton de ciment	171
V.6 Conclusion	174
VI. 1 Introduction	178
VI. 2 Transfert de vapeur d'eau	179
VI. 2. 1 Hypothèses du problème	179
VI. 2. 2 Equation de transfert de vapeur d'eau.....	181
VI. 2. 3 Formulation du problème	182
VI. 2. 4 Analyse adimensionnelle.....	182
VI. 2. 5 Développement asymptotique	183
VI. 2. 6 Résolution du problème local.....	186
VI. 3 Transfert d'eau liquide	188
VI. 3. 1 Hypothèses	188
VI. 3. 2 Formulation du problème	189
VI. 4 Transfert thermique	190
VI. 4. 1 Hypothèses du problème	190
VI. 4. 2 Formulation du problème	191
VI. 5 Validation des résultats de la modélisation par homogénéisation	192
VI. 6 Conclusion	194

Liste des figures

Figure I. 1 : (a) et (b) Construction d'un mur en pisé fini, (c) Exemple d'un mur en pisé (d) préfabrication de panneaux de pisé en atelier et (d) assemblage de panneaux de pisé préfabriqué sur chantier [Hibouche, 2013].....	9
Figure I. 2 : Briques en terre comprimée (http://economie.paysmellois.org/)	9
Figure I. 3: (a) Préparation des adobes, (b) Exemple d'un mur en adobe	10
Figure I. 4 : Construction d'un mur en torchis [Duperron & Roux, 2018].....	10
Figure I. 5: Mur en terre coulée	11
Figure I. 6 : Utilisation de la terre crue dans le monde (Source : http://craterre.org/).....	11
Figure I. 7: (a) Mur en béton de terre "Cématerre" après décoffrage, (b) Vue d'une façade du bâtiment prototype fini [Hibouche, 2013 ; Eid, 2016]	12
Figure I. 8 : Réalisations de la société SOIB (https://soib72.site123.me)	13
Figure I. 9: Dispositif expérimental pour la mesure de la conductivité thermique en régime permanent [Saidi, 2018].....	16
Figure I. 10 : Boîtier KD2 Pro [Hibouche, 2013].....	17
Figure I. 11: Méthode de mesure par le « Hot Disk » [Zhang et al., 2018]	17
Figure I. 12 : Dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur par la méthode de la coupelle [Hibouche, 2013]	21
Figure I. 13 : (a) Dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur Gravitest, (b) Schéma descriptif de l'intérieur du Gravitest et (c) Plateau tournant contenant les six coupelles [Ferroukhi, 2016]	22
Figure I. 14 : Diagramme schématique d'une courbe d'isotherme d'adsorption et désorption [Piot, 2009, Bennai, 2017].....	23
Figure I. 15 : Classification des isothermes d'adsorption donnée par l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)	24
Figure I. 16 : Dispositif de couplage hygrothermique développé au laboratoire et (b) Schéma explicatif du dispositif [Ferroukhi, 2016]	27
Figure I. 17 : Dispositif de couplage hygrothermique [Qin et al., 2007]	28
Figure I. 18 : Enceintes climatiques de couplage hygrothermique [Collet & Prerot, 2014]	28
Figure I. 19 : Enceintes climatiques de couplage hygrothermique [Abbas, 2021]	30
Figure I. 20 : Bâtiment test construit en briques de terre crue [El Fgaier, 2013]	30
Figure I. 21 : Bâtiment R+1 prototype en béton de terre « Cématerre » [Hibouche, 2013]	31
Figure I. 22 : Principe de la théorie d'homogénéisation	35
Figure I. 23 : Microstructure composé de plusieurs volumes élémentaires répétitifs [Mchirgui, 2012]	37
Figure I. 24 : Courbes granulométriques des briques de terre crue étudiées.....	39

Figure I. 25 : Courbes d'évolution de la perméabilité à la vapeur en fonction : (a) porosité ouverte, (b) densité apparente	39
Figure I. 26 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de degré de saturation du matériau [Cagnon et al., 2014]	41
Figure I. 27 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau [Medjelekh et al., 2017]	41
Figure I. 28 : Evolution de la conductivité en fonction de la densité [Ben Mansour et al., 2016]	42
Figure I. 29 : Evolution de la conductivité en fonction de la densité [Zhang et al., 2018]	42
Figure I. 30 : Banc de mesure de la perméabilité à la vapeur de la laine de chanvre [Collet, 2004]	43
Figure I. 31 : Isothermes d'adsorption des pailles de lin et de blé [Phung, 2018]	44
Figure I. 32 : Evolution de la conductivité thermique des fibres de lin et de chanvre en fonction de la densité [Vaikus et al., 2014]	45
Figure I. 33 : Mesure de la conductivité thermique de fibres d'Alfa - Thermolab II [Dallel, 2012].	45
Figure I. 34 : Corrélation linéaire entre les résultats expérimentaux et numériques de la perméabilité à la vapeur de la terre crue renforcée par les fibres de paille [Casnedi et al., 2020]	46
Figure I. 35 : (a) Variation de la densité sèche du matériau composite en fonction de la teneur en fibres, (b) Variation de la conductivité thermiques en fonction de la densité sèche [Laurent, 1986]	47
Figure I. 36 : Variation de la conductivité thermique du béton de terre en fonction de la teneur en eau (a) à l'aide de la boîte chaude, (b) à l'aide du boitier KD2 Pro [Hibouche, 2013].....	48
Figure I. 37 : (a) Enceintes climatiques pour la caractérisation hygrothermique du mur en pisé, (b) Profils expérimentaux et numérique de l'humidité relative et la température en fonction du temps [Soudani, 2016]	50
Figure II. 1: Limon GO naturel.....	56
Figure II. 2: Courbe granulométrique du limon GO [Hibouche, 2013].....	57
Figure II. 3: Fibres de lin de 7cm de longueur.....	58
Figure II. 4: (a) Boîte de Casagrande, (b) Courbe de variation de la teneur en eau en fonction de nombre de chocs [Hibouche, 2013].....	59
Figure II. 5: (a) Pénétromètre de plasticité « Cône de pénétration », (b) Courbe de variation de la profondeur de pénétration du cône en fonction de la teneur en eau [Hibouche, 2013].....	59
Figure II. 6: Différentes étapes de l'essai de mesure de la succion par la méthode du papier filtre Whatman 42 (a) insertion du papier filtre dans le sol ; (b) assemblage du « sandwich » sol-papier filtre et (c) enveloppe de cellophane étanche durant le temps d'équilibre hydrique sol-papier filtre	60

Figure II. 7: Courbe de calibrage succion/teneur en eau du papier filtre Whatman 42 selon ASTM (2003, D 5298-03)	61
Figure II. 8: Les différentes étapes de l'essai de pesée immergée dans du Kerdane : (a) Préparation des échantillons de dimensions 1x1 cm ² , (b) Pesée du poids humide de l'échantillon (P_h), (c) Immersion des échantillons dans l'huile de Kerdane, (d) Essuyage des échantillons à l'aide d'un papier absorbant, (e) Pesée du poids humide + Kerdane ($P_{h+kerdane}$), (f) Pesée du poids immergé (P_{imm}), (g) Echantillon après passage à l'étuve et (h) Pesée du poids sec des échantillons.....	62
Figure II. 9 : (a) Schéma du limon mélangé à l'eau et versé dans un moule Proctor, (b) Schéma du compactage de l'échantillon à l'aide d'une presse statique.....	64
Figure II. 10: Essai de détermination des isothermes d'adsorption/désorption par la méthode gravimétrique.....	68
Figure II. 11: Méthode de la coupelle pour la mesure de perméabilité à la vapeur des matériaux terre	70
Figure II. 12: Méthode de la coupelle pour la mesure de perméabilité à la vapeur des fibres de lin...	70
Figure II. 13: Dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur Gravitest.....	71
Figure II. 14: Plateau tournant et coupelles - Gravitest.....	71
Figure II. 15: Dispositif de mesure de la conductivité thermique « Tempos Meter »	72
Figure II. 16: Les différents composants des sondes du dispositif « Tempos Meter »	72
Figure II. 17: Evolution de la température en fonction du temps - Résultat de dispositif « Tempos Meter » [Hibouche, 2013].....	75
Figure II. 18: Les durées des différentes étapes de mesure des propriétés thermiques à l'aide de « Tempos Meter ».....	75
Figure II. 19 : Dispositif de mesure de la conductivité thermique « Plaque chaude gardée » en régime permanent.....	76
Figure III. 1: Essai d'isotherme d'adsorption des fibres de lin.....	80
Figure III. 2: Isotherme d'adsorption des fibres de lin, (a) en fonction de la teneur en eau pondérale et (b) en fonction de la teneur en eau massique	82
Figure III. 3 : Evolution de la perméabilité à la vapeur des fibres de lin en fonction de leurs densités et directions	83
Figure III. 4 : Essai de mesure des propriétés thermiques des fibres de lin.....	84
Figure III. 5 : Evolution de la conductivité thermique des fibres de lin en arrangement aléatoire en fonction de la température et la densité.....	85
Figure III. 6 : Evolution de la conductivité thermique des fibres de lin en arrangement transversal en fonction de la température et la densité	86
Figure III. 7: Evolution de la conductivité thermique du polystyrène en fonction de la température [Khoukhi et al., 2018].....	86

Figure III. 8: Comparaison des résultats de conductivité thermique des fibres aléatoires et transversales pour les différentes densités : (a) 100 kg/m ³ , (b) 200 kg/m ³ , (c) 300 kg/m ³ et (d) 400 kg/m ³	87
Figure III. 9 : Evolution de la capacité thermique des fibres de lin en arrangement aléatoire (a) et transversal (b) en fonction de la température et la densité	88
Figure III. 10: Conductivité thermique de fibre de lin en fonction de la densité.....	89
Figure III. 11: Superposition des résultats des deux dispositifs « Tempos Meter » et « Dispositif de mesure de la résistance thermique »	90
Figure III. 12: Evolution de la conductivité thermique de fibres de bambou en fonction de la densité et de l'humidité relative (Huang et al., 2018)	90
Figure III. 13: Evolution de la conductivité thermique de fibres des fibres de lin et de chanvre en fonction de la densité (Vaitkus, 2014).....	91
Figure III. 14: Essai d'isotherme d'adsorption des fibres de lin.....	92
Figure III. 15: Isothermes d'adsorption/désorption de la terre crue : (a) en teneur en eau (%) et (b) en teneur en eau massique (kg/m ³).....	94
Figure III. 16: Les courbes des différents paramètres physiques du limon	94
Figure III. 17: Isotherme d'adsorption/désorption du sable – limoneux (Fabbri & Morel., 2016).....	95
Figure III. 18: Courbes d'isothermes de désorption de la terre-fibres de lin et de paille pour les deux types de sol A et B respectivement (Phung, 2018).....	95
Figure III. 19: Courbes des variations des masses de vapeur d'eau : (a) Coupelle sèche et (b) coupelle humide	97
Figure III. 20: Superposition des résultats de transfert de vapeur - Coupelle sèche/humide.....	97
Figure III. 21: Résultats de mesure de la perméabilité à la vapeur du béton de chanvre par les coupelles sèche et humide [Bennai, 2017]	98
Figure III. 22: Echantillons en différentes teneurs en eau pour l'essai de mesure de la perméabilité à la vapeur à l'aide de « Gravitest »	99
Figure III. 23: (a) Evolution de la masse de vapeur d'eau en fonction du temps et (b) Evolution de la perméabilité à la vapeur en fonction du temps	101
Figure III. 24: Evolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau	101
Figure III. 25: Récapitulatif des résultats montrant l'effet de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux de construction	102
Figure III. 26: Courbe de variation de la masse de vapeur échangée durant l'essai en fonction du temps	103
Figure III. 27: Mesure de la conductivité thermique de la terre crue à l'aide du dispositif « Tempos Meter »	105
Figure III. 28: Conductivité thermique de la terre crue en fonction : (a) de la teneur en eau et (b) du degré de saturation.....	106
Figure III. 29 : Conductivité thermique de l'eau et de l'air sec en fonction de la température	106

Figure III. 30 : Evolution de la conductivité thermique du béton de ciment en fonction du degré de saturation [Zhang et al., 2018].....	107
Figure III. 31 : (a) et (b) Evolutions de la capacité thermique en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation respectivement	108
Figure III. 32: Evolution de la capacité thermique massique en fonction de la teneur en eau massique des différents matériaux de la littérature [Abbas, 2021]	108
Figure III. 33: (a) et (b) Courbes d'évolutions de la capacité thermique en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation respectivement.....	109
Figure III. 34: Isothermes d'adsorption/désorption du limon-fibres de lin : (a) en teneur en eau (%) et (b) en teneur en eau massique	111
Figure III. 35: Les courbes des différents paramètres physiques du limon mélangé avec 1% de fibres de lin.....	112
Figure III. 36: Evolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de pourcentage des fibres de lin en arrangement aléatoire et transversal	113
Figure III. 37: Evolution de la perméabilité à la vapeur du matériau composite limon-fibres de lin en arrangement transversal et aléatoire	114
Figure III. 38: Mesure de la conductivité thermique de la terre crue-fibres de lin à l'aide du dispositif « Tempos Meter ».....	116
Figure III. 39: Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau volumétrique [Taoukil et al., 2013]	116
Figure III. 40: Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau volumétrique [Brouard, Belayachi, Hoxha, et al., 2017].....	116
Figure III. 41: Evolution de la conductivité thermique du limon-fibres de lin en fonction du degré de saturation	117
Figure III. 42: Evolution de la conductivité thermique en fonction de degré de saturation [Abbas, 2021]	118
Figure III. 43: Effet de la teneur en eau et du taux de fibres sur la conductivité thermique [Phung, 2018]	119
Figure III. 44: Evolution de la capacité thermique du limon-fibres de lin en fonction de la teneur en eau (a) et du degré de saturation (b).....	120
Figure III. 45: Evolution de la diffusivité thermique du limon-fibres de lin en fonction de la teneur en eau (a) et de degré de saturation (b) respectivement	121
Figure IV. 1: (a) et (b) sont respectivement un schéma descriptif et une photo réelle du dispositif de couplage hygrothermique	128
Figure IV. 2 : Sonde de mesure de l'humidité relative des type "AVIOSYS"	129
Figure IV. 3: Capteur hygrothermique SHT40 et son boîtier d'acquisition de type « Sensirion »....	129
Figure IV. 4: Capteur SHT40 et son protecteur contre la condensation d'eau liquide	129

Figure IV. 5: Principe de l'essai d'étalonnage thermique en régime permanent.....	131
Figure IV. 6: Profils de températures mesurés pour l'évaluation du coefficient de déperdition thermique	132
Figure IV. 7: Essai de transfert de chaleur en régime permanent à travers le béton de terre « Cématère » de dimensions 270×270×60 mm ³	133
Figure IV. 8: Profils des températures en fonction du temps pour une température chaude fixée à $T_c = 35\text{ °C}$ et $T_f = 17\text{ °C}$	134
Figure IV. 9: Evolution des températures en fonction du temps pour une température chaude fixée à $T_c = 53\text{ °C}$ et $T_f = 19\text{ °C}$	134
Figure IV. 10: Essai de transfert thermique à travers le plâtre plein à l'aide du dispositif de couplage	135
Figure IV. 11 : Echantillon de « Cématère » pour l'essai de transfert de vapeur d'eau	136
Figure IV. 12 : Evolution de la masse de vapeur d'eau échangée en fonction du temps.....	137
Figure IV. 13: Capteur SHT40 insérés dans l'échantillon de terre	138
Figure IV. 14: Profils de température et humidité relative en fonction du temps à l'aide des capteurs SHT40	138
Figure IV. 15: (a) Essai de couplage hygrothermique en cours, (b) échantillon de terre utilisé pour l'essai et (c) dispositions des capteurs SHT40 dans l'échantillon.....	139
Figure IV. 16: Configuration expérimentale utilisée pour l'essai d'étalonnage	140
Figure IV. 17: Profils des humidités relatives en différentes positions en fonction du temps.....	141
Figure IV. 18: Profils des températures en différentes positions en fonction du temps.....	141
Figure IV. 19: Evolution de la masse de vapeur en fonction du temps.....	142
Figure IV. 20: Configuration expérimentale utilisée pour l'essai n°1 de couplage hygrothermique. 143	
Figure IV. 21: Evolution de l'humidité relative en différentes positions en fonction du temps (Essai n°1).....	144
Figure IV. 22: Evolution de la température en différentes positions en fonction du temps (Essai n°1)	144
Figure IV. 23: Evolution de l'humidité relative à travers l'épaisseur de l'échantillon pour différents jours (Essai n°1).....	145
Figure IV. 24: Evolution de la température à travers l'épaisseur de l'échantillon pour différents jours (Essai n°1).....	146
Figure IV. 25: Evolution de la masse de vapeur d'eau emmagasinée dans l'échantillon en fonction du temps (Essai n°1).....	146
Figure IV. 26: Evolution de la quantité de chaleur emmagasinée dans l'échantillon en fonction du temps (Essai n°1).....	146
Figure IV. 27: Configuration expérimentale utilisée pour l'essai n°2 de couplage hygrothermique. 147	

Figure IV. 28: Evolution de l'humidité relative en différentes positions en fonction du temps (Essai n°2).....	148
Figure IV. 29: Evolution de la température en différentes positions en fonction du temps (Essai n°2)	148
Figure IV. 30: Evolution de l'humidité relative à travers l'épaisseur de l'échantillon pour différents jours (Essai n°2)	149
Figure IV. 31: Evolution de la température à travers l'épaisseur de l'échantillon pour différents jours (Essai n°2)	149
Figure IV. 32: Evolution de la masse de vapeur d'eau emmagasinée dans l'échantillon en fonction du temps (Essai n°2).....	150
Figure IV. 33: Evolution de la quantité de chaleur emmagasinée dans l'échantillon en fonction du temps (Essai n°2)	150
Figure IV. 34: Variation de la masse de vapeur d'eau échangée en fonction du temps (Essai n°2)..	151
Figure V. 1 : Schéma représentatif du cas n°2 de Benchmark	157
Figure V.2 : Profils de la teneur en eau massique à différentes périodes de transfert hygrothermique (100h, 300h et 1000h)	158
Figure V.3: Essai expérimental de transferts couplés hygrothermiques à travers une paroi en béton de chanvre HLC 30 cm [Driss, 2008]	159
Figure V. 4: Températures aux points B et D mesurées expérimentalement pendant 144 heures [Driss, 2008].....	160
Figure V. 5: Humidité relative mesurée expérimentalement au point D pendant 96 heures [Driss, 2008]	160
Figure V. 6: Comparaison des profils numériques de variation de la température au point C pendant 48 heures	161
Figure V. 7: Comparaison des profils numériques de variation d'humidité relative au point C pendant 96 heures	161
Figure V. 8 : Modèle 1D équivalent.....	162
Figure V. 9: Calage de la fonction mathématique sur la courbe d'isotherme d'adsorption expérimentale	163
Figure V. 10: Configuration numérique n°1	163
Figure V. 11: Configuration numérique n°2	164
Figure V. 12: Comparaison de l'humidité relative à l'intérieur de l'échantillon (point C) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°1 – Essai n°1).....	165
Figure V. 13: Comparaison de la température à l'intérieur de l'échantillon (point C) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°1 – Essai n°1).....	165
Figure V. 14: Profils instantanés de HR le long de l'épaisseur de l'échantillon (Configuration n°1 – Essai n°1).....	166

Figure V. 15: Profils instantanés de T le long de l'épaisseur de l'échantillon (Configuration n°1 – Essai n°1)	166
Figure V. 16: Comparaison de l'humidité relative (aux points C et D) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°2 – Modèle n°1).....	167
Figure V. 17: Comparaison de la température (aux points C et D) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°2 – Modèle n°1).....	167
Figure V. 18: Profils instantanés de HR le long de l'épaisseur de l'échantillon (Configuration n°2 – Modèle n°1).....	168
Figure V. 19: Profils instantanés de T le long de l'épaisseur de l'échantillon (Configuration n°2 – Modèle n°1).....	168
Figure V. 20: Comparaison de l'humidité relative à l'intérieur de l'échantillon (point C) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°1 - Modèle n°2)	169
Figure V. 21: Comparaison de température à l'intérieur de l'échantillon (point C) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°1 - Modèle n°2).....	169
Figure V. 22 : Comparaison de l'humidité relative (aux points C et D) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°2 – Modèle n°2).....	170
Figure V. 23: Comparaison de la température (aux points C et D) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°2 – Modèle n°2).....	171
Figure V. 24: Isotherme d'adsorption du béton de ciment (base de données du code WUFI) [Hibouche, 2013].....	172
Figure V. 25: Comparaison des profils de HR du limon GO et du béton de ciment.....	172
Figure V. 26: Comparaison des profils de T du limon GO et du béton de ciment.....	173
Figure V. 27: Comparaison de l'évolution des flux de vapeur d'eau du limon GO et du béton de ciment en fonction du temps	173
Figure V. 28: Comparaison de l'évolution des flux de chaleur du limon GO et du béton de ciment en fonction du temps	174
Figure VI. 1: (a) et (b) sont respectivement le modèle 2D et 3D de la terre renforcée avec des fagots longitudinaux de fibres de lin.....	180
Figure VI. 2 : VER limon-fagot de fibres de lin de dimensions 20×30×12 mm ³	187
Figure VI. 3 : Evolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de pourcentage des fibres de lin en arrangement longitudinal.....	193
Figure VI. 4 : Comparaison des résultats expérimentaux – numériques.....	194

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Consommation énergétique de quelques matériaux de construction [Morel et al., 2001]	7
Tableau I. 2 : Différents mécanismes de transfert de la vapeur d'eau [Künzel, 1995].....	19
Tableau I. 3 : Comparaison entre les modèles de transferts couplés hygrothermiques [Abbas, 2021]	34
Tableau I. 4 : Propriétés hygrométrique et thermique de pise [Allinson et Hall, 2012]	49
Tableau I. 5 : Propriétés hygrothermiques des matériaux de construction à base de terre crue	52
Tableau II. 1 : Tableau des caractéristiques granulométriques du limon GO [Hibouche, 2013].....	57
Tableau II. 2 : Propriétés mécaniques des fibres de lin [Eid et al., 2015 ; El Hajjar et al., 2021]	58
Tableau II. 3 : Formules de calcul de la succion du papier filtre Whatman 42 en fonction de la teneur en eau selon ASTM (2003, D 5298-03)	61
Tableau II. 4 : Formules des caractéristiques physiques déduites de l'essai de Kerdane	63
Tableau II. 5 : Différents échantillons préparés pour les essais de transferts hygrothermiques	65
Tableau II. 6 : Tableau des sels pour imposer une humidité relative (Ghembaza, 2004).....	68
Tableau II. 7 : Caractéristiques des sondes du dispositif « Tempos Meter ».....	73
Tableau III. 1 : Conditions climatiques en humidité et température pour les essais coupelles sèche/humide	96
Tableau III. 2 : Résultats de l'essai de mesure de la perméabilité à la vapeur	97
Tableau III. 3 : Valeurs expérimentales de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre pour différents gradients d'humidité [Chamoin, 2013]	99
Tableau III. 4 : Propriétés physiques des échantillons de Limon GO en différentes teneurs en eau.	100
Tableau III. 5 : Propriétés physiques du limon GO pour les essais de transfert de vapeur d'eau	103
Tableau III. 6 : Perméabilité à la vapeur d'eau de la terre crue compactée	104
Tableau III. 7 : Perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux de construction traditionnel [Hibouche, 2013].....	104
Tableau III. 8 : Propriétés physiques des échantillons de limon GO - fibres de lin	10413
Tableau III. 9 : Perméabilité à la vapeur des matériaux fibrés à base de terre crue de la littérature .	115
Tableau III. 10 : Conductivité thermique des matériaux à base de terre de la littérature	120
Tableau III. 11 : Conductivité thermique de béton de ciment en fonction de la teneur en eau	122
Tableau IV. 1 : Caractéristiques techniques du capteur SHT40	129
Tableau IV. 2 : Tableau des températures en régime permanent.....	132
Tableau IV. 3 : Caractéristiques physiques et thermique du béton de terre « Cématerre » [Hibouche, 2013].....	133

Tableau IV. 4 : Tableau des températures en régime permanent.....	133
Tableau IV. 5 : Tableau récapitulatif des résultats des essais préliminaires sur le « Cématerre ».....	135
Tableau IV. 6 : Tableau récapitulatif des résultats des essais de transfert thermique pour le plâtre plein.....	135
Tableau IV. 7 : Perméabilité à la vapeur d'eau du « Cématerre »	136
Tableau IV. 8 : Propriétés physiques de l'échantillon du limon GO.....	139
Tableau V. 1 : Propriétés du matériau de benchmark cas n°2 [Dong et al., 2020]	157
Tableau V. 2 : Propriétés du béton de chanvre [Driss, 2008]	160
Tableau V. 3 : Propriétés du limon GO pour le modèle de Künzel	162
Tableau V. 4 : Constantes de l'équation d'isotherme d'adsorption	162
Tableau V. 5 : Caractéristiques du béton de ciment [Hibouche, 2013]	171
Tableau VI. 1 : Propriétés physiques des échantillons de limon-fagots de fibres longitudinales.....	192

Introduction générale

Depuis des millénaires, les civilisations humaines ont eu recours à la terre crue comme un matériau de construction de base. L'avantage de ce matériau est qu'il est naturel, écologique, environnemental, économique, disponible partout et en grandes quantités. La terre peut être compactée, mélangée avec des fibres végétales ou avec des liants biosourcés afin d'améliorer son comportement mécanique et hygrothermique. Elle peut être façonnée en plusieurs formes : pisé, torchis, adobe, béton coulé ou encore en briques de terre comprimée. La terre crue a servi à la construction de grands ouvrages tels que les premiers « gratte-ciels » au monde à Shibam au Yémen datant du XVI^e siècle. Ils sont en briques de terre crue, composés de huit étages et font 30 m de hauteur.

La production des matériaux de construction traditionnels engendre le dégagement d'importantes quantités de CO₂ et consomme de grandes quantités d'énergie grise. Prenons l'exemple du béton de ciment, la production d'une tonne de ciment Portland engendre des émissions de 1,9 tonnes de CO₂ [Flower et Sanjayan, 2007]. L'extraction du sable et l'exploitation des carrières pour la production de gravier, ont un impact environnemental néfaste et nécessitent par ailleurs beaucoup d'énergie. Toutes ces raisons poussent les ingénieurs et les architectes à chercher des matériaux de constructions alternatifs.

Des matériaux tels que le bois, le béton de chanvre et la terre crue selon différents procédés de mise en œuvre, peuvent constituer cette alternative [Collet, 2004 ; Murphy et al., 2010 ; Szücs, 2018]. Les constructions en terre sont présentes dans de nombreux pays dans le monde. Selon le centre International de la Construction en terre, le tiers de la population mondiale vit dans des habitats en terre crue [Eid, 2016]. En ce qui concerne les pays en voie de développement, 50% de la population, en majorité rurale, et au moins 20 % de la population urbaine et périurbaine ont choisi la terre pour construire leurs maisons [Eid, 2016].

La terre crue représente aussi l'une des pistes d'avenir pour les matériaux de construction, notamment pour des ouvrages nécessitant des matériaux avec une résistance mécanique à la compression de l'ordre de 10 MPa. Dans ce contexte, plusieurs projets de construction en terre crue voient le jour, comme par exemple le Projet National Terre (PNTerre) dont l'objectif est de permettre à nouveau le déploiement, à grande échelle, de la construction en terre crue. Le

développement de la construction en terre crue passe aujourd'hui par la levée des multiples freins identifiés pour ce secteur, qu'ils soient culturels, socio-économiques, techniques, assurantiels ou réglementaires (<https://projet-national-terre.univ-gustave-eiffel.fr>).

Le choix d'un éco-matériau à base de terre crue doit remplir un cahier des charges précis concernant le comportement hydromécanique, la durabilité, la rigidité/ductilité, mais aussi des performances dans les transferts thermique et hygrométrique, autrement dit, son pouvoir régulateur température-humidité (ou transfert couplé hygro-thermique). Généralement, le modèle de la seule conduction thermique est insuffisant pour décrire les propriétés thermiques des matériaux de construction. Il existe en effet un couplage fort entre transfert de masse et transfert de chaleur.

De nombreux chercheurs se sont penchés sur l'étude des éco-matériaux à base de terre crue. Ils ont mis l'accent sur le comportement mécanique et hygrothermique d'une diversité de terres, caractérisées par différentes minéralogies, granulométries, plasticités, retraits, gonflements, etc. Ces études prennent aussi en considération les différentes techniques de façonnage de la terre : terre renforcée avec des fibres végétales, terre compactée, terre stabilisée avec des liants, etc. Ces études ont mis en évidence de nombreuses questions restant à éclaircir, notamment lorsqu'il s'agit de matériaux composites bio-sourcés à base de terre crue.

Les objectifs principaux de cette thèse sont doubles : une caractérisation expérimentale et une modélisation numérique du comportement thermique, hygrométrique et couplé hygrothermique d'un limon disponible en Normandie, renforcé à l'aide de fibres de lin, plante emblématique locale. Différentes techniques expérimentales permettant la détermination des propriétés hygrothermiques de la terre, des fibres et du matériau composite terre-fibres en prenant en compte différents paramètres comme le mode d'assemblage, l'humidité, le pourcentage de fibres, sont développées.

Ce manuscrit est structuré en six chapitres de la façon suivante :

Le chapitre I présente une synthèse bibliographique qui met l'accent d'abord sur le rôle majeur du secteur du bâtiment dans les émissions des gaz à effet de serre et la part importante de l'énergie consommée par ce secteur, ce qui a poussé les chercheurs à progresser dans la compréhension mécanique et hygrothermique des matériaux de construction biosourcés et constituer ainsi une alternative aux matériaux énergivores actuels. Ce chapitre aborde ensuite les différentes études numériques et expérimentales réalisées sur les transferts hygrothermiques

à différentes échelles dans les matériaux biosourcés en général et dans la terre crue et les fibres végétales en particulier.

Le chapitre II est dédié à la présentation des matériaux étudiés ainsi que les méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation hygrométrique et thermique du limon, des fibres de lin et du matériau composite limon-fibres de lin.

Le chapitre III est consacré aux résultats obtenus lors de la campagne expérimentale de la caractérisation hygrométrique et thermique à l'aide des dispositifs expérimentaux présentés dans le chapitre II, ainsi que leurs interprétations.

Le chapitre IV présente une description détaillée d'un dispositif expérimental prototype développé au laboratoire et dédié à l'étude des transferts couplés hygrothermiques des matériaux à base de terre. En outre, différents essais de référence relatifs aux transferts couplés à travers le limon ont été réalisés pour tester le bon fonctionnement du dispositif développé. Ces résultats serviront à la validation des modèles numériques.

Le chapitre V traite de la modélisation phénoménologique des transferts couplés hygrothermiques basée sur le modèle de Künzel. Dans un premier temps, des simulations numériques préliminaires basées sur des résultats de la littérature permettent de tester la bonne réponse du modèle. Par la suite, une modélisation des transferts couplés hygrothermiques du limon testé au chapitre IV est réalisée.

Le chapitre VI traite de la modélisation des transferts hygrothermiques à l'aide de la théorie de l'homogénéisation, basée sur l'obtention du comportement hygro-thermique macroscopique à partir des équations de transferts écrites à l'échelle microscopique (à l'échelle de fibres et de la terre). Les applications concernent les transferts de vapeur d'eau, d'eau liquide et de chaleur.

Une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus et l'apport de cette recherche, et certaines pistes permettant de progresser sur ce thème sont proposées en perspectives.

Chapitre I

*Etat de l'art sur les transferts
hygrothermiques dans les matériaux
poreux*

I. 1 Introduction

Aujourd'hui, les chercheurs aspirent à réduire la consommation d'énergie dans la construction et à améliorer le confort hygrothermique des bâtiments tout au long de leur durée de vie. La terre crue est considérée comme l'un des matériaux permettant de relever ce défi.

La terre est depuis longtemps un matériau de construction naturel très répandu à travers le monde. C'est un matériau disponible tout le temps et partout, écologique, économique et environnemental. On estime aujourd'hui que plus d'un tiers des maisons sur la planète sont construites en terre crue [Eid, 2016]. Le but principal de la construction des bâtiments en terre crue est de minimiser la consommation énergétique en assurant une bonne résistance structurelle et un confort hygrothermique aux usagers. Par ailleurs, les conditions de stabilité mécanique des éléments du bâtiment (closions ou autres), construits avec de la terre crue, ont été relativement investiguées. Les réponses sont plutôt encourageantes quant à son utilisation par compactage ou après traitement et renforcement [Eid, 2016 ; Hibouche, 2013 ; Allinson & Hall, 2012 ; Ben Ayed, 2016 ; Bodian, 2019]. En effet, afin d'avoir des propriétés mécaniques suffisantes pour les éléments du bâtiment construits avec de la terre crue, en plus du compactage à une énergie élevée ou à des efforts statiques équivalents importants, on a des fois recours à des additifs de minéraux comme le ciment ou la chaux ou au micro-renforcement par des fibres. Cependant peu d'études exhaustives existent sur le confort hygrothermique de ces matériaux en termes à la fois d'isolation thermique et d'échange d'humidité avec le milieu environnant. Le peu d'études publiées montrent que les propriétés hygrothermiques des matériaux de construction à base de terre sont remarquables, grâce à leur inertie élevée et leur faible porosité. Ainsi, ces matériaux emmagasinent la chaleur pendant les périodes chaudes et la restituent pendant les périodes froides. Par ailleurs, ils régulent l'humidité relative ambiante grâce à leur grand pouvoir respirant et d'emmagasinement.

Ce chapitre présente, dans un premier temps, une synthèse des enjeux environnementaux liés au secteur du bâtiment, le rôle de la terre crue dans le confort hygrothermique, les techniques de construction en terre crue et quelques exemples des constructions en terre dans le monde.

Par la suite, une synthèse bibliographique est présentée sur les différentes recherches relatives aux transferts thermiques, hygrométriques et couplés hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction. La dernière partie de ce chapitre est consacrée aux transferts hygrothermiques couplés et non couplés dans les matériaux bio-sourcés tels que la terre crue, les fibres végétales et les matériaux composites terre crue-fibres végétales.

I. 2 Construction en terre crue

I. 2. 1 Enjeux environnementaux dans le secteur du bâtiment

Depuis de nombreuses années, une demande mondiale de réduction de la consommation d'énergie et des taux de dégagement de gaz à effet de serre a été lancée. Le but est d'éviter le réchauffement climatique, nuisible à la survie de notre planète. Plusieurs domaines sont responsables des émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces domaines, on trouve les secteurs du bâtiment et des travaux publics. Les matériaux de construction tels que le béton de ciment, l'acier et la terre cuite, restent consommateurs de matières premières et d'énergie, dite grise, pour leur production, leur transport et leur mise en œuvre. Le tableau suivant présente quelques ordres de grandeurs de la consommation énergétique de quelques matériaux de construction :

Tableau I. 1: Consommation énergétique de quelques matériaux de construction [Morel et al., 2001]

	Maçonnerie en pierre	Béton de ciment	Pisé
Energie totale de fabrication des matériaux (GJ)	97	239	70
Energie totale pour le transport des matériaux (tonne.km)	1390	6707	1041

En France par exemple, en 2012 le secteur de la construction a été responsable de 40% de la génération de gaz à effet de serre ; 44% des déchets collectés provenaient de l'industrie de la construction, ce qui a représenté près de 345 millions de tonnes en 2012 [ADEME, 2015 ; Champiré, 2017] et en 2020, selon les statistiques publiées par le Ministère de la Transition Écologique, ce domaine est responsable de 43% des consommations d'énergie et de 23% des émissions de gaz à effet de serre.

Construire avec des matériaux locaux, tels que la terre crue, terre crue mélangée avec des fibres végétales, béton de chanvre, matériaux à faible impact environnemental et bas-carbone, permet de réduire la consommation d'énergie grise et le dégagement des gaz nocifs pour l'environnement.

I. 2. 2 Confort hygrothermique

Le confort hygrothermique, selon la société américaine ASHRAE « American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers », est l'ensemble des conditions nécessaires pour assurer un bien être des occupants. La température et l'humidité de l'air intérieur de la construction, représentent les facteurs majeurs qui jouent un rôle influent dans le confort hygrothermique.

Dans la construction, l'enveloppe est l'élément responsable du confort hygrothermique. D'après [Unver et al. \(2004\)](#), on dit qu'une enveloppe est optimale quand elle assure aux usagers, à la fois, un confort visuel, un confort acoustique et un confort hygrothermique. De plus, selon [Rousseau, \(2003\)](#), le confort hygrothermique repose sur la compréhension des phénomènes de transfert et de stockage de la masse et de la chaleur dans ou à travers les matériaux de construction et la bonne maîtrise des techniques de gestion de ces deux modes de transferts. Assurer un confort hygrothermique à l'intérieur d'un bâtiment, nécessite un matériau respirant vis-à-vis des transferts d'humidité, ce qui permet une régulation de l'hygrométrie entre les différents volumes du bâtiment et isolant vis-à-vis des transferts thermiques.

Ceci justifie notre choix d'expérimenter la terre crue comme matériau de construction. Elle est, d'après plusieurs travaux de recherche [[Hibouche, 2013](#) ; [Cagnon et al., 2014](#)], un matériau caractérisé par une perméabilité à la vapeur élevée en comparaison avec les matériaux de construction traditionnels (de l'ordre de 10^{-11} kg/(m. s. Pa)), ce qui permet de réguler l'humidité relative de manière rationnelle et d'éviter la condensation et donc l'apparition des moisissures. De plus, elle est caractérisée par une bonne inertie et une faible conductivité thermique permettant de stocker la chaleur et de la restituer à l'intérieur de la maison par exemple pendant les périodes froides de la journée.

I. 2.3 Techniques de construction en terre crue

Les techniques de construction en terre crue se déclinent généralement en deux catégories : La terre compactée mécaniquement (pisé, BTC, ...) et la terre non compactée (terre coulée, adobe, bauge, ...). Nous synthétisons ci-dessous quelques-unes de ces techniques :

I. 2. 3. 1 Techniques de construction en terre compactée

- **Le pisé (Figure I. 1)** : c'est une technique de construction qui consiste à compacter de la terre humide entre deux panneaux de coffrage en bois appelés « banches ». La terre est jetée à la pelle dans le coffrage et compactée en couches successives d'environ 8 cm

d'épaisseur à l'aide d'un pisoir par deux ou trois personnes. Une fois le compactage terminé, le coffrage est démonté pour passer à une autre banche jusqu'à finir le mur. La construction en pisé s'étale sur plusieurs mois parce que chaque assise à besoin de 10 jours pour laisser sécher la terre. Aujourd'hui, des techniques de production de panneaux de pisé préfabriqués en atelier puis transportés sur chantier pour être mis en œuvre et assemblés sont de plus en plus courantes.

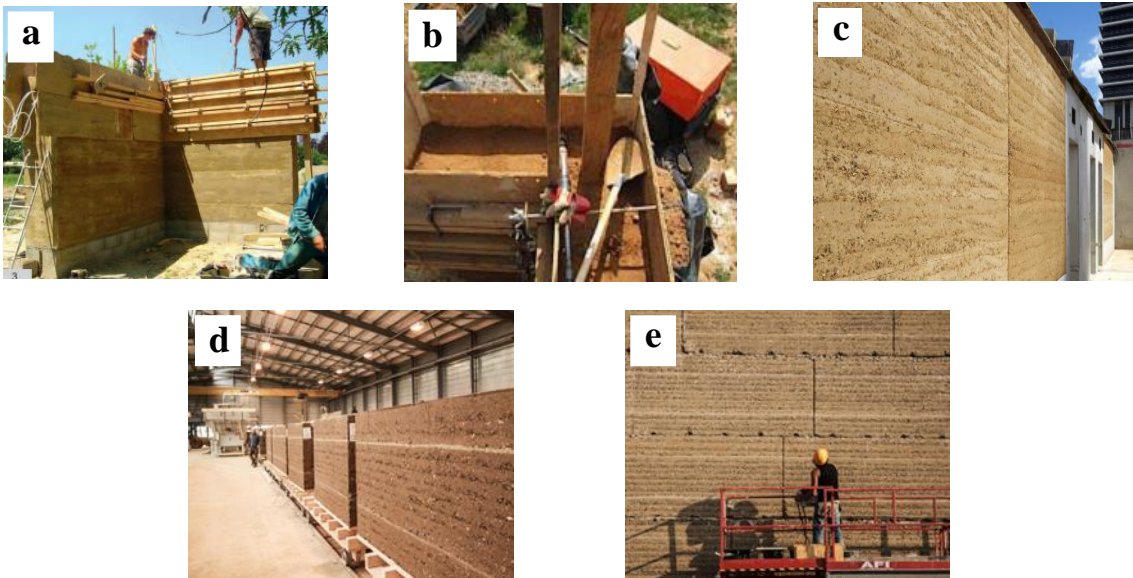


Figure I. 1 : (a) et (b) Construction d'un mur en pisé fini, (c) Exemple d'un mur en pisé (d) préfabrication de panneaux de pisé en atelier et (e) assemblage de panneaux de pisé préfabriqué sur chantier [Hibouche, 2013]

- **Les briques en terre comprimée (BTC) (Figure I. 2) :** ce sont des briques en terre crue comprimée (ou compressée) à l'aide d'une presse et séchées par la suite à l'air libre en gardant un certain taux d'humidité. Elles peuvent être stabilisées (BTCS) à la chaux ou au ciment afin d'améliorer leur résistance mécanique et leur durabilité. Elles permettent de réaliser des constructions dans des délais assez courts.



Figure I. 2: Briques en terre comprimée (<http://economie.paysmellois.org/>)

- **L'adobe (Figure I. 3)** : est une brique en terre crue mélangée avec de l'eau et éventuellement des ajouts minéraux ou végétaux et façonnée à la main ou à l'aide de pilons de bois dans un moule en bois. La brique de terre est ensuite séchée au soleil. Aujourd'hui, des techniques permettent de produire ces briques de façon plus industrielle : rouleau compresseur comportant des alvéoles pour façonner les briques et des étuves pour accélérer le séchage... On parle dans ce cas des briques de terre extrudées.

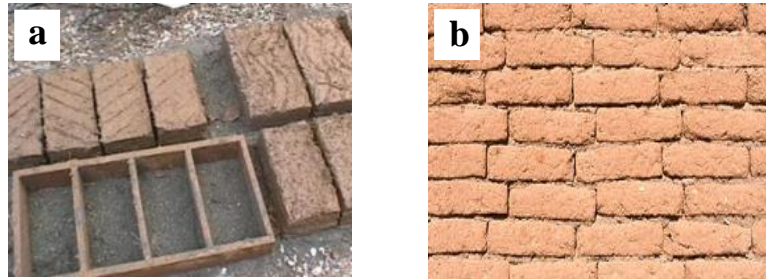


Figure I. 3: (a) Préparation des adobes, (b) Exemple d'un mur en adobe
(<http://autoconstruction-at.blogspot.com/>)

I. 2. 3. 2 Techniques de construction en terre non – compactée

- **Le torchis (Figure I. 4)** : est un mélange de terre argileuse fine et de paille. Il est appliqué sur une structure de pans de bois, appelés les “colombes” et de lattes entrelacées de petite taille. Le mur en torchis est ensuite recouvert de chaux. Dans l'Est et le Nord de la France, il existe plusieurs maisons en torchis (à colombages). Le torchis n'a pas de rôle structurel, mais plutôt un rôle de remplissage et d'isolation hygrothermique.

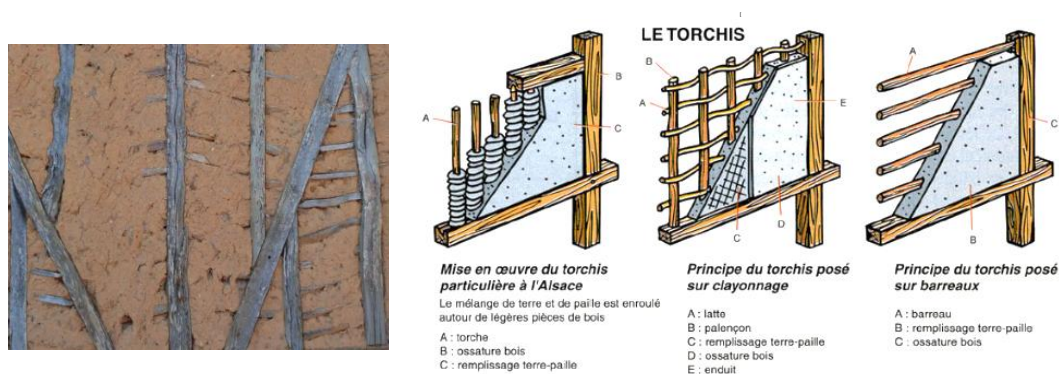


Figure I. 4 : Construction d'un mur en torchis [Duperron & Roux, 2018]

- **La terre coulée (Figures I. 5)** : est un béton de terre, réalisé et mis en œuvre de manière similaire à un béton de ciment. Elle est composée de granulats et d'une pâte d'argile

pour les lier entre eux. Pour obtenir la bonne granularité (c'est-à-dire les bonnes proportions de granulats, sables et argiles), il est nécessaire de décomposer ou de recomposer la terre locale : soit on la tamise si elle est déjà graveleuse, soit on lui ajoute des granulats si elle est trop fine. Cette terre recomposée est ensuite brassée et mouillée dans une bétonnière. Elle est coulée dans les banches à l'état de boue liquide puis vibrée. Il est nécessaire de la traiter avec un faible pourcentage de liants hydrauliques pour faire prise et pouvoir décoffrer après 24h00 environ [Hibouche, 2013].



Figure I. 5: Mur en terre coulée

(<https://flores-amo.fr/terre-coulee-construction-lyon-paris/>)

- **La bauge** : est une technique de construction qui consiste à façonner à la main des boules de terre crue en état plastique mélangée parfois à des fibres végétales ou animales afin de monter un mur massif monolithique. On utilise par la suite un outil tranchant afin de lisser le mur. Pour construire un mur en bauge, on n'a pas besoin de beaucoup d'outils et de coffrage et c'est pour cela que cette technique a connu un développement important en périodes de guerre ou de crises économiques...

I. 2. 4 Exemples de construction en terre crue dans le monde

Les constructions en terre sont majoritairement présentes en Asie, Europe, Afrique et Amérique latine ... (**Figure I. 6**). D'après CRA Terre (Centre de recherche et d'application en terre), 30 % de la population mondiale, vit dans des maisons en terre crue Eid (2016).



Figure I. 6 : Utilisation de la terre crue dans le monde (Source : <http://craterre.org/>)

I. 2. 4. 1 En Asie

En Asie, citons l'exemple de Shibām au Yémen, ancienne cité royale qui s'impose comme une référence en termes de construction en terre [Ben Ayed et al., 2016]. Les premiers « gratte-ciels » du monde datant du XVI^e siècle, construits en briques crues s'y trouvent.

En Inde, citons l'exemple de l'institut « Auroville Earth » où on trouve des techniques d'arcs, coupes et voûtes en terre crue dans des édifices de très grandes portées, ou encore l'utilisation de BTC, pour la construction d'un centre d'entraînement. Une des réalisations les plus impressionnantes est une voûte en BTC de plus de 10 mètres de portée et de seulement 14 centimètres d'épaisseur en son sommet, réalisée sans coffrage en à peine trois semaines par quatre maçons.

I. 2. 4. 2 En Europe

En Europe, dans plusieurs pays (Exemple : Suède, Angleterre, Espagne, Danemark), les constructions en terre font partie du paysage rural. En France, 15% de la population, à majorité rurale, occupe des maisons en pisé, en adobe ou en torchis.

Récemment, en Normandie, France, de nombreux ouvrages prototypes ont été réalisés avec un béton de terre crue (**Figure I. 7**). Il s'agit d'un éco-béton nommé « Cématerra » coulé dans des banches et décoffré en 24h selon le même principe qu'un béton classique. Ce béton de terre est composé de 78% de sol naturel avec des granulats de béton recyclé et mélangé avec 8% de ciment et/ou 3% de chaux afin d'améliorer ses performances mécaniques. Ces ouvrages prototypes instrumentés font l'objet d'un suivi sur le long terme afin d'étudier leurs propriétés hydromécaniques et hygrothermiques [Eid, 2016].

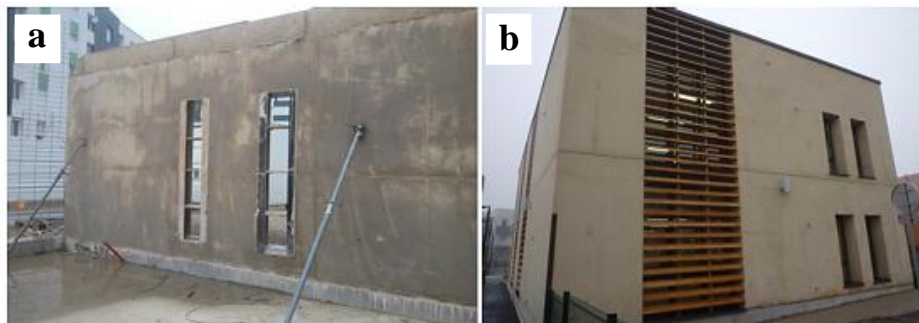


Figure I. 7: (a) Mur en béton de terre "Cématerra" après décoffrage, (b) Vue d'une façade du bâtiment prototype fini [Hibouche, 2013 ; Eid, 2016]

I. 2. 4. 3 En Afrique

En Afrique, la terre crue a été utilisée dans de nombreux pays pour les constructions rurales et même urbaines. On trouve la construction en "banco" (Afrique de l'Ouest), en "thobe" (Egypte et régions septentrionales), en "daga" (Sud-Est africain) ou en "leuh" (Maroc). De plus, les fouilles archéologiques ont montré que plusieurs civilisations édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau. Citons l'exemple des pyramides en Egypte, Pyramide d'El-Lahoun. En Tunisie, il y a les habitations en terre creusée (les troglodytes de Matmata) et les habitations en pisé à Ksour Tataouine... En effet à Matmata, les habitations se composent d'une cour (circulaire ou carrée) à ciel ouvert autour de laquelle on trouve les chambres et les couloirs qui sont également creusés dans le sol. L'étage supérieur est réservé pour stocker les céréales et d'autres denrées alimentaires. Cette typologie d'habitat permet d'amener de la lumière dans les pièces tout en les protégeant de la chaleur durant les longs mois de canicule et du froid durant l'hiver. Le but premier de ces habitats était de protéger les réserves de nourriture et le second rôle était de se protéger contre le climat.

Aujourd'hui, en Tunisie, la construction en terre crue revient en force, notamment avec l'industrialisation de procédés comme la production des blocs de terre compactés stabilisés, et aussi la valorisation de certains déchets de production agricoles dans la confection des matériaux à base de terre crue (**Figure I. 8**).

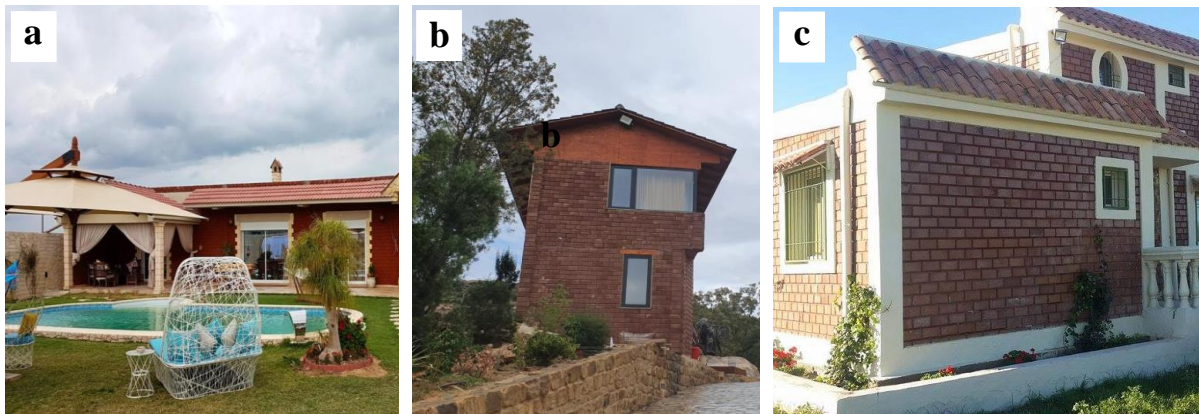


Figure I. 8 : Réalisations de la société SOIB (<https://soib72.site123.me>)

(a) Dar Ezzmen, Tunisie, (b) Dar Selma Bouargoub et (c) Maison en BTC

I. 3 Transfert thermique

I. 3. 1 Modes de transfert thermique dans les matériaux poreux

Il s'agit d'échange d'énergie thermique (ou chaleur) qui a lieu d'un corps chaud vers un corps froid. Ce transfert thermique s'arrête lorsqu'on atteint un équilibre thermique dans lequel les deux corps atteignent la même température. Ce type de transfert s'effectue selon trois mécanismes : conduction, rayonnement et convection thermiques.

I. 3. 1. 1 La conduction thermique

La conduction thermique est un phénomène de transfert de chaleur qui se produit entre deux régions d'un même milieu ou deux milieux en contact caractérisés par deux températures différentes. Ce transfert se réalise sans déplacement de matière.

La densité de flux de chaleur j_{cond} [W/m²] est donnée par la loi de Fourier et s'écrit sous la forme suivante :

$$j_{\text{cond}} = -\lambda \nabla T \quad (\text{I. 1})$$

- λ : conductivité thermique du matériau [W/ (m . K)]

I. 3. 1. 2 Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est un mode de transfert qui se caractérise par un échange d'énergie électromagnétique, sans la participation d'un milieu intermédiaire à cet échange de chaleur. Par exemple, le rayonnement solaire est capable d'échauffer la terre bien que le milieu traversé soit à une température plus basse que la terre. Lors de ce mode de transfert, on distingue deux types d'échanges pour identifier les interactions solaire/paroi : les échanges de grandes longueurs d'ondes et les échanges de courtes longueurs d'ondes.

La densité de flux radiatif totale $j_{\text{rad,total}}$ [W/m²] :

$$j_{\text{rad,total}} = j_{\text{rad}} + \alpha I_N \quad (\text{I. 2})$$

- ❖ La densité de flux radiatif dû aux courtes longueurs d'ondes (CLO) est obtenue en multipliant l'absorptivité aux courtes longueurs d'ondes α par le rayonnement solaire incident reçu par la surface extérieure de la paroi I_N [W/m²].
- ❖ La densité de flux radiatif j_{rad} [W/m²] dû aux grandes longueurs d'ondes (GLO) est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann et s'exprime comme suit :

$$j_{\text{rad}} = \varepsilon F \sigma (T_e^4 - T_{\text{surf}}^4) \quad (\text{I. 3})$$

- ε : émissivité

- F : facteur de forme
- σ : la constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
- T_e : la température de la zone d'émission [K]
- T_{surf} : la température de surface de la paroi [K].

I. 3. 1. 3 La convection thermique

La convection thermique est un mode de transfert d'énergie thermique au sein d'un fluide en mouvement. Elle se produit dès que le corps sera en contact direct avec le fluide.

Il y a deux types de convection thermique :

- **La convection naturelle** : dite aussi convection libre se produit grâce à une différence de masse volumique qui varie en fonction de la température au sein du fluide.
- **La convection forcée** : se produit lorsque le mouvement du fluide est imposé par des moyens externes (vent, système de ventilation...).

La densité de flux convectif $j_{\text{conv}}[\text{W}/\text{m}^2]$ entre la paroi et le fluide est donnée par l'expression suivante :

$$j_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} (T_{\infty} - T_{\text{surf}}) \quad (\text{I. 4})$$

- T_{∞} : la température du fluide loin de la paroi [K]
- h_{conv} : coefficient d'échange thermique [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

I. 3. 2 Techniques expérimentales de mesure de transfert thermique

Comme on s'intéresse dans cette thèse aux transferts thermiques des matériaux de construction à base de terre crue, l'essentiel de ces transferts a lieu par conduction. Par conséquent, on se contente dans ce qui suit de présenter essentiellement les méthodes expérimentales permettant de caractériser ce type de transfert.

I. 3. 2. 1 Méthode de la boîte chaude

C'est une méthode qui permet la détermination de la conductivité thermique des matériaux poreux en régime permanent [Hibouche, 2013 ; Saidi et al., 2018]. Elle est basée sur la norme **NF EN ISO 8990**. Le dispositif de mesure (**Figure I. 9**) est formé de deux boîtes, une boîte chaude maintenue à une température chaude à l'aide d'une résistance chauffante et une autre froide, maintenue à une température froide à l'aide d'un fluide froid circulant dans un échangeur

thermique. Entre ces deux boîtes, un échantillon parallélépipédique est placé afin d'être soumis sous un flux de chaleur thermique constant et unidirectionnel.

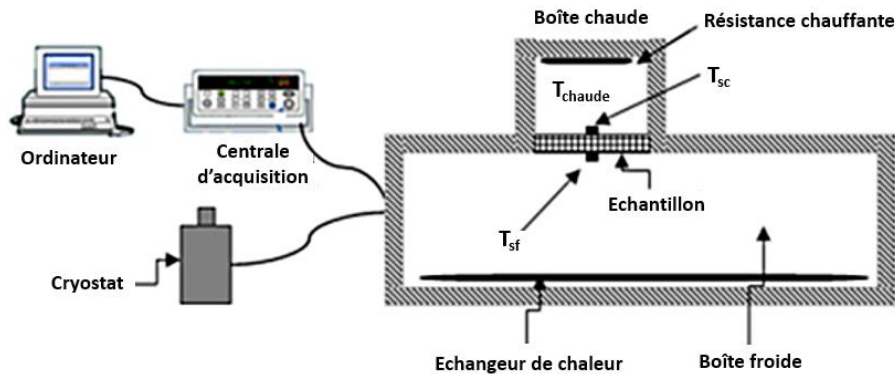


Figure I. 9: Dispositif expérimental pour la mesure de la conductivité thermique en régime permanent [Saidi, 2018]

La conductivité thermique λ [W/(m. K)] en régime permanent est calculée à l'aide de la loi de Fourier en fonction de gradient de températures et de la puissance dégagée par la résistance chauffante. En effet, pour cet essai, on impose une tension aux bornes de la résistance chauffante et on mesure les mesures de températures aux surfaces de l'échantillon et dans les deux boites chaude et froide à l'aide de thermocouples. Le régime permanent est atteint une fois la différence entre les températures chaude et froide devient constante en fonction du temps.

$$\lambda = \frac{Q \times e}{S \times \Delta T} = \frac{e}{S \times \Delta T} (P - P_0) = \frac{e}{S \times \Delta T} \left(\frac{V^2}{R} - C \times \Delta T' \right) \quad \text{Hibouche (2013)} \quad (\text{I. 5})$$

- Q : flux thermique = puissance fournie – pertes = $P - P_0$ en [W]
- e : épaisseur du matériau étudié [m]
- S : surface du matériau exposé au flux thermique [m²]
- ΔT : écart de températures entre la surface chaude et la surface froide (mesurée) [K]
- P : puissance électrique mesurée aux bornes de la résistance chauffante = V^2/R [W]
- P_0 : puissance échangée entre l'extérieur et l'intérieur de la partie chaude (pertes) = $C \cdot \Delta T'$ en [W]
- C : coefficient de déperdition de la boîte en [W/K] déterminé expérimentalement pour un matériau de conductivité thermique connue
- V : tension appliquée à la résistance chauffante (mesurée) [V]
- R : valeur de la résistance chauffante (Ω)
- $\Delta T'$: écart de température entre l'extérieur et l'intérieur de la partie chaude (mesuré) en [K] Hibouche (2013).

I. 3. 2. 2 Boîtier KD2 Pro

Le dispositif utilisé est un boîtier KD2 Pro accompagné de 3 capteurs en inox (TR-1, KS-1 et SH-1) permettant de mesurer les propriétés thermiques des matériaux en régime transitoire tels que la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité de chaleur. Cette méthode consiste à appliquer une dissipation de chaleur, à l'aide des sondes à la fois sources et capteurs de chaleur insérées dans l'échantillon. A partir de la température de l'échantillon mesurée par les sondes, l'appareil détermine les propriétés thermiques (**Figure I. 10**).

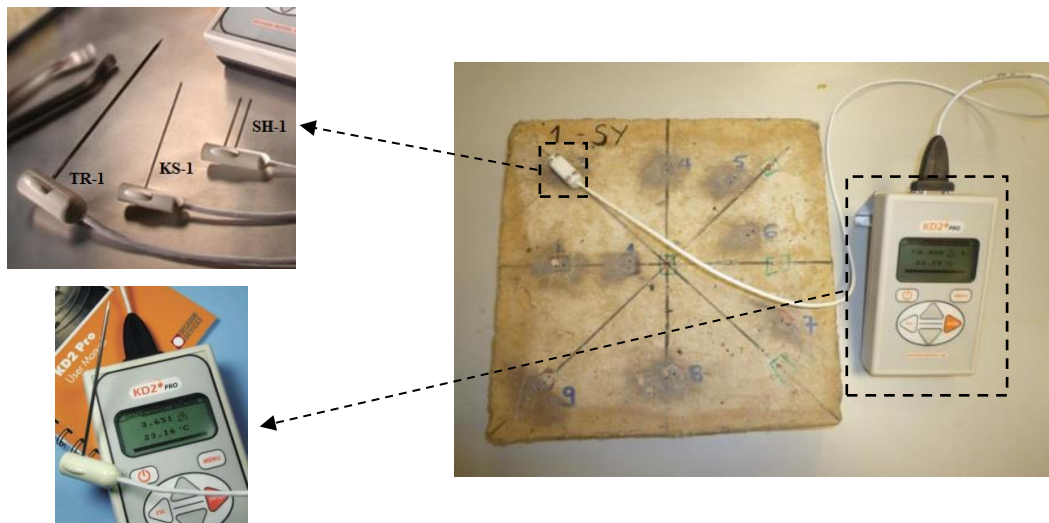


Figure I. 10 : Boîtier KD2 Pro [Hibouche, 2013]

I. 3. 2. 3 Méthode de mesure par le « Hot Disk »

Le dispositif utilisé est le "Hot Disk" basé sur la norme **NF EN ISO 22007-2** pour mesurer la conductivité thermique d'un matériau en régime transitoire. Le principe de mesure consiste à mettre une sonde plane, à la fois source de chaleur et capteur de température, entre deux échantillons de même matériau (**Figure I. 11**)

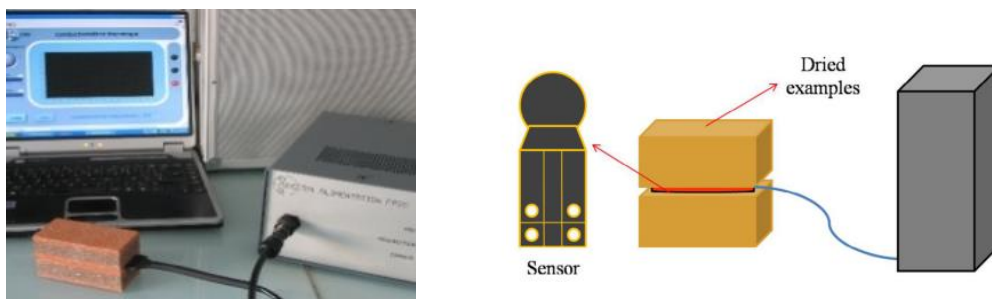


Figure I. 11: Méthode de mesure par le « Hot Disk » [Zhang et al., 2018]

I. 4 Transfert hygrométrique

I. 4. 1 Hygrométrie dans les matériaux poreux

Un matériau poreux est un milieu perméable formé de trois phases et caractérisé par des coefficients de perméabilité :

- Phase solide (ou matrice solide) formée de particules solides (exemple grains du sol)
- Phase liquide formée de l'eau liquide pure
- Phase gazeuse formée d'air sec et de vapeur d'eau

Une structure poreuse rend possible :

- l'absorption d'eau, les matériaux sont dits capillo-poreux et caractérisés par une perméabilité à l'eau liquide
- l'adsorption de la vapeur d'eau, les matériaux sont dits hygroscopiques et caractérisés par une perméabilité à la vapeur d'eau
- le passage de l'air, les matériaux sont dits perméables à l'air et caractérisés par une perméabilité à l'air
- les transferts de chaleur accompagnés des cas de changement de phase (évaporation/condensation).

On dit qu'un matériau poreux est hygroscopique, s'il est capable de capter et stocker une certaine quantité d'humidité relative de l'air environnant dans ses pores.

Lors des transferts d'humidité, l'humidité relative peut être stockée sous forme vapeur ou liquide. Ceci dépend du type de pores. Si les pores sont non connectés, donc ils vont emmagasiner des molécules de vapeur d'eau, par contre s'ils sont connectés, les molécules d'eau vont être connectées et l'humidité peut être condensée sous forme liquide. Il s'agit alors d'un transfert d'humidité dans les matériaux poreux dû au mouvement de chacune des deux phases liquide et vapeur.

I. 4. 2 Transfert hygrométrique sous forme vapeur d'eau

Le transfert d'humidité sous forme de vapeur d'eau dans les milieux poreux est décrit par la loi de Fick et il est dû à un gradient de pression de vapeur ou un gradient de concentration.

Par définition, l'humidité relative de l'air ambiant HR [%] est le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau P_v [Pa] sur la pression de vapeur saturante P_{sat} [Pa] :

$$HR = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (I. 6)$$

La pression saturante de vapeur d'eau est donnée par une expression empirique valable pour une température comprise entre 0°C et 80°C [Peuhkuri, 2003] :

$$P_{sat} = e^{(23.5771 - \frac{4042.5}{T-37.58})} \quad (I. 7)$$

- T : température [K]

La loi de Fick permet de décrire la densité de flux de vapeur j_v [kg/ (m². s)] dans le cas où la vapeur est supposée un gaz parfait :

$$j_v = - \delta_v \nabla P_v \quad (I. 8)$$

- δ_v : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau [kg/ (m. s. Pa)]

La capacité d'un matériau à laisser passer la vapeur d'eau peut être caractérisée par une perméabilité à la vapeur ou bien un facteur de résistance à la diffusion de vapeur μ qui est par définition :

$$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\delta_v} \quad (I. 9)$$

- $\delta_{v,a} = 2.31 \times 10^{-5} \times \frac{M_l}{R \times T} \left(\frac{T}{273.15} \right)^{1.81}$: perméabilité à la vapeur de l'air [kg/(m. s. Pa)]
Oumeziane (2013).

I. 4. 3 Mécanismes de transfert hygrométrique

Les transferts hygrométriques dans les milieux poreux se font sous différentes formes et par différents mécanismes. Le tableau ci-dessous résume ces différents mécanismes.

Tableau I. 2 : Différents mécanismes de transfert de la vapeur d'eau [Künzel, 1995]

Forme transportée	Mécanisme	Force motrice
Vapeur d'eau	Diffusion de vapeur	Pression de vapeur
	Thermo-diffusion	Température
	Migration de vapeur	Pression de vapeur
Eau liquide	Migration capillaire	Pression capillaire
	Flux hydraulique	Différence de pression totale
	Migration d'eau liée	Teneur en eau

I. 4. 4 Transfert hygrométrique sous forme eau liquide

Le transfert de l'eau liquide se fait dans le sens des pressions décroissantes et il est dû à un gradient de pression dans l'eau.

La densité de flux d'eau liquide j_l [kg/ (m². s)] est donnée par la loi de Darcy. Elle s'exprime sous la forme suivante :

$$j_l = -k_l \nabla P_l \quad (\text{I. 10})$$

- k_l : perméabilité à l'eau liquide du matériau [kg/ (m. s. Pa)]
- P_l : pression liquide [Pa].

Or d'après la loi de Laplace $P_c = P_l - P_0$

- P_c : pression capillaire (ou pression de succion) [Pa]
- P_0 : est la pression de l'air ambiant supposée constante [Pa].

D'où, la densité de flux d'eau liquide j_l [kg/ (m². s)] peut être écrite sous une autre forme

$$j_l = -k_l \nabla P_c \quad (\text{I. 11})$$

I. 4. 5 Techniques expérimentales de mesure de transfert de vapeur d'eau

Nous résumons ci-dessous les techniques usuelles pour la détermination de la perméabilité à la vapeur des matériaux poreux comme la terre crue.

I. 4. 5. 1 Méthode de la coupelle

La méthode est une méthode gravimétrique dite « de la coupelle ». Le principe de la mesure consiste à placer un échantillon d'épaisseur e et de diamètre ϕ sous gradient de vapeur constant et unidirectionnel en conditions isothermes. La connaissance du volume d'eau évaporée déterminé par pesée, permet en premier lieu d'obtenir le flux de vapeur traversant le matériau et en second lieu de calculer la perméabilité à la vapeur [Hibouche, 2013].

Le dispositif comprend un disque d'épaisseur e et de diamètre D , scellé dans un récipient qui contient une solution saline saturée en sel, qui permet d'imposer une humidité relative contrôlée dans l'atmosphère régnant dans la partie inférieure du disque. Le récipient contenant le disque est ensuite suspendu à l'intérieur d'un dessiccateur dans lequel une seconde solution saline saturée avec un autre sel a été préalablement placée. Cette dernière permet d'imposer une

seconde humidité relative dans l'atmosphère qui est en contact avec la partie supérieure du disque. Ceci permet d'avoir un gradient d'humidité relative qui engendre un flux de vapeur d'eau de bas vers le haut ou de haut vers le bas selon l'emplacement des deux solutions salines. Le récipient et son contenu (disque et solution saline) est suspendu à une balance de précision permettant de suivre sa variation de masse en fonction du temps (**Figure I. 12**).

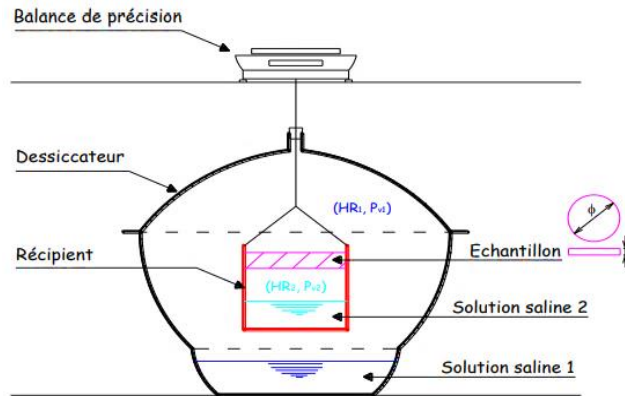


Figure I. 12 : Dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur par la méthode de la coupelle [Hibouche, 2013]

Le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau est donné par la loi de Fick :

$$\delta_v = - e \frac{j_v}{\Delta p_v} \quad (\text{I. 12})$$

- e : épaisseur du matériau étudié [m] ;
- p_v : pression de vapeur [Pa] ;
- $j_v = \frac{Q_m}{S}$: densité du flux de vapeur d'eau [kg/ (m². s)]
- Q_m : est le débit massique [en kg/s] qui est la pente de la courbe de gain ou perte de masse de vapeur en fonction du temps.
- $S = \pi \times \frac{\phi^2}{4}$ section imposée au flux de vapeur [m²].

I. 4. 5. 2 Appareil Gravitest 6400

Le dispositif Gravitest est utilisé pour la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau selon la norme **NF EN ISO 12572** en se basant sur le principe de la coupelle en conditions isothermes. L'avantage de cet appareil est l'automatisation de l'essai, notamment pour le suivi de la variation de la masse en fonction du temps. Il suffit de prédéfinir les conditions de mesure, telles que la température et l'humidité ambiante en contrôlant le flux d'air, et de programmer le cycle des paliers d'humidité relative prédéfinis.

Le Gravitest (**Figure I. 13**) a une capacité de six coupelles dont une coupelle témoin et dispose d'un système de pesage automatique. Les coupelles sont placées sur un plateau tournant disposé dans une chambre climatique régulée en température et en hygrométrie moyennant un générateur d'humidité. A l'intérieur de la chambre et sous le plateau tournant existe une balance permettant le suivi de la variation de masse des six coupelles à tour de rôle [Ferroukhi, 2016 ; Bodian, 2019].

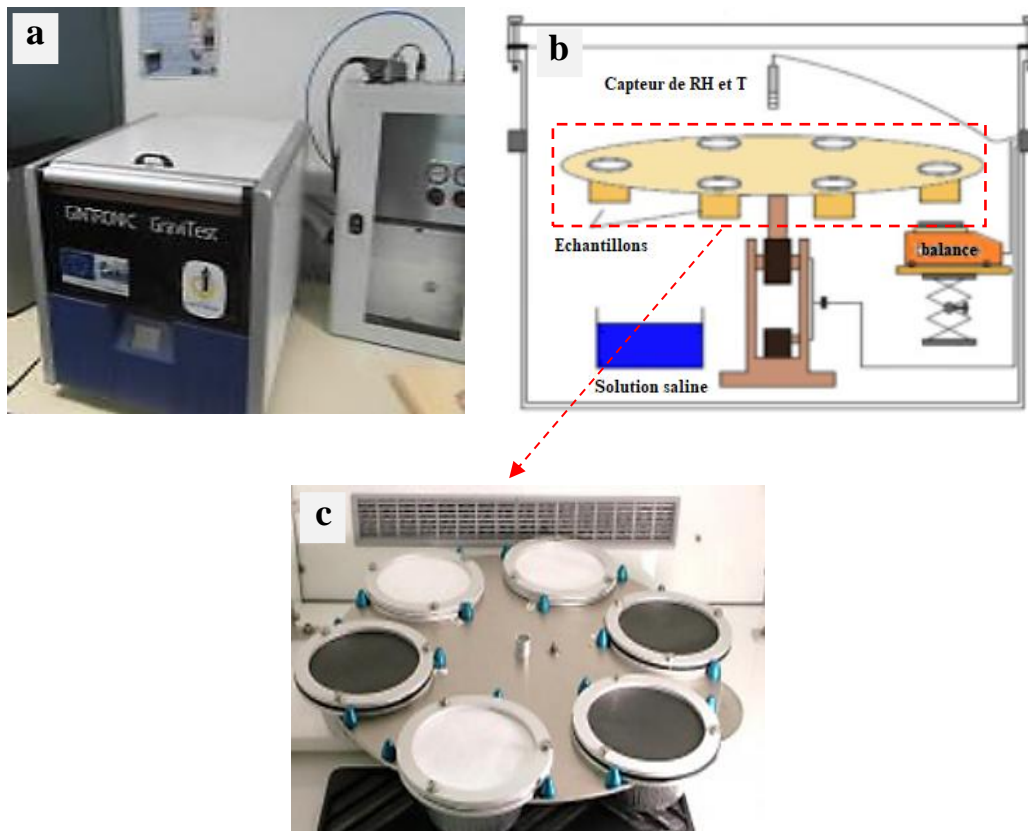


Figure I. 13 : (a) Dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur Gravitest, (b) Schéma descriptif de l'intérieur du Gravitest et (c) Plateau tournant contenant les six coupelles [Ferroukhi, 2016]

1. 4. 5. 3 Isothermes d'adsorption/désorption

Afin d'évaluer la teneur en eau (sous ses deux formes vapeur et liquide) d'un matériau poreux ainsi que sa capacité à stocker l'humidité relative, des essais de détermination des isothermes d'adsorption/désorption doivent être envisagés. Ceci se fait par mesure de la teneur en eau d'un échantillon soumis à une humidité relative donnée. Pour cela, des échantillons cubiques du matériau étudié de 1 cm^3 de volume environ, sont exposés à des humidités relatives imposées dans différents dessiccateurs à l'aide de solutions salines ou bien au sein d'une enceinte climatique d'humidité contrôlée en conditions isothermes. La pesée deux fois par jour de l'échantillon permet de vérifier si l'équilibre hydrique est atteint entre l'échantillon et

l'humidité relative imposée. A l'équilibre, on obtient un point (HR, w) de la courbe d'adsorption/désorption (**Figure I. 14**).

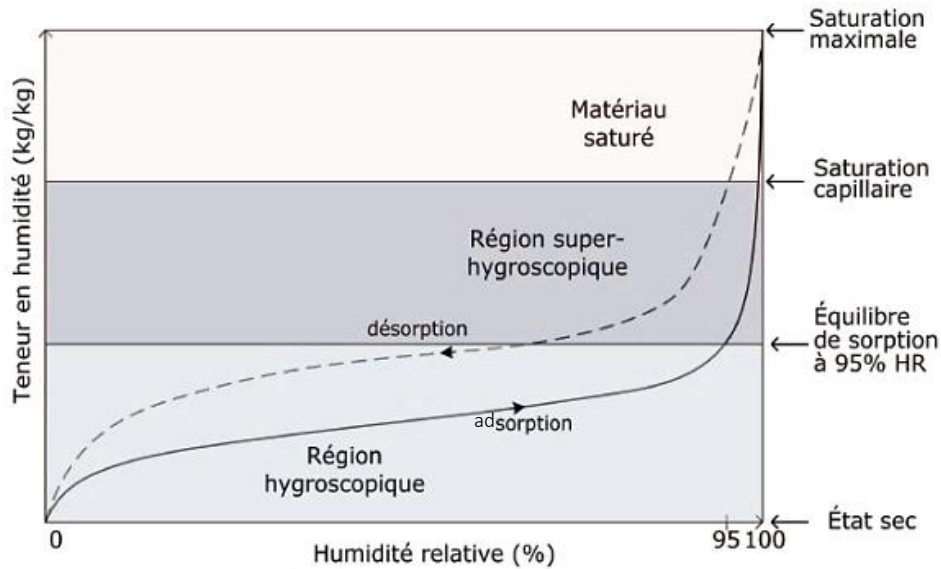


Figure I. 14 : Diagramme schématisé d'une courbe d'isotherme d'adsorption et désorption [Piot, 2009, Bennai, 2017]

Le terme traduisant la capacité de stockage de l'humidité par le matériau est $\xi = \frac{\partial w}{\partial HR}$. Autrement dit, c'est la dérivée de l'isotherme d'adsorption où w est la teneur en eau massique par unité de volume [kg/m³].

L'humidité relative contenue dans les pores d'un matériau peut se présenter sous deux formes : liquide et/ou vapeur. Par conséquent, la teneur en eau est définie comme la masse d'eau vapeur et liquide contenu dans le volume apparent du matériau. On distingue différentes définitions pour la teneur en eau :

- Teneur en eau massique u, qui est définie comme le rapport entre la masse d'eau (liquide + vapeur) stockée dans le matériau m_{l+v} [kg] et la masse sèche de ce dernier m_s [kg] :

$$u_m = \frac{m_{l+v}}{m_s} \quad (\text{I. 13})$$

- Teneur en eau volumique θ , qui est définie comme le rapport entre le volume d'eau (liquide + vapeur) stocké dans le matériau V_{l+v} [m³] et le volume sec de ce dernier V_s [m³] :

$$\theta = \frac{V_{l+v}}{V_s} \quad (\text{I. 14})$$

- Teneur en eau massique par unité de volume w [Kg/m³], qui peut être définie par deux relations :

$$w = \frac{m_{l+v}}{V_s} \quad (\text{I. 15})$$

Ou bien

$$w = \rho_s u_m \quad (\text{I. 16})$$

Avec ρ_s est la masse volumique sèche du matériau en $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Les isothermes d'adsorption/désorption représentent trois régions :

- **Région hygroscopique**

Cette région correspond à l'intervalle d'humidité relative entre 0 et 85% où les pores du milieu poreux sont remplis de molécules de vapeur d'eau uniquement.

- **Région super-hygroscopique**

Cette région correspond à l'intervalle d'humidité relative entre 85 et 100%. Dans cette région, le matériau est partiellement saturé, l'eau occupe la majorité des pores et le reste est rempli par des molécules de vapeur d'eau et d'air.

- **Région saturée**

Cette région suit la région super-hygroscopique et elle correspond à la saturation complète du matériau où tous les pores sont remplis d'eau liquide.

L'isotherme d'adsorption est ainsi le reflet des interactions entre un matériau et l'humidité relative. On admet généralement la classification suivante (**Figure I. 15**) :

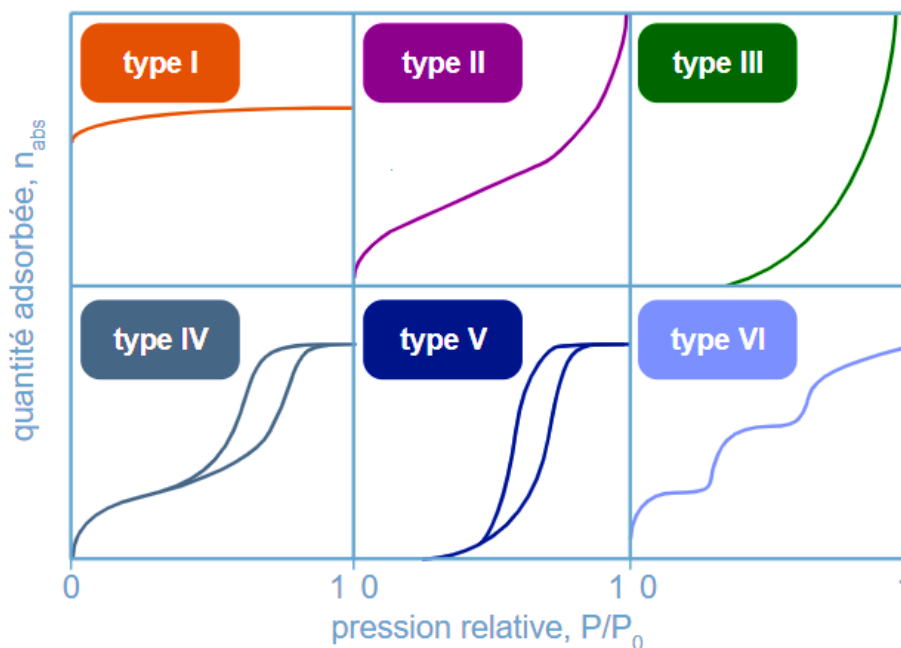


Figure I. 15 : Classification des isothermes d'adsorption donnée par l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)

- **Les isothermes de type I** sont généralement caractérisées par un plateau horizontal présentant la saturation du matériau, malgré l'augmentation de la pression. Elles sont obtenues pour des matériaux poreux dont les micropores se remplissent à faibles pressions relatives. Ce type d'isotherme est caractéristique d'une adsorption monomoléculaire.
- **Les isothermes de type II et III** sont caractérisées par une augmentation très progressive de la quantité d'humidité absorbée par le matériau en fonction de la pression relative. Ceci est dû à la distribution large des tailles de pores présents, il s'agit des matériaux non poreux et macroporeux. Ce type d'isotherme est caractéristique d'une adsorption multimoléculaire.
- **Les isothermes de type IV et V** sont caractérisées par un remplissage des mésopores et par une condensation capillaire dans ces derniers. De plus, on observe une hystérésis dans ce type d'isothermes où les branches d'adsorption et de désorption sont quasiment parallèles.
- **Les isothermes de type VI** sont rares parce qu'elles correspondent à une adsorption multicouche caractéristique d'un matériau non poreux et très homogène.

I. 5 Transferts couplés hygrothermiques

I. 5. 1 Transferts couplés hygrothermiques dans les matériaux poreux

Nous présentons dans cette section les transferts couplés hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction. Les transferts couplés hygrothermiques, sont des transferts simultanés de chaleur et d'humidité à travers une paroi suite à des différentiels de chaleur et d'humidité entre les deux faces de celle-ci. L'étude de l'hygrothermie couplée dans l'enveloppe du bâtiment permet d'évoquer en réalité les situations les plus courantes. Pour étudier les transferts hygrothermiques, des méthodes expérimentales et des modèles numériques ont été développés dans la littérature.

Plusieurs recherches ont prouvé que l'humidité relative affecte le confort respiratoire dans l'habitat [Fang et al., 1998]. En effet, la qualité des matériaux de construction peut être dégradée à cause des phénomènes d'adsorption/désorption. Ceci conduit à des problèmes de résistance mécanique et de confort thermique [Mendes et al., 2003 ; Woloszyn et al., 2006 ; Barbosa & Mendes, 2008]. Par conséquent, l'étude des transferts hygrothermiques dans les enveloppes d'un bâtiment est nécessaire pour comprendre et améliorer les performances de ce dernier.

I. 5. 2 Techniques expérimentales de mesure des transferts couplés hygrothermiques

On distingue différentes échelles de caractérisation hygrothermique :

- A l'échelle du matériau : des dispositifs de couplage hygrothermique ont été développés. Les lois de transfert de chaleur et de masse sont valables à cette échelle microscopique.
- A l'échelle d'une paroi : c'est une échelle macroscopique et la majorité des dispositifs de couplage sont constitués de deux chambres climatiques de température et humidité contrôlées. Entre ces deux chambres, on place verticalement une paroi de $1 \times 1 \text{ m}^2$ ou bien de $2 \times 2 \text{ m}^2$ de surface par exemple, exposée à des gradients simultanés de température et d'humidité. Des capteurs hygrothermiques sont insérés à l'intérieur de la paroi afin de contrôler l'évolution de la température et de l'humidité relative et de mettre en évidence le degré de la contribution du matériau au confort hygrothermique.
- A l'échelle du bâtiment : évaluation du confort hygrothermique de bâtiments prototypes dans des conditions climatiques couplées en température et humidité, testés en état de service.

I. 5. 2. 1 A l'échelle du matériau

Ferroukhi (2016) a étudié les transferts couplés de chaleur et d'humidité à travers quatre matériaux de construction différents : polystyrène, brique en terre cuite, plâtre et aggloméré. Un dispositif de couplage hygrothermique a été développé en laboratoire permettant d'imposer deux gradients d'humidité et de température simultanément. Les échantillons testés ont 8cm de diamètre et 4 cm d'épaisseur. Les conditions initiales sur $T_0 = 25^\circ\text{C}$ et $HR_0 = 30\%$. Les échantillons sont placés entre deux ambiances différentes contrôlées en température et humidité relative comme le montre la **Figure I. 16**. L'humidité relative est imposée dans les atmosphères régnant au-dessous et au-dessus des échantillons à l'aide de solutions salines. La température est régulée à l'aide de bains thermostatés. Des sondes hygrothermiques de types SHT-75 ont été insérées dans différentes épaisseurs des échantillons, dans le but de suivre l'évolution des profils de température et de la pression de vapeur d'eau dans les matériaux testés et de les comparer aux résultats d'une simulation numérique couplés hygrothermiques. Le modèle numérique de couplage hygrothermique utilisé pour cette validation est celui de [Chang &

Weng, 2000] qui a utilisé la pression de vapeur et la température comme moteur de transfert de masse et de chaleur respectivement. Un très bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux a été obtenu.

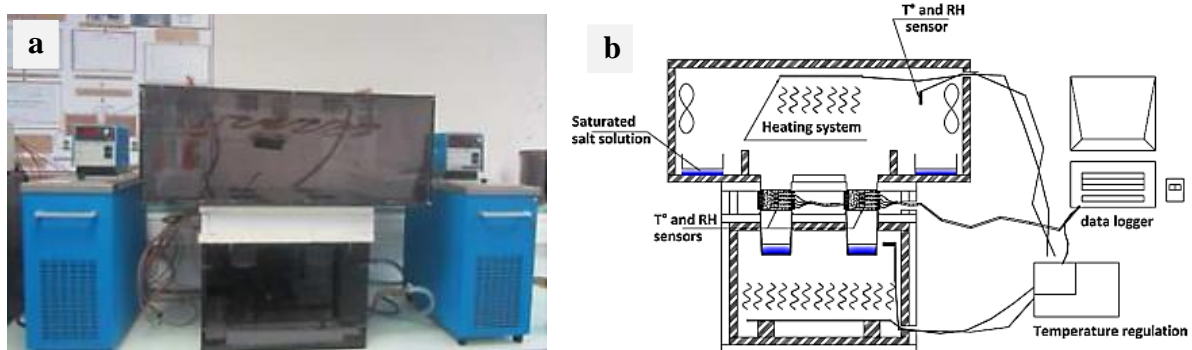


Figure I. 16 : (a) Dispositif de couplage hygrothermique développé au laboratoire et (b) Schéma explicatif du dispositif [Ferroukhi, 2016]

Qin et al. (2007) ont étudié les transferts couplés hygrothermiques dans des matériaux de construction. La méthode de la coupelle a été modifiée de façon qu'un gradient de température et d'humidité peuvent être imposés simultanément. La **Figure I. 17** montre un schéma représentatif du dispositif de couplage. Un dispositif de chauffage a été utilisé pour imposer une température dans le compartiment supérieur du dispositif. L'humidité relative a été contrôlée à l'aide de solutions salines. Le compartiment inférieur représente une pièce climatique où la température et l'humidité relative sont contrôlées. Comme résultats, les profils de température et d'humidité relative ont été mesurés à l'aide de capteurs. Une comparaison avec les résultats d'un modèle numérique développé lors de cette étude a été réalisée. Il s'agit d'un modèle mathématique permettant de calculer les transferts couplés d'humidité et de chaleur. La teneur en vapeur et la température ont été choisies comme principaux moteurs de transferts. Les équations couplées ont été résolues analytiquement, en se basant sur la technique de transformation de Laplace et la méthode de la fonction de transfert [Qin et al., 2007]. Les profils instantanés de température et d'humidité relative ont été déterminés expérimentalement et numériquement. Un bon accord a été obtenu entre les résultats numériques et expérimentaux. Le principal avantage de la méthode développée dans cet article par rapport aux autres méthodes disponibles dans la littérature est qu'elle est plus facile à utiliser et qu'elle fournit un résultat précis pour certains calculs de bâtiments.

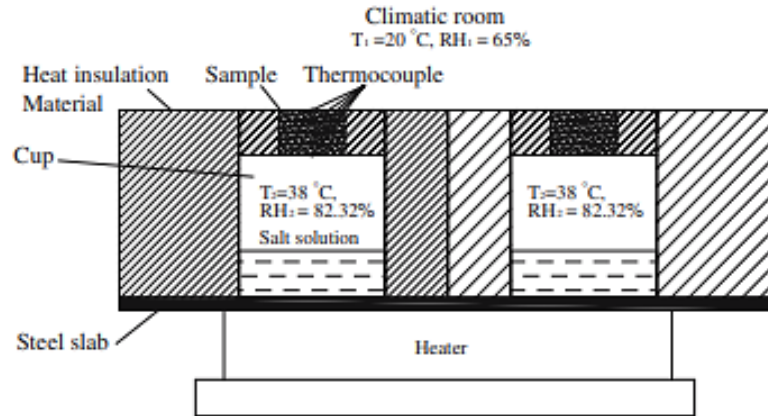


Figure I. 17 : Dispositif de couplage hydrothermique [Qin et al., 2007]

I. 5. 2. 2 A l'échelle d'une paroi

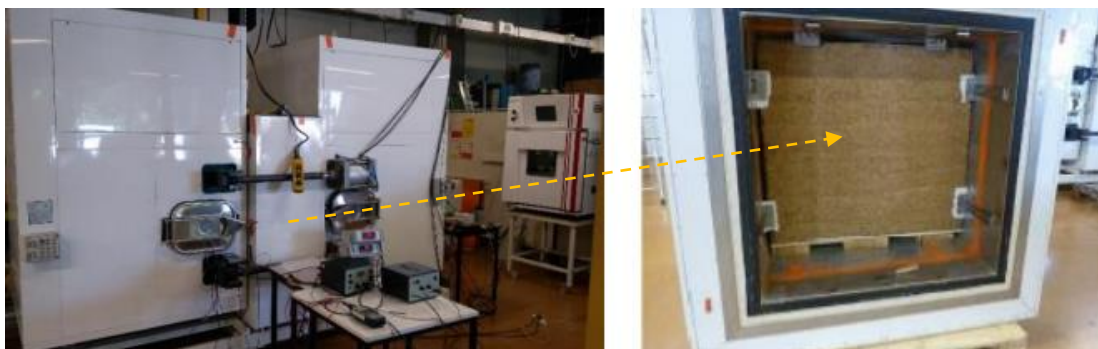
Collet & Prerot, (2014) ont étudié les transferts couplés hydrothermiques à travers un mur en béton de chanvre. Le dispositif expérimental (Figure I. 18) est composé de deux pièces climatisées où les conditions ambiantes sont contrôlées pour imposer un gradient de température et de pression de vapeur d'eau à travers le mur. Il permet de caractériser le comportement hydrothermique d'un modèle réduit d'un mur de dimensions $2.3 \times 2.1 \times 0.33 \text{ m}^3$. Des essais de transferts hydrothermiques couplés et non-couplés ont été réalisés permettant de mettre en évidence l'effet du couplage. Pour les essais de transfert de vapeur en conditions isothermes, une diffusion homogène de la vapeur a été observée. En revanche, pour les essais de transfert de vapeur et de chaleur couplés, d'importantes variations de pression de vapeur d'eau ont été observées au sein de la paroi. Ceci met en évidence les phénomènes de condensation/évaporation qui est dû au couplage hydrothermique.



Figure I. 18 : Enceintes climatiques de couplage hydrothermique [Collet & Prerot, 2014]

Abbas (2021), a réalisé une étude numérique de transferts couplés hydrothermiques à l'échelle d'une paroi en se basant sur un modèle mathématique de transferts de masse et de chaleur

développé dans le cadre de la thèse de [Ferroukhi \(2016\)](#). Ce modèle consiste à coupler dynamiquement un modèle de transfert hygrothermique de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches (HAM) avec un modèle thermique du bâtiment (BES). Le couplage concerne la cohabitation entre COMSOL Multiphysics, outil de simulation par éléments finis pour les transferts thermo-hydriques à travers l'enveloppe, et TRNSYS, outil de simulation thermique dynamique global pour le bâtiment et les systèmes dynamiques [Abbas \(2021\)](#). Cette approche assure une modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse au niveau de la paroi avec un niveau de discrétisation élevé (2D et 3D). Cela permet de traiter avec une bonne précision les points singuliers de l'enveloppe où des phénomènes de transferts hygrothermiques multidirectionnels se produisent [[Ferroukhi, 2016](#)]. Le modèle HAM-BES a été validé par la suite par des essais expérimentaux dans lesquels une enceinte bi-climatique connue sous le nom de « cellule DUO » a été utilisée (**Figure I. 19**). Deux atmosphères couplées en chaleur et humidité ont été imposées sur les deux côtés des murs en deux types de béton de chanvre qui font $90 \times 90 \times 10 \text{ cm}^3$ de dimensions. Dans cette étude, l'objectif a été d'étudier la réponse hygrothermique de béton de chanvre numériquement et expérimentalement en évaluant l'effet de plusieurs paramètres. En effet, différentes conditions cycliques en température et humidité relative ont été appliquées de part et d'autre de la paroi. Les résultats consistent dans la détermination des profils de température, d'humidité relative et de densité de flux thermique. Un très bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux a été obtenu. En outre, 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 [[Abbas, 2021](#)].



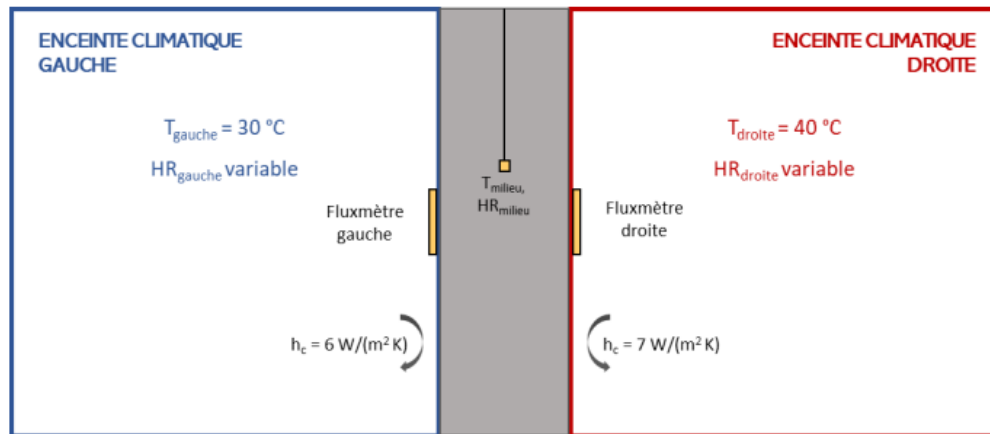


Figure I. 19 : Enceintes climatiques de couplage hydrothermique [Abbas, 2021]

1. 5. 2. 3 A l'échelle du bâtiment

El Fgaier (2013) a étudié le comportement hydrothermique d'un bâtiment test construit en briques de terre crue dans des conditions climatiques réelles (**Figure I. 20**). Les résultats des essais in situ, ont montré les bonnes qualités hydrothermiques des briques de terre crue et leur contribution dans le confort hydrothermique dans les constructions. Les capacités de sorption et thermique sont respectivement de 3,5% et 75 kJ/ (m². K), contribuant ainsi au confort dans la maison expérimentale.



Figure I. 20 : Bâtiment test construit en briques de terre crue [El Fgaier, 2013]

Hibouche (2013) a suivi le comportement hydrothermique d'un bâtiment R+1 prototype en béton de terre « Cématerre ». Les murs ont 40 cm d'épaisseur et 7m de hauteur. Ce bâtiment est situé en Haute Normandie, en France dans la région Havraise. Il a été instrumentalisé avec une quarantaine de capteurs au total permettant de mesurer en continu la déformation, la température et l'hygrométrie au sein des parois (**Figure I. 21**). Les premiers enregistrements montrent que le matériau « Cématerre » tient ses promesses en termes de comportement mécanique et hydro-thermique.



Figure I. 21 : Bâtiment R+1 prototype en béton de terre « Cématerra » [Hibouche, 2013]

I. 5. 3 Modélisations numériques des transferts couplés hygrothermiques

La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité est un axe de recherche important dans le domaine des bâtiments suite notamment à l'évolution des réglementations en vigueur. D'une part, on trouve dans la littérature de nombreux modèles qui ont été développés pour une meilleure description des transferts couplés hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction, et les dernières décennies ont connu l'émergence de nombreux modèles HAM (Heat, Air and Moisture). La différence entre ces modèles HAM réside dans le choix des hypothèses adoptées et surtout dans les moteurs de transferts considérés. Parmi les modèles HAM de référence existant dans la littérature on peut citer le modèle de [Philip et De Vries, 1957, Luikov, 1964 et Künzle, 1995]. D'autre part, il y a de nombreux travaux qui ont utilisé la théorie d'homogénéisation pour modéliser les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux. La méthode d'homogénéisation permet la représentation d'un milieu hétérogène à l'échelle microscopique par un milieu homogène équivalent à l'échelle macroscopique ayant le même comportement.

I. 5. 3. 1 Modélisation phénoménologique

➤ **Modèle de Philip & De Vries 1957**

Le modèle de [Philip et De Vries, 1957] décrit les transferts couplés hygrothermiques dans les milieux poreux. Il est fonction de la température et la teneur en eau volumique. Philip et De Vries, ont pris en compte l'effet du gradient de température sur le transfert d'humidité, et pour le transfert de chaleur, ils ont considéré qu'il se fait par conduction thermique et par

évaporation-condensation (transfert thermique lié au changement de phase). Le système d'équations décrivant le modèle de [Philip et De Vries, 1957] est :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D_T \nabla T) + \nabla(D_v \nabla \theta) + \nabla k_1 \quad (\text{I. 17})$$

$$\rho_0 \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + L_v \nabla(D_v \nabla \theta) \quad (\text{I. 18})$$

- θ : teneur en eau volumique [m^3/m^3]
- t : temps [s]
- T : température [K]
- D_T : coefficient de diffusion non isotherme de l'eau liquide [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$]
- D_v : coefficient de diffusion isotherme de la vapeur d'eau [m^2/s]
- k_1 : conductivité hydrique [m/s]
- ρ_0 : masse volumique sèche du matériau [kg/m^3]
- c_p : chaleur spécifique du matériau [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
- λ : conductivité thermique [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
- L_v : chaleur latente de vaporisation [J/kg]

➤ **Modèle de Luikov 1964**

Le modèle de Luikov, (1964) permet de modéliser la théorie des transferts thermo-hydriques dans les matériaux poreux de construction. Ce modèle est une fonction de la température et de la teneur en eau massique. Il met en évidence le phénomène de thermo-diffusion, et considère que la diffusion d'eau liquide et de vapeur d'eau dépend des gradients de teneur en eau, de la pression totale et de la température. Luikov a prouvé qu'il s'agit d'un modèle efficace pour décrire les transferts couplés hygrothermiques, mais son inconvénient réside dans la détermination empirique délicate du paramètre de séparation d'échelle ε . Les équations unidirectionnelles aux dérivées partielles du modèle de Luikov sont exprimées comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(D_m \cdot \nabla u) + \delta_s \cdot \nabla T \quad (\text{I. 19})$$

$$\rho_0 \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(D_T \cdot \nabla T) + L_v \cdot \beta \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{I. 20})$$

- u : teneur en eau massique [kg/kg]
- t : temps [s]
- $D_m = D_v + D_l$ [m^2/s] : coefficient de diffusion totale (vapeur + liquide)

- $\delta_s = (D_{vT} + D_{IT}) / (D_v + D_l)$: coefficient thermodiffusion
- T : température [K]
- ρ_0 : masse volumique sèche du matériau [kg/m^3]
- c_p : chaleur spécifique du matériau [J/ (kg. K)]
- L_v : Chaleur latente de vaporisation [J/kg]
- β : Paramètre de séparation d'échelle

➤ **Modèle de Künzel 1995**

Le modèle de Künzel, (1995) est un modèle de couplage hygrothermique qui est fonction de la température et de l'humidité relative. Pour le transfert de masse, le transfert de vapeur d'eau est dû au gradient de pression de vapeur et le transfert d'eau liquide se fait sous l'effet des forces capillaires. Le transfert de chaleur est régi par la conduction thermique et par le phénomène physique de changement de phase évaporation-condensation. Ce modèle est déjà utilisé dans le logiciel WUFI (Wärme und Feuchte Instationär) développé par Fraunhofer Institut Bauphysik (IBP, Allemagne). Il représente depuis longtemps l'un des outils commerciaux les plus utilisés dans la simulation numérique 1D et 2D des transferts couplés hygrothermiques. Il peut être aussi implémenté dans des logiciels de résolution numériques des équations aux dérivées partielles comme par exemple **COMSOL Multiphysics** qui offre la possibilité d'intégrer simultanément plusieurs équations couplées. Les équations unidirectionnelles de Künzel qui régissent les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux sont définies comme suit :

$$\rho_0 \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\text{HR} \cdot p_{\text{sat}}) \right) \quad (\text{I. 19})$$

$$\xi \cdot \frac{\partial \text{HR}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\varphi \cdot \frac{\partial \text{HR}}{\partial x} + \delta_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\text{HR} \cdot p_{\text{sat}}) \right) \quad (\text{I. 20})$$

- ρ_0 : masse volumique apparente sèche [kg/m^3]
- c_p : chaleur spécifique du matériau [J/ (kg. K)]
- T: température en [K]
- HR : humidité relative
- $\xi = \frac{\partial w}{\partial \text{HR}}$: dérivée de l'isotherme de sorption/désorption
- w : teneur en eau du matériau [kg/m^3]
- p_{sat} : pression de vapeur saturante [Pa]
- λ : conductivité thermique du matériau [W/ (m. K)]

- D_{ϕ} : coefficient de diffusion d'eau liquide [kg/ (m. s)]
- δ_v : perméabilité à la vapeur du matériau [kg/ (m. s. Pa)]
- L_v : chaleur latente de vaporisation [J/kg].

➤ **Comparaison entre les trois modèles (Philip & De Vries 1957, Luikov 1964, Künzel 1995)**

Tableau I. 3: Comparaison entre les modèles de transferts couplés hygrothermiques [Abbas, 2021]

Modèles	Moteurs de transferts	Phénomènes pris en compte	Commentaires	Résultats
Philip & De Vries 1957	Teneur en eau volumique T (°C)	Masse : vapeur d'eau (diffusion moléculaire), écoulement liquide Chaleur : conduction et transfert de chaleur latente (changement de phase vapeur / liquide)	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 Abass (2021)	Profils de températures et de teneur en eau massique - Flux thermique et massique
Luikov 1964	Teneur en eau massique T (°C)	Masse : vapeur (diffusion), écoulement liquide, pression Chaleur :	Transferts convectif et radiatif négligés. Pression non négligée mais difficulté de définition des paramètres (Trabelsi, 2010). La teneur en eau	Profils de températures et de teneur en eau massique -

			Changement de phase (vapeur / liquide)	est une variable discontinue aux limites des couches qui compliquent les calculs [Künzel, 1995 ; Abass, 2021]	Flux thermique et massique
Künzel 1995	T (°C)	Humidité relative (%)	<p>Masse : vapeur d'eau (diffusion), pression de vapeur d'eau, écoulement liquide (diffusion et conduction)</p> <p>Chaleur : conduction thermique et transfert de chaleur latente</p>	Modèle de Fick qui néglige l'effet de la température sur le transfert de masse (liquide + vapeur) ainsi que les transferts convectif et radiatif Abass (2021)	<p>Profils de température et de teneur en eau massique</p> <p>-</p> <p>Flux de température et d'humidité relative</p>

I. 5. 3. 2 Théorie d'homogénéisation

Modéliser les transferts hygrothermiques dans des matériaux de construction hétérogènes est une tâche complexe. Pour cela, la théorie d'homogénéisation peut être une solution pour s'affranchir de cette difficulté. Le principe de cette méthode est de passer d'un milieu hétérogène à l'échelle microscopique, où la description des phénomènes physiques se fait par exemple à l'échelle du pore, à un milieu homogène équivalent à une échelle macroscopique ayant le même comportement, comme par exemple celle du matériau au sein de l'ouvrage (Figure I. 22).

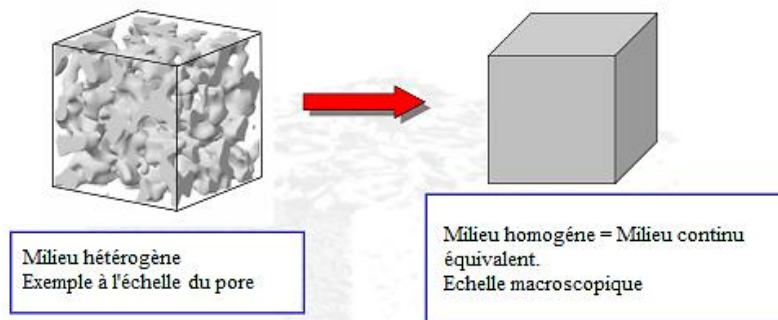


Figure I. 22 : Principe de la théorie d'homogénéisation

Il existe trois types de méthodes d'homogénéisation Mchirgui (2012) :

- Homogénéisation périodique
- Homogénéisation des milieux à microstructure aléatoire
- Homogénéisation par prise de moyenne

L'une des méthodes la plus utilisée dans la littérature, est la méthode d'homogénéisation périodique qui est basée sur des développements asymptotiques [Bennai \(2017\)](#). Cette approche d'homogénéisation asymptotique, telle qu'elle a été expliquée par [Auriault \(1991\)](#), est basée sur l'analyse des paramètres adimensionnels qui gouvernent les processus physiques. Son objectif est de dériver le modèle macroscopique homogène, les paramètres effectifs et l'équation de transport macroscopique à partir d'une description microscopique des phénomènes de transfert. Les modèles macroscopiques résultants sont physiquement et mathématiquement rigoureux et leur domaine de validité est bien défini [[Auriault, 1991](#) ; [Lewandowaska et al., 2004](#) ; [Szymkiewicz Burzyński, 2005](#) ; [Mchirgui et al., 2010](#) ; [Bennai et al., 2016](#)]. [Lewandowaska et al. \(2004\)](#) ont étudié le transfert d'eau dans le milieu à double porosités en utilisant les équations de Richards. Le milieu a été divisé en deux sous-domaines poreux, avec un contraste de perméabilité à l'eau élevé. La perméabilité effective à l'eau ainsi que l'équation macroscopique de Richards ont été identifiées pour deux types de géométries de pores, respectivement parallèles et perpendiculaires à la direction du flux. Les résultats ont été comparés avec l'approche phénoménologique de [Gerke et Van Genuchten](#). Les résultats sont discutables, car ils dépendent des paramètres choisis, tels que le terme source suggéré dans le modèle de [Gerke et Van Genuchten](#) [[Lewandowaska et al., 2004](#)]. [Mchirgui \(2012\)](#) a aussi appliqué la méthode d'homogénéisation périodique dans le cas des transferts hydriques (liquide et vapeur) dans des matériaux cimentaires partiellement saturés en eau. Cette étude est basée sur les équations de continuité de l'eau liquide et de vapeur d'eau. La modélisation est composée de trois parties : transfert hydrique de l'eau liquide qui correspond à un transfert pour des humidités relatives élevées (convection d'eau liquide prédominante), transfert hydrique de vapeur d'eau qui correspond à un transfert pour des humidités relatives faibles (diffusion de vapeur d'eau prédominante) et transfert hydrique sous deux formes liquide et vapeur (diffusion de vapeur d'eau et convection d'eau liquide du même ordre de grandeur) qui correspond à un transfert pour des humidités relatives intermédiaires. Le modèle de [Mchirgui \(2012\)](#) a permis de justifier rigoureusement l'équation de Richards et d'obtenir une expression analytique du tenseur de diffusion d'humidité homogénéisé [Bennai \(2017\)](#). [Mchirgui \(2012\)](#) a comparé ses résultats de la théorie d'homogénéisation avec des résultats des essais expérimentaux réalisés par [Trabelsi \(2010\)](#) a montré qu'il y a un bon accord entre les résultats.

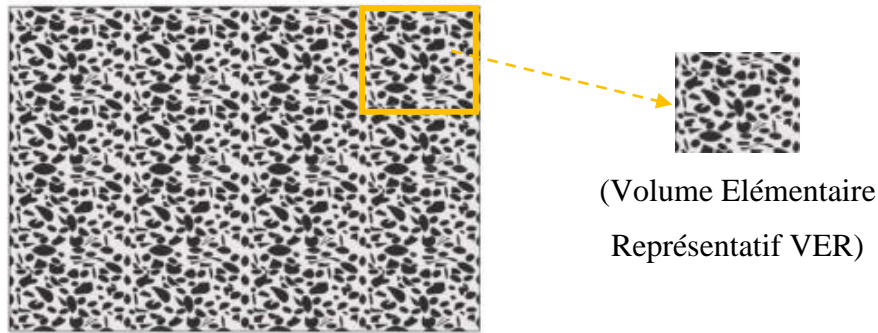


Figure I. 23 : Microstructure composée de plusieurs volumes élémentaires répétitifs [Mchirgui, 2012]

[Bouddour et al. \(1998\)](#) ont travaillé sur plusieurs modèles de transferts hydrothermiques dans les milieux poreux correspondant à différentes configurations physiques (diffusion de vapeur prédominante, convection de chaleur prédominante...) en se basant sur la méthode d'homogénéisation périodique. Les pores représentent l'hétérogénéité dans cette étude. Le principal avantage de l'étude de [Bouddour et al. \(1998\)](#) est l'utilisation d'un traitement systématique, rigoureux et unifié pour fournir une compréhension générale de toutes les interactions impliquées par les différents transferts de chaleur et de masse. Les résultats obtenus à l'aide de la théorie d'homogénéisation sont les équations de transferts hydrothermiques homogénéisées ainsi que les coefficients de diffusion de chaleur et d'humidités homogènes équivalents. [Bennai \(2017\)](#) a utilisé la méthode d'homogénéisation périodique pour modéliser des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans des matériaux poreux non saturés. Les pores représentent les hétérogénéités dans cette étude. La théorie d'homogénéisation est développée en se basant sur les équations de continuité de masse et les équations de conservation d'énergie pour les transferts de chaleur. Comme résultat, [Bennai \(2017\)](#) a proposé les coefficients de diffusion hydrique et de conductivité thermique homogénéisés ainsi que les équations unidirectionnelles de transferts hydrothermiques homogénéisées :

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} - \text{div}_x(D_\theta \text{grad}_x \theta_1 + D_T \text{grad}_x T - D_P \text{grad}_x P) = 0 \quad (\text{I. 21})$$

$$C^{\text{hom}} \frac{\partial T^0}{\partial t} - \text{div}_x(\alpha_t \text{grad}_x T + \delta_t \text{grad}_x \theta_1 + \alpha_t \text{grad}_x P) - h_v m_g = 0 \quad (\text{I. 22})$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} - \text{div}_x(K_{P,P} \text{grad}_x P + K_{\theta,P} \text{grad}_x \theta_1 + K_{T,P} \text{grad}_x T) - m_g = 0 \quad (\text{I. 23})$$

- C^{hom} : Capacité thermique volumique homogénéisée [$J / (m^3 \cdot K)$]
- P : Pression totale [Pa]
- T : Température [K]
- t : Temps [s]
- θ : Teneur en eau

- K [m/s] : Conductivité hydraulique du matériau
- D_θ [m²/s] : Coefficient de diffusion d'humidité isotherme
- α_t [m²/s] est le coefficient traduisant l'advection thermique due au gradient de pression totale
- δt [kg / (m. s)] Coefficient de transfert thermique macroscopique dû au gradient d'humidité
- $h_v m_g$: Taux de changement de phase macroscopique

Les études mentionnées ci-dessus ont utilisé la théorie d'homogénéisation périodique dans les milieux poreux dont les pores représentent toujours les hétérogénéités ; ce qui limite l'application de ces travaux sur des matériaux composites fibrés dont les fibres représentent les hétérogénéités.

I. 6 Transferts hygrothermiques dans les matériaux bio-sourcés

Aujourd'hui, de nombreux travaux de recherches sur les transferts hygrothermiques dans les matériaux biosourcés tel que la terre crue, le béton de chanvre, le bois et les fibres végétales sont menées pour leur utilisation dans le domaine de construction afin de réduire la consommation d'énergie et améliorer le confort hygrothermique des bâtiments. On se focalise dans cette partie sur les travaux de la littérature relatifs aux transferts hygrothermiques séparément dans les matériaux de construction à base de terre crue et des fibres végétales.

I. 6. 1 Terre crue

Cagnon et al. (2014) ont déterminé les isothermes d'adsorption de cinq briques en terre crue caractérisées par différentes minéralogies d'argile à l'aide de la méthode des solutions salines saturées en sel et la méthode de sorption de vapeur dynamique (SVD). Un bon accord entre les résultats des deux méthodes a été trouvé. La masse d'humidité stockée par les échantillons varie entre 4 et 6%, ce qui correspond à 80 et 100 kg/m³ pour une humidité de 97%. En comparant ces résultats avec ceux de la littérature, on remarque que les briques étudiées ont une bonne capacité de sorption hygrométrique. Hall et Allinson, (2009) ont étudié les isothermes d'adsorption du pisé stabilisé avec 6% du ciment en utilisant la méthode des solutions salines. Les résultats ont montré que la masse d'humidité stockée par les échantillons varie entre 25 et 50 kg/m³ pour une humidité de 95%.

En ce qui concerne la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux en terre crue, [Dondi et al. \(2003\)](#) ont évalué l'effet de la porosité sur le transfert de la vapeur d'eau à travers les briques en terre crue. En utilisant la méthode de la coupelle, la perméabilité à la vapeur des échantillons varie de 3 à 13×10^{-12} kg/m. s. Pa. Les résultats, ont montré que ce paramètre dépend de la microstructure, de la taille et de la surface spécifique des pores, déterminés à l'aide d'un prosimètre à intrusion de mercure. De plus, les auteurs ont proposé un modèle statistique afin de prédire la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de la porosité, la densité apparente, la taille moyenne des pores et les valeurs de surface spécifique des pores. Ils ont conclu que la perméabilité à la vapeur d'eau des briques de terre crue est (i) en corrélation positive avec la taille moyenne des pores et la porosité ouverte, (ii) en corrélation négative avec la densité apparente et la surface spécifique des pores (**Figures I. 24 et I. 25**).

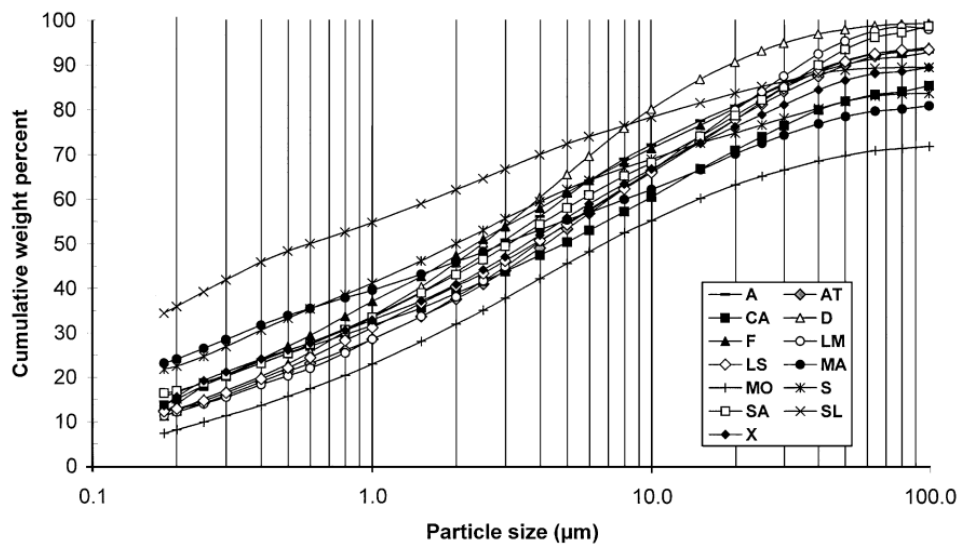


Figure I. 24 : Courbes granulométriques des briques de terre crue étudiées

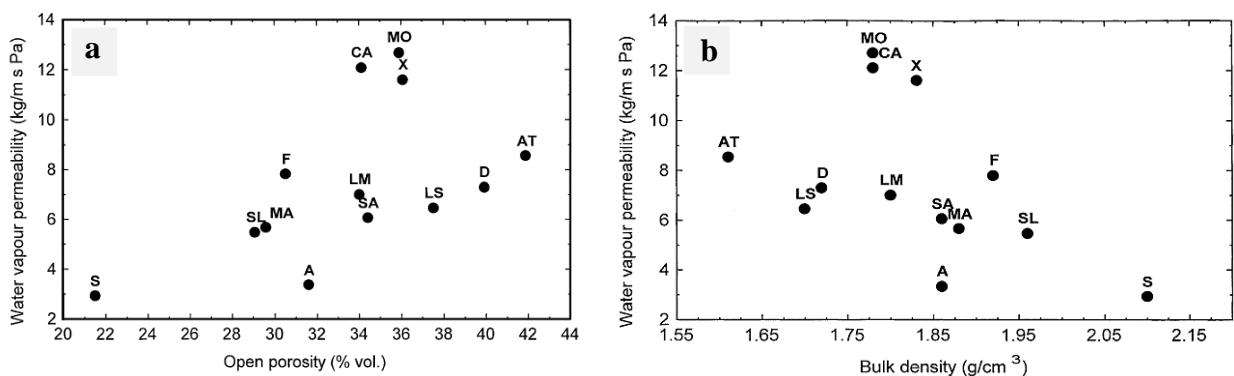


Figure I. 25 : Courbes d'évolution de la perméabilité à la vapeur en fonction : (a) porosité ouverte, (b) densité apparente

[Cagnon et al. \(2014\)](#) ont utilisé la méthode des coupelles sèches et humides pour la détermination de la perméabilité à la vapeur δ_v et du facteur de résistance μ des briques de terre

crue composées de différents types d'argile : montmorillonite, chlorite, illite et kaolinite. Les résultats de la coupelle sèche montrent que la perméabilité à la vapeur pour les cinq briques varie entre 1.0 et 2.7×10^{-11} kg/m. s. Pa ce qui correspond à un facteur de résistance variant entre 7 et 19 respectivement. Pour la méthode de la coupelle humide, les valeurs de la perméabilité à la vapeur sont plus élevées et elles varient entre de 2.7 à 6.2×10^{-11} kg/m. s. Pa ce qui correspond à un facteur de résistance variant entre 3 et 7 respectivement. En comparaison avec les résultats de la littérature, ceux de [Cagnon et al. \(2014\)](#) ont confirmé la capacité des briques de terre à réguler l'humidité intérieure des bâtiments. [Mc. George et al. \(2014\)](#) ont étudié plusieurs types de terres crues, de différentes propriétés physiques tels que la densité du sol, la perméabilité à la vapeur d'eau, les isothermes de sorption pour déterminer leur influence sur le pouvoir tampon de l'humidité (la capacité du matériau à stocker l'humidité). Ils ont conclu que la minéralogie et la distribution de la taille des particules ont un effet plus important sur le pouvoir tampon que la densité et les méthodes de préparation ou la stabilisation. [Bodian \(2019\)](#) a étudié les transferts de vapeur d'eau dans des briques en terre crue en utilisant le dispositif Gravitest. Les composants principaux des différentes briques sont l'argile, le limon et le sable. L'effet d'ajout de pourcentage latérite a été envisagé. Les résultats montrent que la perméabilité à la vapeur d'eau augmente légèrement avec l'ajout de la latérite. [El Fgaier et al. \(2016\)](#) ont étudié les caractéristiques hygrothermiques de trois types de briques en terre crue. Des murs expérimentaux ont été construits afin d'analyser leur comportement en conditions réelles. Les résultats ont montré que les capacités de sorption et thermique sont respectivement de 3,5% et $75 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$, contribuant ainsi au confort dans la maison expérimentale.

Concernant les transferts thermiques, [Cagnon et al. \(2014\)](#) ont étudié l'effet de degré de saturation sur la conductivité thermique de cinq briques en terre crue à l'aide du dispositif « Plaque chaude gardée ». Les résultats ont montré une corrélation linéaire pour des degrés de saturation légèrement bas, par contre ils sont dispersés pour des degrés de saturation élevés (**Figure I. 26**). De plus un autre appareil thermique « Appareil Desprotherm » a été utilisé pour mesurer la conductivité thermique des briques à l'état sèche. Une bonne concordance entre les résultats des deux dispositifs « Plaque chaude gardée » et « Desprotherm » a été obtenue. La conductivité thermique varie de 0.47 à 0.59 W/ (m. K) pour la première méthode et de 0.40 à $0,69 \text{ W/ (m. K)}$ pour la deuxième méthode. Les valeurs de la conductivité thermique sont très faibles par rapport à celles de la littérature, ce qui confirme la capacité isolante du matériau étudié.

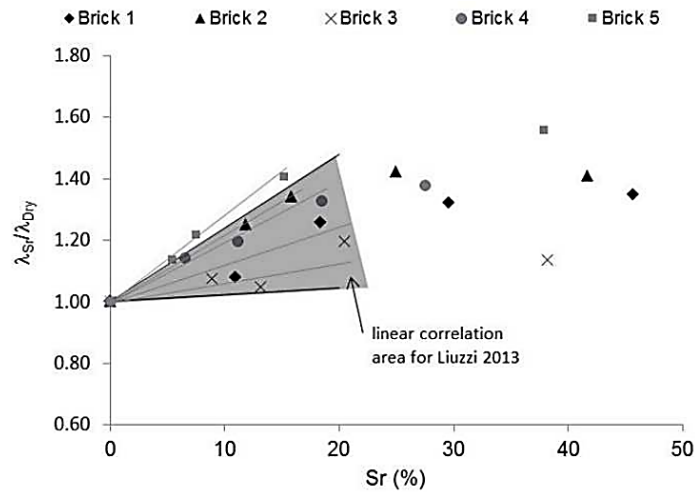


Figure I. 26 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de degré de saturation du matériau [Cagnon et al., 2014]

Medjelekh et al. (2017) ont étudié les transferts thermiques dans des briques en terre crue en fonction de la teneur en eau. Les résultats montrent une relation linéaire entre la conductivité thermique du matériau et la teneur en eau qui varie entre 0 et 6% comme le montre la **Figure I. 27**. Plus le matériau est saturé, plus il est conducteur à la chaleur.

$$\lambda(w) = 6,13 \cdot w + 0,67 \quad (R^2 = 0,88)$$

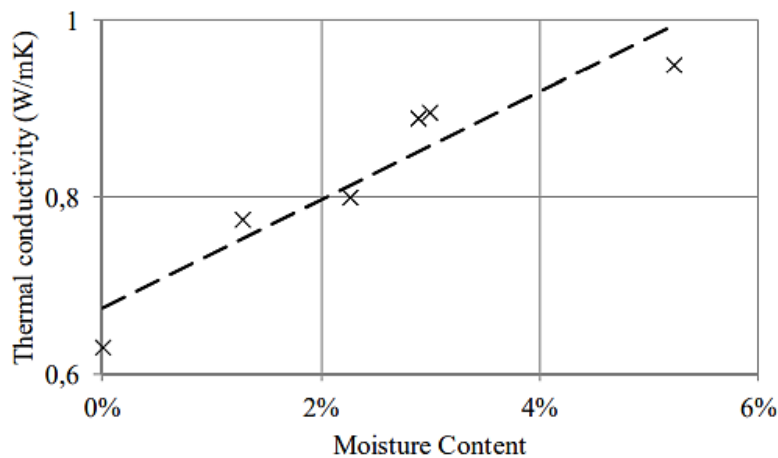


Figure I. 27 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau [Medjelekh et al., 2017]

Ben Mansour et al. (2016) ont étudié expérimentalement l'effet de la pression de compactage et donc la densité du matériau sur les propriétés thermiques de briques de terre compactées. Les résultats montrent que la densité apparente a une forte influence sur le comportement thermique (**Figure I. 28**).

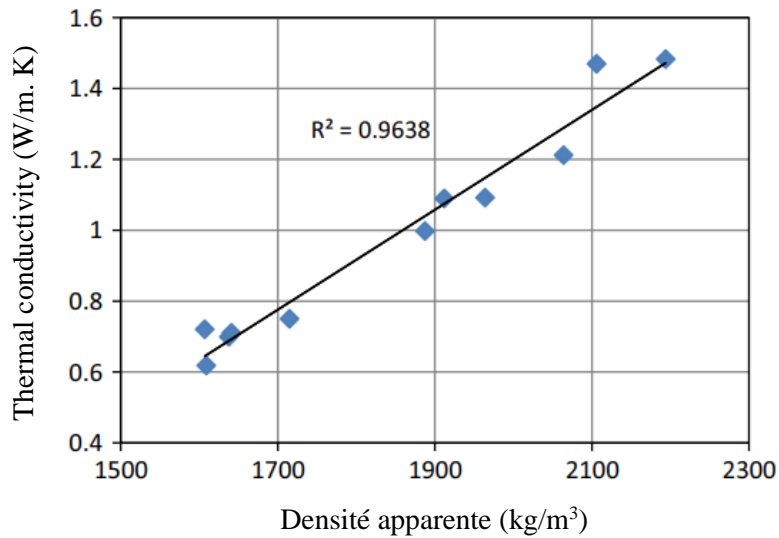


Figure I. 28 : Evolution de la conductivité en fonction de la densité [Ben Mansour et al., 2016]
 Zhang et al. (2018) ont évalué l'effet de la densité sur la conductivité thermique des briques en terre crue. Les briques sont composées de 17% argile, 51% Limon et 32% Sable. Les conductivités thermiques sont de l'ordre de 0.55, 0.68, 0.86 et 0.99 W/(m. K) pour des densités de 1500, 1700, 1900 et 2100 kg/m³ respectivement. Ces résultats montrent l'effet de la densité sur le transfert de chaleur ; plus un matériau est dense moins il est isolant (**Figure I. 29**).

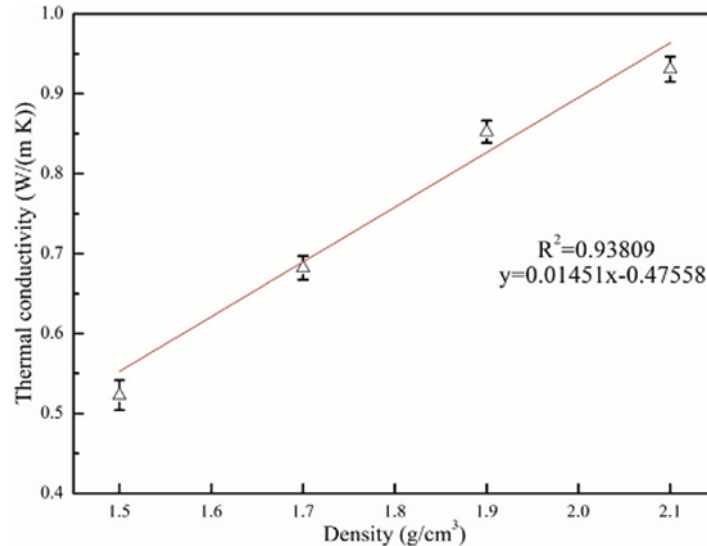


Figure I. 29 : Evolution de la conductivité en fonction de la densité [Zhang et al., 2018]

I. 6. 2 Fibres végétales

Afin d'améliorer le comportement mécanique des matériaux de construction à base de terre crue, plusieurs recherches ont prouvé que l'ajout de fibres végétales répond parfaitement à ce

défi. En effet, elles empêchent la fissuration au séchage, emmagasinent l'excès d'eau et assurent un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres [Hibouche, 2013 ; Phung, 2018]. De plus, l'ajout des fibres allège le matériau ce qui améliore ses propriétés hygrothermiques.

Dans cette partie, on s'intéresse à la caractérisation hygrothermique des fibres végétales. Collet (2004) a étudié les transferts hygrothermiques à travers la laine de chanvre. Les méthodes de la « Plaque chaude gardée » et de la « coupelle » ont été utilisées pour mesurer les transferts thermique et hygrométrique respectivement (**Figure I. 30**). D'après les résultats, ce matériau peut remplacer la laine minérale pour assurer le confort hygrothermique des bâtiments, notamment grâce à une perméabilité à la vapeur d'eau et une conductivité thermique de $5,5 \times 10^{-11}$ kg/ (m. s. Pa) et 0,04 W/ (m. K) respectivement.



Figure I. 30 : Banc de mesure de la perméabilité à la vapeur de la laine de chanvre [Collet, 2004]

Roudier (2012) a mesuré le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans les fibres de lin pour différents gradients d'humidité relative en utilisant la méthode de la « coupelle ». L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de l'humidité sur les propriétés mécaniques des fibres. Les résultats ont montré que le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau augmente avec le gradient d'humidité relative. Cependant, les propriétés mécaniques (module d'Young E, module de cisaillement G, contrainte σ , déformation ε) diminuent lorsque le gradient d'humidité relative augmente par rapport à celles des fibres sèches. Ces résultats ont été utilisés pour valider un modèle analytique hygro-mécanique pour les matériaux composites résine-fibres de lin.

Phung (2018) a déterminé les isothermes d'adsorption/désorption de paille de lin et de paille de blé dans ses travaux de thèse. Les résultats montrent qu'il s'agit des isothermes de type II. Il a

observé trois zones sur l'isotherme d'adsorption/désorption : Zone I correspond à une plage d'humidité de 0 à 10% où la teneur en eau des fibres augmente de 3% par rapport à leur état sec, Zone II correspond à une plage d'humidité de 10 à 50% où la teneur en eau augmente linéairement, Zone III correspond à une plage d'humidité supérieure à 50%. Il a remarqué aussi que le chemin parcouru lors du séchage se situe au-dessus du chemin d'humidification pour les deux types de fibres, ce qui met en évidence un phénomène d'hystérésis. En outre, les résultats montrent que les pailles de blé ont un caractère hydrophile plus fort que celui des pailles de lin et ceci est dû à leur structure plus poreuse.

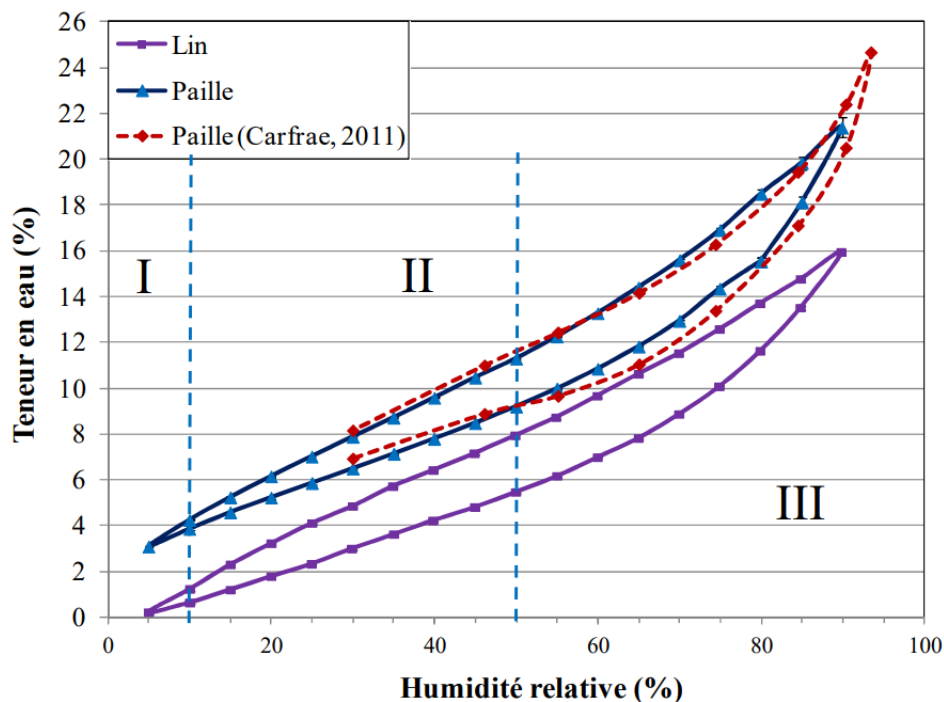


Figure I. 31 : Isothermes d'adsorption des pailles de lin et de blé [Phung, 2018]

Vaikus et al. (2014) ont étudié la capacité isolante des fibres de lin et de chanvre naturelles à l'aide de l'appareil FOX-304 LaserComp. L'effet de la densité ainsi que la longueur des fibres sur la conductivité thermique ont été testés. Les résultats ont montré que la conductivité thermique des fibres de chanvre et de lin dépend de leur densité ainsi que leur méthode de préparation : échantillons en fibres longues ou bien en fibres hachées (Figure I. 31).

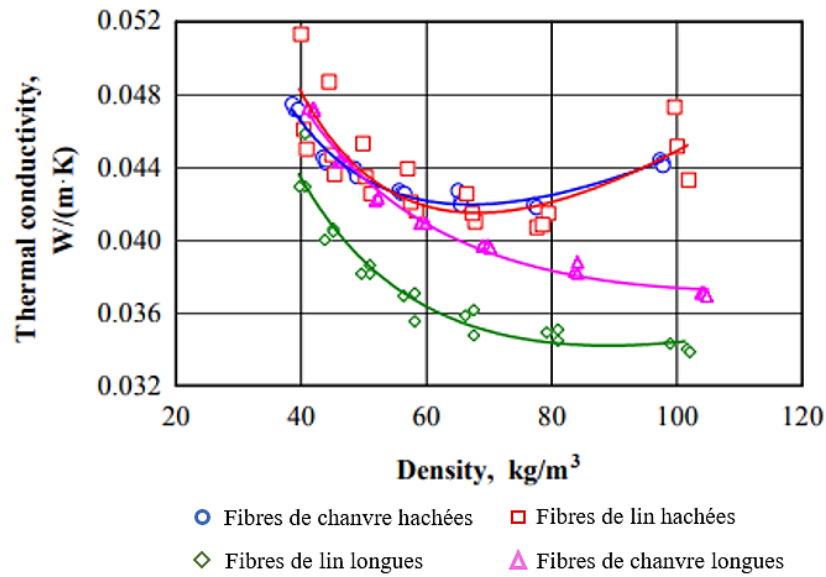


Figure I. 32 : Evolution de la conductivité thermique des fibres de lin et de chanvre en fonction de la densité [Vaikus et al., 2014]

Dallel (2012) a évalué la propriété d'isolation thermique des fibres d'Alfa par la détermination du coefficient de conductivité thermique à l'aide du module thermique Thermolab II (**Figure I. 32**). L'essai est réalisé à une température ambiante de 20°C et a duré 60 secondes. Le principe de l'essai consiste à placer des échantillons de fibres d'Alfa entre deux plaques chaude et froide qui permettent d'imposer un gradient de température. A l'aide de la tension appliquée aux bornes de la plaque chauffante, du gradient de température et des dimensions des échantillons la conductivité thermique a été déterminée. Plusieurs échantillons de même densité ont été testés et d'après les résultats obtenus, la conductivité thermique de l'Alfa est de l'ordre de 0.04 W/ (m. K). Ces résultats confirment la bonne capacité isolante de ces fibres.

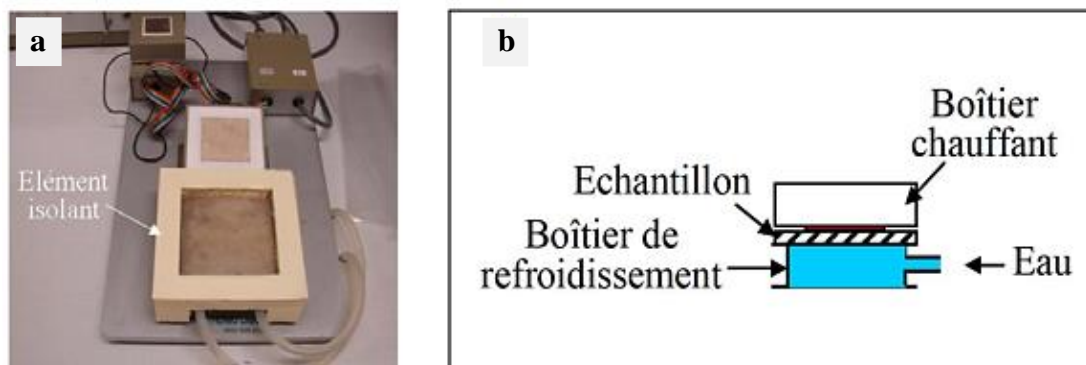


Figure I. 33 : Mesure de la conductivité thermique de fibres d'Alfa - Thermolab II [Dallel, 2012]

I. 6. 3 Transferts hygrothermiques dans les matériaux composites terre crue-fibres végétales

I. 6. 3. 1 Transferts hygrométriques et thermiques

Dans cette partie, on s'intéresse aux transferts hygrométriques et thermiques les matériaux de construction à base de terre crue renforcée par des fibres végétales.

Ashour et al. (2015) ont déterminé les isothermes de sorption pour différents mélanges à base de terre crue, renforcés par 1% et 3% de paille d'orge ou de blé et stabilisés par 5% et 10% de ciment ou de gypse. Par exemple, les briques de terre sans additifs ont stocké une masse d'humidité de 5,35% à 10° C et 4,99% à 40 °C. Les briques renforcées par la paille de blé atteignent une masse de 3,4 - 3,7% pour un pourcentage de fibres de 1% - 3% respectivement à 10°C et de 3.2–3.3% pour un pourcentage de fibres de 1% - 3% respectivement à 40°C. Ils ont conclu que la capacité des matériaux étudiés à stocker l'humidité diminue avec l'augmentation de la température, mais elle augmente avec l'ajout des fibres. Casnedi et al. (2020) ont évalué l'effet de la porosité sur la perméabilité équivalente à la vapeur d'eau de blocs de terre crue composés de différents pourcentages de terre, d'eau, de sable et de fibres de paille. Les résultats expérimentaux sont comparés aux prédictions théoriques obtenues à partir d'un modèle fractal du transport hygrométrique en fonction de la porosité développé par Casnedi et al. (2020). Les résultats expérimentaux et la modélisation sont en bon accord, ce qui rend le modèle fractal prometteur pour aborder la caractérisation hygrométrique des matériaux de construction (**Figure I. 34**).

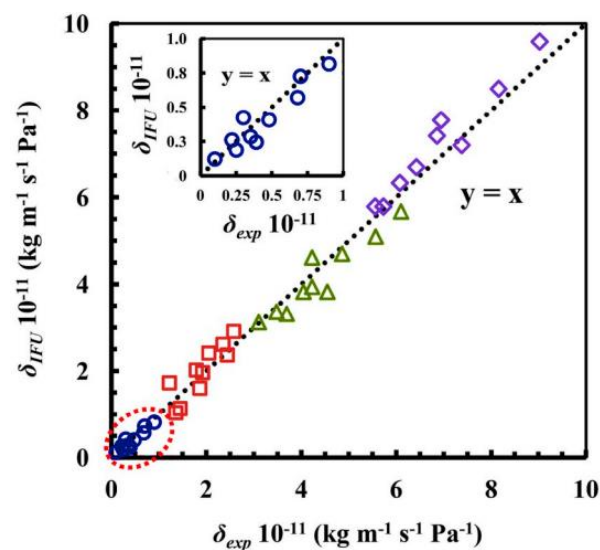


Figure I. 34 : Corrélation linéaire entre les résultats expérimentaux et numériques de la perméabilité à la vapeur de la terre crue renforcée par les fibres de paille [Casnedi et al., 2020]

Simons et al. (2015) ont mesuré le facteur de résistance à la vapeur d'un sol fin sans fibre (0% fibres), avec 3 % et 6 % de paille d'orge. Les échantillons sont de densités 1990, 1520 et 1220 kg/m³ respectivement. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau de ces trois mélanges est de 4,6 pour 0% de fibres ajoutées ; de 4,7 pour 3 % de fibres ajoutées et de 6,3 pour 6 % de fibres ajoutées. On peut remarquer que la présence des fibres influe légèrement sur la perméabilité à la vapeur d'eau du mélange terre-paille d'orge.

L'incorporation des fibres dans la matrice sol, d'après plusieurs recherches, influence fortement la densité sèche du matériau composite et donc sa conductivité thermique. Dans ce contexte, Laurent (1986) a étudié l'effet de la variation de la teneur en fibres de paille de 0.5 à 22% sur la densité sèche du mélange sol-fibres et par la suite sur la conductivité thermique. Les résultats ont montré que l'ajout des fibres de paille introduit une porosité supplémentaire au mélange et donc une diminution de la conductivité thermique comme l'indique les **Figures I. 35 (a) et I. 35 (b)**.

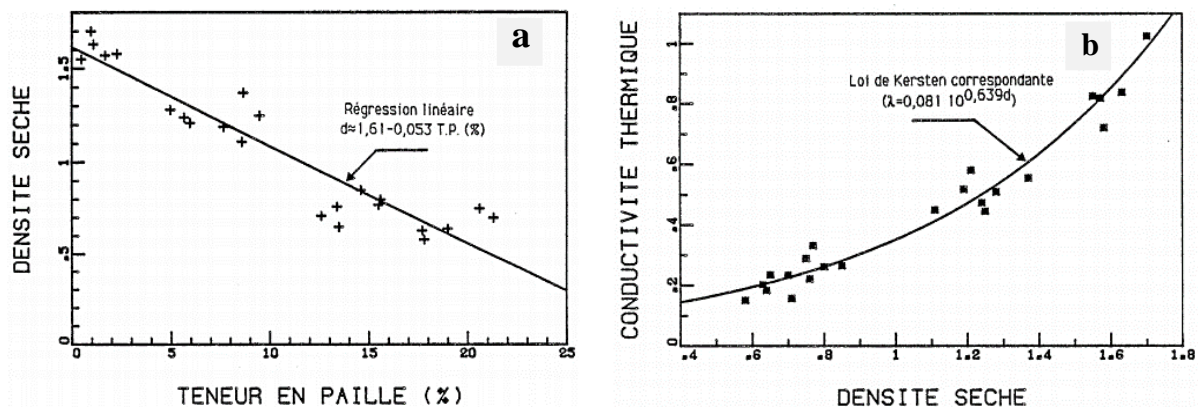


Figure I. 35 : (a) Variation de la densité sèche du matériau composite en fonction de la teneur en fibres, (b) Variation de la conductivité thermiques en fonction de la densité sèche [Laurent, 1986]

De plus, Mazhoud et al. (2021) ont étudié l'effet de l'ajout de fibres de chanvre sur les propriétés hygrométriques et thermiques d'un matériau argileux. L'isotherme de sorption, le pouvoir tampon de l'humidité et la conductivité thermique ont été identifiés. D'après leurs résultats, le matériau composite est classé comme un excellent régulateur hygrométrique et thermique grâce à une gamme de valeurs de stockage d'humidité et de conductivité thermique allant respectivement de 2,07 à 2,33 g/ (m². %RH) et de 0,089 à 0,12 W/ (m. K) en fonction de la teneur en fibres de chanvre. Laborel-Préneron et al. (2018) ont étudié l'effet de l'ajout de fibres végétales aléatoires sur le comportement hygro-thermique de briques de terre crue. La perméabilité à la vapeur d'eau et la conductivité thermique de la terre crue seule et de six

formulations en terre renforcée par 0%, 3% et 6% de chènevotte de chanvre, de paille d'orge et d'épi de maïs ont été évaluées par la méthode du godet. Les résultats ont montré que la perméabilité à la vapeur d'eau de la terre seule est plus élevée que celle de la terre mélangée avec les trois types de fibres végétales. Ainsi, l'ajout de fibres dans la matrice de terre brute n'est pas bénéfique. Cependant, une forte diminution de 75% de la conductivité thermique en comparaison avec la terre sans fibres a été observée pour 6% d'agrégats végétaux ajoutés.

D'un autre côté, l'effet de la teneur en eau sur les propriétés thermique a été étudié par plusieurs auteurs. [Laurent \(1986\)](#) a montré qu'une diminution de la teneur en eau de 17 % à 6 % d'une argile de densité sèche 1600 kg/m^3 engendre une diminution de 52% de la conductivité thermique (de 1,22 à 0,63 W/ (m. K)). [Hibouche \(2013\)](#) a mesuré la perméabilité à la vapeur d'eau par la méthode des coupelles d'un béton de terre crue composé de limon, de liants minéraux et de fibres naturelles de lin. Les résultats ont montré que ce matériau a une perméabilité à la vapeur de l'ordre de $7.64.10^{-12} \text{ kg/(m. s. Pa)}$. Il est 10 à 100 fois plus perméable à la vapeur que les matériaux classiques tels que le béton de ciment, le plâtre ou les briques de terre cuite. De plus, [Hibouche \(2013\)](#) a étudié l'effet de la teneur en eau du matériau sur la conductivité, la capacité et la diffusivité thermiques. Deux dispositifs expérimentaux ont été utilisés pour cette étude, la boîte chaude et le boîtier KD2 Pro. Une corrélation linéaire entre la teneur en eau et les propriétés thermiques indiquées ci-dessus a été obtenue par les deux dispositifs (**Figure I. 36**).

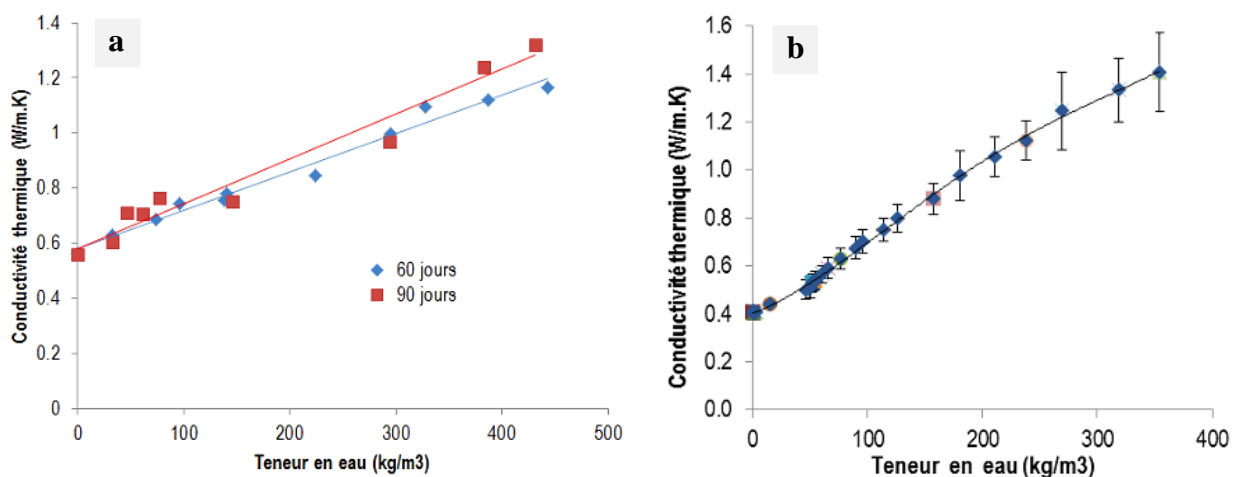


Figure I. 36 : Variation de la conductivité thermique du béton de terre en fonction de la teneur en eau (a) à l'aide de la boîte chaude, (b) à l'aide du boîtier KD2 Pro [[Hibouche, 2013](#)]

[Allinson et Hall, 2012](#) ont déterminé expérimentalement les propriétés hygrothermiques de trois types de pisé (SRE) : 613 SRE qui est composé de 60% sable, 10% gravier et 30% argile

limoneux, 433 SRE qui est composé de 40% sable, 30% gravier et 30% argile limoneux et 703 SRE qui est composé de 70% sable et 30% argile limoneux qui sont de densités 2020, 2120 et 1980 kg/m³ respectivement. Les résultats sont résumés dans le **Tableau I. 4**. Ils montrent que les trois pisés étudiés sont de bons matériaux tampons pour l'humidité et fournissent de bons niveaux de climatisation passive intégrée au bâtiment.

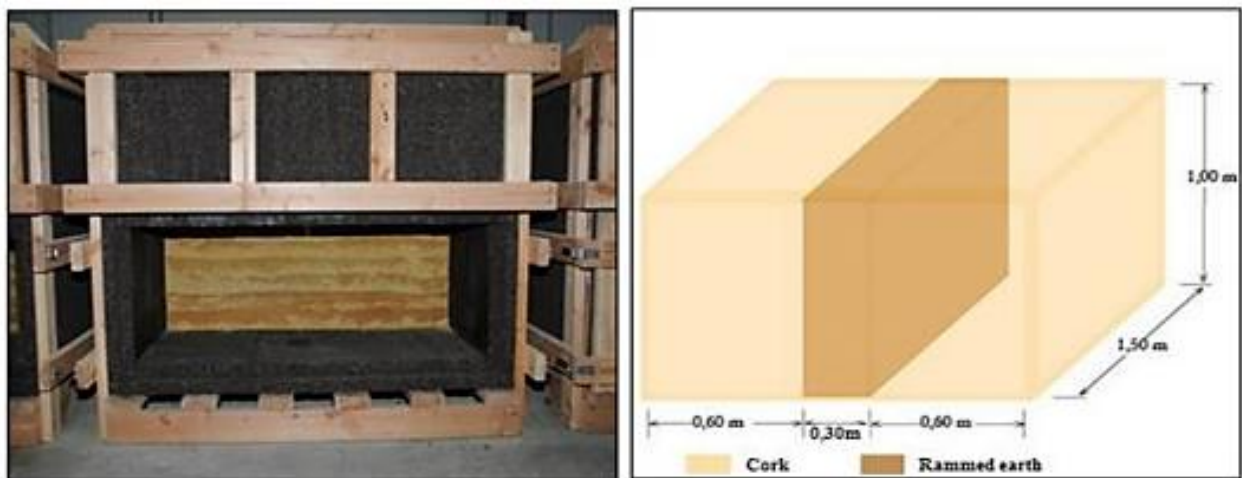
Tableau I. 4 : Propriétés hygrométrique et thermique de pise [Allinson et Hall, 2012]

	Densité (kg/m ³)	Capacité thermique (J/ (kg. K))	Capacité à stocker l'humidité (kg/kg)	Perméabilité à la vapeur (kg/ (m. s. Pa))
613 SRE	2020	868	0.01186	1.27.10 ⁻¹¹
433 SRE	2120	868	0.01292	5.75.10 ⁻¹²
703 SRE	1980	868	0.00890	1.88.10 ⁻¹¹

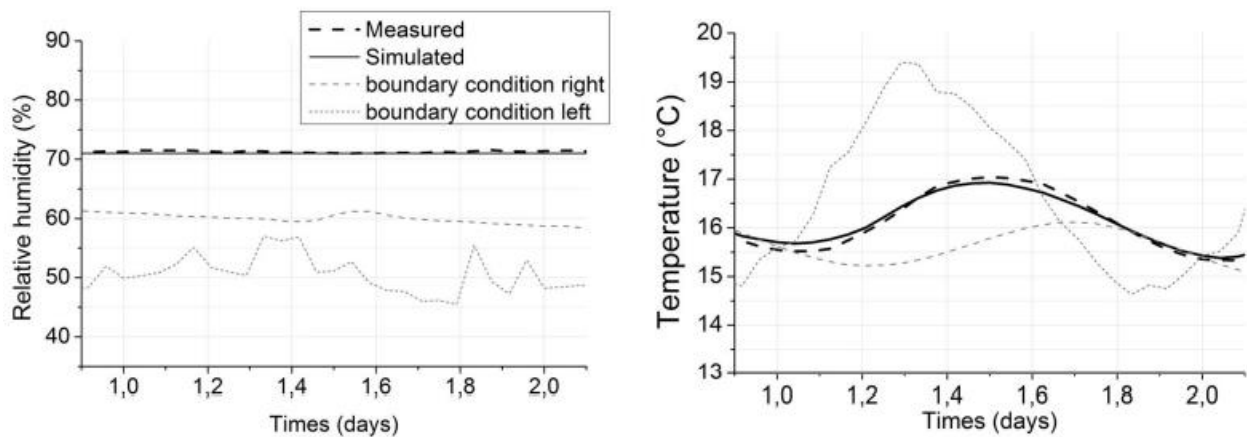
I. 6. 3. 1 Transferts couplés hygrothermiques

Hibouche (2013) a simulé les transferts couplés hygrothermiques dans un béton de terre crue en se basant sur le modèle de Künzel. Les propriétés thermiques et hygrométriques ont été déterminées expérimentalement à l'aide de la méthode de la coupelle et deux dispositifs thermiques « la boîte chaude » et « le boîtier KD2 Pro » comme mentionné précédemment. Ces résultats expérimentaux ont été utilisés par la suite pour alimenter le modèle de Künzel. Dans un premier temps, ce dernier a été implémenté dans le logiciel Comsol Multiphysics et validé par le biais du modèle Benchmark- cas n°2. Dans un second temps, les profils d'humidité relative, température et flux thermique dans le béton de terre crue ont été déterminés et comparés à ceux du béton de ciment classique. Les résultats de la comparaison ont permis de conclure que le béton de terre est plus performant en terme de confort hygrothermique que le béton de ciment (deux et trois fois plus respirant et isolant que le béton de ciment). Soudani (2016) a mesuré les propriétés hygrothermiques du pisé tels que la conductivité thermique, le coefficient de diffusion de vapeur d'eau, les isothermes de sorption à l'aide de différents dispositifs expérimentaux (**Figure I. 37**). Les résultats ont montré que le pisé est caractérisé par une conductivité thermique qui varie entre 0.6 et 2.4 W/ (m. K) pour une teneur en eau allant de 0% à 19% et d'un coefficient de diffusion de vapeur d'eau de 2.7.10⁻⁶ m²/s. Les différents paramètres hygrothermiques mesurés, ont été utilisés par la suite pour alimenter le modèle de Künzel pour étudier les transferts couplés hygrothermiques dans un mur en pisé de 1×1.5×0.3 m³ de dimensions. Tout d'abord, le modèle numérique a été calibré à l'aide des modèles de

Benchmark. Ensuite, et à l'aide de deux enceintes climatiques, il a été validé expérimentalement par un essai de couplage hygrothermique a été mis en place en gardant les mêmes conditions de modélisation. Les résultats ont montré un bon accord pour le profil de température mesuré et simulé au milieu du mur. Un petit décalage de temps a été observé entre les deux profils et cela peut être dû à l'estimation approximative de la capacité thermique du matériau comme le signalent les auteurs. Cependant, pour le profil de l'humidité relative, les résultats numériques et expérimentaux ont dépassé les conditions aux limites imposées en humidité relative. Ceci est peut être dû à des phénomènes de condensation d'humidité à l'intérieur du matériau.



(a)



(b)

Figure I. 37 : (a) Enceintes climatiques pour la caractérisation hygrothermique du mur en pisé, (b) Profils expérimentaux et numérique de l'humidité relative et la température en fonction du temps [Soudani, 2016]

Chabriac (2014) a étudié les transferts couplés hygrothermiques à travers un mur en pisé. Le mur est de dimensions $1 \times 1.5 \times 0.5 \text{ m}^3$ et placé entre deux enceintes climatiques. Cette étude a mis en évidence l'effet du couplage hygrothermique. En effet, le mur a été soumis à des

conditions périodiques en température et humidité relative et à l'aide de sondes hygrothermiques, les profils de température et d'humidité en différentes épaisseurs du mur ont été déterminés. D'après les résultats, des baisses de température ont été observées et accompagnées d'augmentation des taux d'humidité dans le mur de pisé, ce qui met en évidence le phénomène de condensation/évaporation dû au couplage hygrothermique dans le modèle réduit du mur en pisé. [Chabriac \(2014\)](#) en a déduit que le changement de phase de l'eau dans le pisé a un impact sur le comportement thermique du pisé et que ce phénomène doit être pris en compte pour une bonne évaluation des performances thermiques d'un bâtiment. Cependant, l'impact de ce changement de phase dépend fortement des conditions aux limites et de l'état du mur et requiert donc l'utilisation d'un modèle hygrothermique couplé pour une évaluation précise du comportement hygrothermique des matériaux de construction.

[Alioua et al. \(2019\)](#) ont étudié les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans un matériau composite (DPC) composé de sable, ciment et renforcé par 15 % en poids de fibres de palmier dattier. Cette étude est scindée en deux parties, une numérique et une autre expérimentale. Deux modèles mathématiques (Modèle de [Künzel 1995](#) et Modèle de [Philip et De Varies 1957](#)) ont été utilisés pour prédire le comportement hygrothermique ainsi qu'une campagne expérimentale en considérant des conditions similaires de température et d'humidité relative à travers la paroi du matériau composite. Les résultats ont révélé que les deux modèles proposés fournissent globalement des résultats satisfaisants et similaires pour le mur DPC. Enfin, une comparaison en termes d'isolation thermique et de capacité de tampon d'humidité entre le DPC et un matériau de construction classique a été réalisée numériquement. Les résultats ont montré que le nouveau matériau DPC est très prometteur et peut contribuer à atténuer les variations de température et à assurer le confort hydrothermique des bâtiments.

I. 7 Conclusion

L'étude bibliographique présentée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence le rôle majeur du secteur de la construction dans les enjeux environnementaux. Ceci a poussé les chercheurs, ingénieurs et architectes à prospecter des alternatives aux matériaux de construction classiques, très énergivores en termes d'énergie grise et émetteurs d'énormes quantités de gaz à effet de serre. Une des solutions est de construire en terre crue, un matériau non énergivore en termes d'énergie grise, économique et disponible partout et en grandes quantités. Nous avons mis l'accent sur la performance hygrothermique intéressante des matériaux de construction à base de terre crue, qui grâce à leur capacité respiratoire vis-à-vis des transferts de vapeur d'eau

et isolante vis-à-vis des transferts de chaleur, permettent d'assurer un excellent confort hygrothermique à l'intérieur du bâtiment. En effet, la terre crue d'une façon générale est caractérisée par une perméabilité à la vapeur d'eau de l'ordre de 10^{-11} - 10^{-12} kg/ (m. s. Pa), ce qui fait de ce matériau de 10 à 100 fois plus perméable à la vapeur que les matériaux classiques tels que le béton de ciment, le plâtre ou les briques de terre cuite. En outre, les travaux de recherche ont montré que l'ajout des fibres végétales telles que les fibres de chanvre et les pailles de blé à la terre crue améliore sa perméabilité à la vapeur ainsi que son pouvoir tampon d'humidité. En plus, l'ajout des fibres améliore la capacité isolante de la terre crue. Prenant l'exemple, du matériau composite argile-fibres de chanvre qui est un excellent régulateur hygrométrique et thermique grâce à une gamme de valeurs de stockage d'humidité et de conductivité thermique allant respectivement de 2.07 à 2.33 g/ (m². %RH) et de 0.089 à 0.12 W/ (m. K) en fonction de la teneur en fibres.

Le **Tableau I. 5** suivant résume les principales propriétés hygrothermiques des matériaux à base de terre crue présentés dans cet état de l'art :

Tableau I. 5: Propriétés hygrothermiques des matériaux de construction à base de terre crue

Matériau	Perméabilité à la vapeur d'eau (kg/(m. s. Pa))	Conductivité thermique (W/(m. K))
Terre compactée [Ben Mansour et al., 2016]	-	0.699 - 1.212 w = 1.02 % - w = 3.25 %
Terre compactée [Medjelekh et al., 2017]	-	0,62 - 0,95 w = 0 % (sec) - w = 5.2 %
Béton de terre fibré [Hibouche, 2013]	$7.62 \cdot 10^{-12}$	0.558 – 1.32 w = 0% (sec) - w = 28 % (saturé)
Pisé [Allinson et al., 2012]	$5.75 \cdot 10^{-12} - 1.27 \cdot 10^{-11}$	1.01 - 0.83

Cependant, cette synthèse bibliographique a mis en évidence de très nombreuses questions restant à éclaircir, notamment lorsqu'il s'agit de matériaux composites bio-sourcés à base de terre crue. Parmi ces questions, on peut citer les suivantes :

- Quel est le comportement hygrométrique et thermique des fibres végétales qui est un point très peu entamé dans le domaine de recherche ?

- Quel est l'effet de plusieurs paramètres tels que la teneur en eau et le taux de fibres sur le comportement hygrométrique et thermique du matériau composite terre crue-fibres ?
- Quel est le comportement couplé hygrothermique du matériau composite terre crue-fibres ?
- Quel est le modèle numérique le plus simple à appliquer pour étudier le couplage hygrothermique des matériaux bio-sourcés et qui donne une réponse fiable en comparaison avec les résultats expérimentaux de couplage ?
- Quel est le comportement hygrothermique homogène équivalent du matériau composite terre-fibres où les fibres représentent les hétérogénéités, en se basant sur la théorie d'homogénéisation ?

En effet, la diversité des terres, caractérisées par leur minéralogie, granulométrie, plasticité, retrait, gonflement, et la diversité des fibres végétales, caractérisées par leur microstructure spécifique et leur densité, rend les recherches complexes, et en particulier si on prend en considération les différentes façons d'assembler la terre crue avec les fibres végétales comme le mode de mélange (aléatoire, orienté), taille des fibres, pourcentage optimale....

Les recherches donc ne sont qu'à leur début et de longs travaux restent à mener pour progresser dans la compréhension des propriétés hygrothermiques complexes de ces matériaux afin de pouvoir les modéliser de manière rationnelle et fiable dans un avenir proche, et d'espérer la diffusion de ces éco-matériaux de construction à grande échelle et à moindre coût, notamment énergétique.

Pour répondre aux questions mentionnées ci-dessus, on se propose dans cette thèse d'étudier un éco-matériau de construction compacté, composé d'un limon disponible en Normandie, renforcé à l'aide de fibres de lin, plante emblématique locale. Dans un premier temps, une caractérisation thermique et hygrométrique de chacun des deux composants (limon et fibres) est effectuée. Ensuite une étude des performances hygro-thermique du composite terre-fibre est menée prenant en compte différents paramètres comme le mode d'assemblage, l'humidité, le pourcentage de fibres....

Par ailleurs, la modélisation numérique des transferts hygro-thermiques a été abordée selon deux angles : une approche à l'aide de la théorie d'homogénéisation et une approche à l'aide d'un modèle phénoménologique.

Chapitre II

*Caractérisation hygrométrique et thermique :
Matériaux et méthodes*

II. 1 Introduction

Suite à l’empreinte carbone des matériaux de construction « conventionnels » comme le béton de ciment, matériau très énergivore impactant l’environnement de manière irréversible, les chercheurs, ingénieurs et architectes tentent depuis quelques années un retour vers l’utilisation de plus en plus de matériaux naturels peu transformés et biosourcés. Plusieurs recherches proposent des solutions s’appuyant sur les récents développements de la mécanique des sols non saturés [Mc.George et al., 2014 ; El Fgaier et al., 2016 ; Gallipoli et al., 2017 ; Casnedi et al., 2020 ; Mazhoud et al., 2021 ; Hibouche 2013 ; El Hajjar et al., 2021; Eid et al., 2015 ; Imanzadeh et al., 2018 ; Ben Ayed et al., 2016]. L’utilisation de la terre comme matériau de construction peu énergivore en termes d’énergie grise, nécessite la vérification de son comportement mécanique et hygrothermique. En effet, un éco-matériau à base de terre crue doit remplir un cahier des charges précis concernant la résistance mécanique, le comportement hydro mécanique, la durabilité, la rigidité/ductilité, mais aussi des performances dans les transferts thermique et hygrométrique, autrement dit, son pouvoir régulateur température-humidité.

Ce chapitre présente les différents matériaux biosourcés utilisés dans cette étude, leur caractérisation physique ainsi que les méthodes et protocoles expérimentaux mis en œuvre pour leur caractérisation hygrométrique et thermique.

II. 2 Matériaux

II. 2. 1 Matrice minérale : Limon Gonfreville l’Orcher (GO)

La terre crue utilisée dans cette étude est un limon naturel GO disponible en grande quantité dans la commune de Gonfreville l’Orcher, près de Le Havre Normandie (France) (**Figure II. 1**). Il est composé de 67% de sable (de 0,06 mm à 2 mm), d’environ 25% de limon (de 2 μ m à 60 μ m) et de 8% de gravier (< 2 mm) (**Tableau II. 1** et **Figure II. 2**). Selon la norme ASTM D2487-11, ce matériau est classé dans la catégorie des sables-limoneux SL (SM).



Figure II. 1 : Limon GO naturel

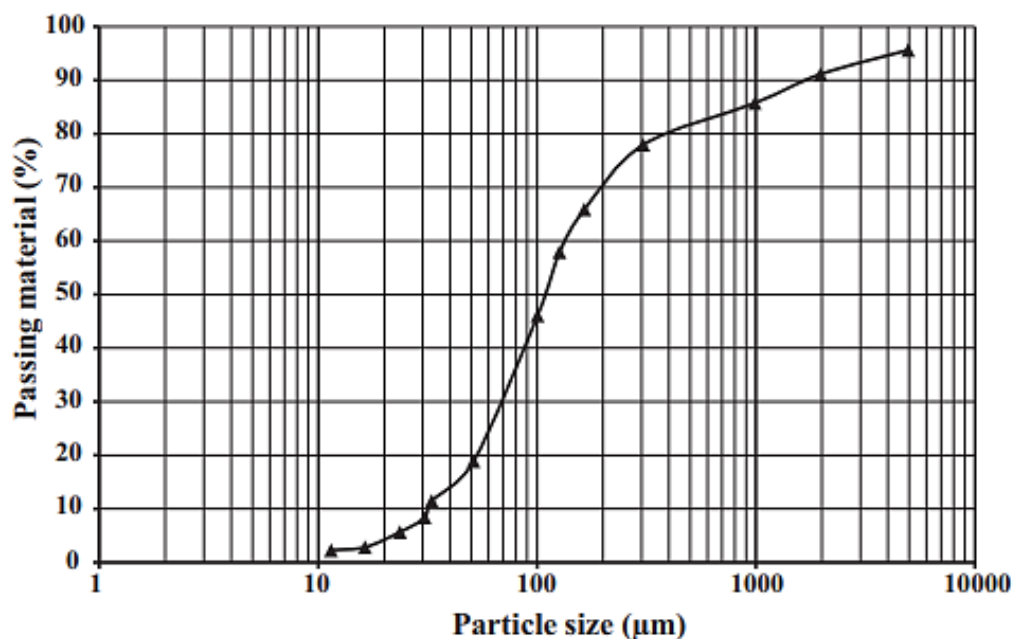


Figure II. 2 : Courbe granulométrique du limon GO [Hibouche, 2013]

Tableau II. 1 : Tableau des caractéristiques granulométriques du limon GO [Hibouche, 2013]

Limon GO	
Teneur en fines (< 80 µm)	35%
Les différentes fractions	
Argile (<2 µm)	0%
Limon (de 2 µm à 60 µm)	25%
Sable (de 0,06 mm à 2 mm)	67%
Gravier (>2mm)	8%
D ₁₀	32 µm
D ₆₀	140 µm
D ₃₀	65 µm
C _u	4.37
C _c	0.94

* D₁₀ : diamètre effectif des granulats qui correspondent à 10% de passants,

* D₃₀ : diamètre effectif des granulats qui correspondent à 30% de passants,

* D₆₀ : diamètre effectif des granulats qui correspondent à 60% de passants,

* $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$: facteur d'uniformité de Hazen qui caractérise la répartition en taille des granulats qui composent le limon GO,

* $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{10} \times D_{60})}$: coefficient de classement ou de courbure permettant de décrire la forme de la courbe granulométrique entre D₁₀ et D₆₀.

II. 2. 2 Fibres végétales : Fibres de lin

Les fibres de lin utilisées, sont naturelles, extraites localement en Normandie, coupées et séchées avant utilisation (**Figure II. 3**). Elles sont caractérisées par une épaisseur de 40 à 80 μm et une densité ρ de 1400 kg/m^3 . Les propriétés mécaniques tels que le module d'Young E (GPa), la déformation ultime ϵ_u (%) et la contrainte ultime σ_u (MPa) sont résumées dans le **Tableau II. 2**.



Figure II. 3 : Fibres de lin de 7cm de longueur

Tableau II. 2 : Propriétés mécaniques des fibres de lin [Eid et al., 2015 ; El Hajjar et al., 2021]

ρ (kg/m^3)	E (GPa)	ϵ_u (%)	σ_u (MPa)
1400	40 – 85	2.4 – 3.3	800 – 2000

II. 2. 3 Caractérisation physique du limon GO

II. 2. 3. 1 Limites d'Atterberg

II. 2. 3. 1. 1 Limite de liquidité

La limite de liquidité du limon GO a été déterminée à l'aide de deux méthodes : l'essai à la boîte de Casagrande (NF P 94-051) et l'essai au pénétromètre de plasticité (NF P 94-052-1).

La boîte de Casagrande (appelée également la coupelle à choc) (**Figure II. 4**), est constituée d'une coupelle dans laquelle on place le sol, et à l'aide d'un outil à rainurer, on trace une rainure de 1 cm de largeur dans l'échantillon du sol. La limite de liquidité est égale à la teneur en eau du matériau pour laquelle la rainure se ferme lorsque on applique 25 chocs à la coupelle. D'après les résultats, la limite de liquidité du limon GO est $W_L=22\%$.

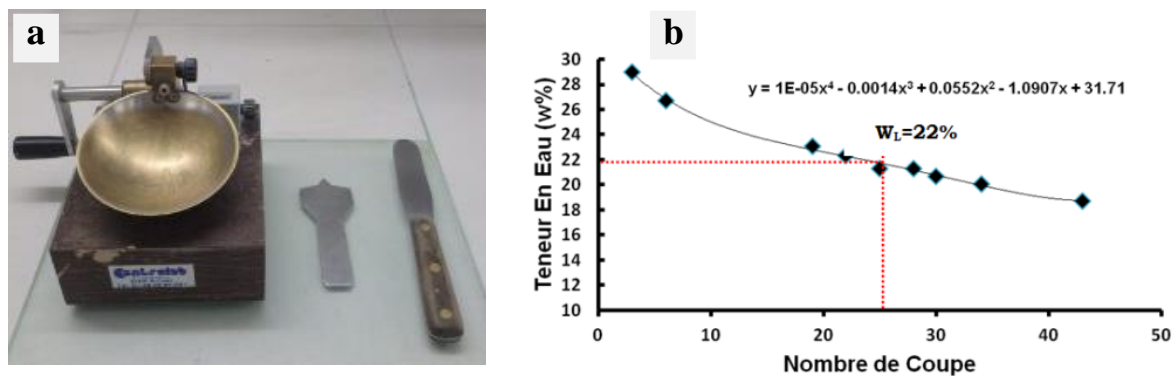


Figure II. 4 : (a) Boîte de Casagrande, (b) Courbe de variation de la teneur en eau en fonction de nombre de chocs [Hibouche, 2013]

L'essai au pénétromètre de plasticité « Cône de pénétration » permet de déterminer la limite de liquidité du limon GO. Il consiste à mélanger le sol avec un peu d'eau et à le mettre dans un gobelet normalisé du pénétromètre à l'aide d'une spatule à pâte. Il faut araser la pâte afin d'obtenir une surface lisse et plane. Par la suite, on libère le cône du pénétromètre et on l'enfonce dans la pâte du sol pendant 5 secondes. Comme résultat, on détermine la courbe de l'enfoncement en fonction de la teneur en eau de l'échantillon. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à 17mm d'enfoncement. Pour le limon GO, la limite de liquidité obtenue est $W_L = 20\%$.

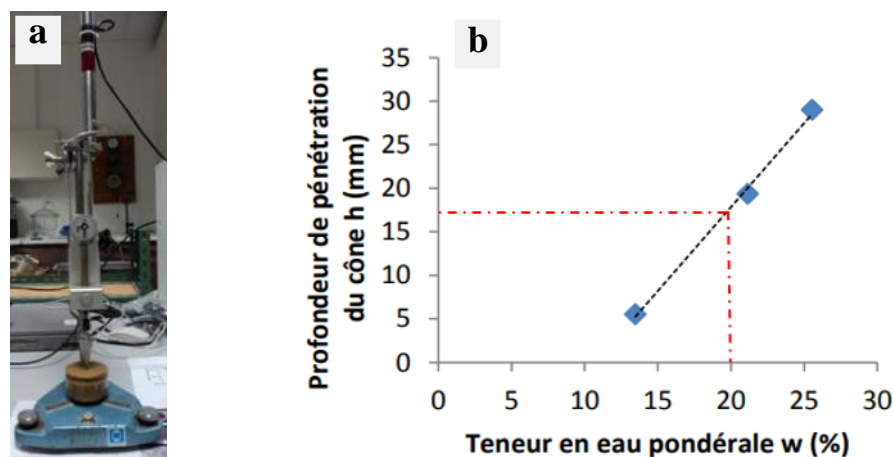


Figure II. 5 : (a) Pénétromètre de plasticité « Cône de pénétration », (b) Courbe de variation de la profondeur de pénétration du cône en fonction de la teneur en eau [Hibouche, 2013]

On peut remarquer que les deux méthodes donnent des résultats comparables aux incertitudes près.

II. 2. 3. 1. 2 Limite de plasticité

La limite de plasticité, est souvent difficile à déterminer expérimentalement d'une manière reproductible. Dans la méthode de corrélation de Biarez et Favre 1975, la limite de plasticité est reliée à la limite de liquidité par l'expression suivante :

$$I_P = 0,73 (W_L - 13) \quad (\text{II.1})$$

ce qui donne $I_P \approx 6$ [Hibouche, 2013].

II. 2. 3. 2 Essai bleu de méthylène (NF P 94-068)

Cet essai consiste à mélanger une solution de bleu de méthylène avec le sol étudié. La valeur de bleu de méthylène VB est la quantité en gramme de solution absorbée par 1 kg de sol. Cette valeur permet par la suite d'identifier l'argilosité du sol étudié.

D'après les résultats de l'essai, le limon GO est caractérisé par une $VB = 0.5$. Cette valeur correspond au sol sable-limoneux SL (SM).

II. 2. 3. 3 Mesure de la succion à l'aide du papier filtre Whatman 42

Un essai de mesure de la succion à l'aide de la méthode du papier filtre a été réalisé sur le limon GO. Cette méthode, selon la norme ASTM (2003, D 5298-03), permet de mesurer la succion des échantillons de sol entre 0.01 à 100 MPa. L'essai consiste à placer un papier filtre de type Whatman 42 entre deux parties de l'échantillon pendant une semaine (**Figure II. 6**). Cette période est suffisante pour avoir un équilibre en teneur en eau entre la terre crue et le papier filtre.

L'essai a été réalisé avec un échantillon de limon compacté dont les propriétés sont présentées dans les paragraphes suivants.

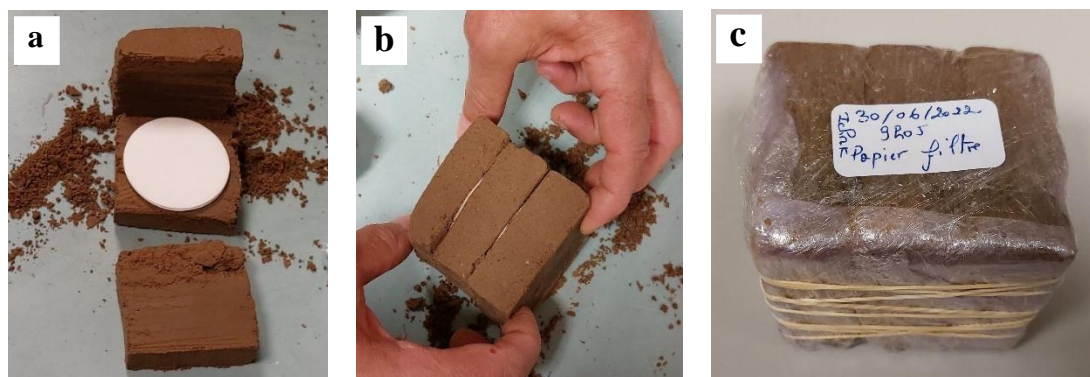
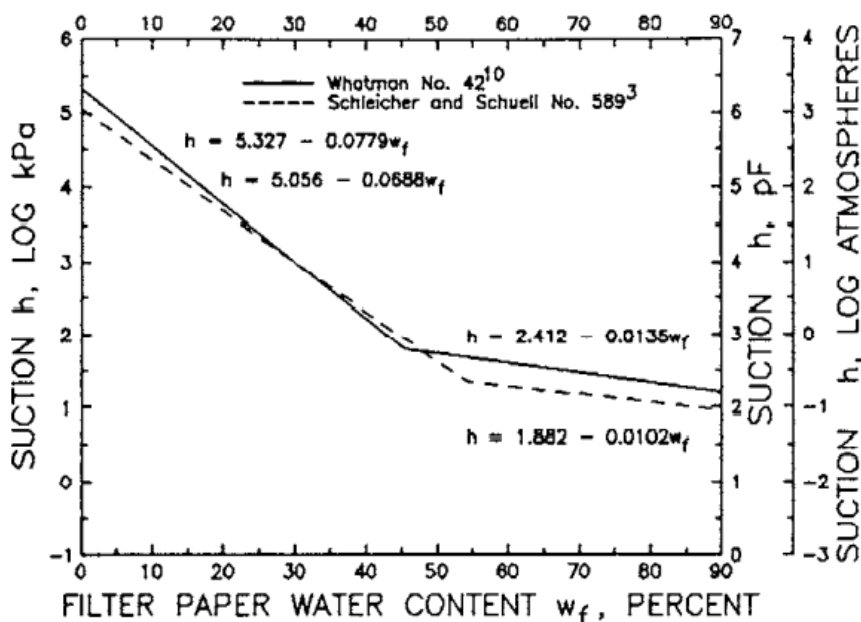


Figure II. 6 : Différentes étapes de l'essai de mesure de la succion par la méthode du papier filtre Whatman 42 (a) insertion du papier filtre dans le sol ; (b) assemblage du « sandwich » sol-papier filtre et (c) enveloppe de cellophane étanche durant le temps d'équilibre hydrique sol-papier filtre

En déterminant la teneur en eau du papier filtre et à l'aide de la courbe de calibration succion/teneur en eau de ce dernier (**Figure II. 7**), la succion du papier filtre et donc de l'échantillon du sol peut être déterminée. En plus de la courbe, et selon de norme ASTM (2003, D 5298-03), la succion peut être calculer par les formules du **Tableau II. 3** :

Tableau II. 3 : Formules de calcul de la succion du papier filtre Whatman 42 en fonction de la teneur en eau selon ASTM (2003, D 5298-03)

Référence	Teneur en eau w (%)	Log ₁₀ (succion) (kPa)	
ASTM D5298	< 45.3	$5.327 - 0.0779 \times w$	(II.2)
ASTM D5298	> 45.3	$2.412 - 0.0135 \times w$	(II.3)



NOTE 1—Coefficient of determination $r > 0.99$.

Figure II. 7 : Courbe de calibration succion/teneur en eau du papier filtre Whatman 42 selon ASTM (2003, D 5298-03)

II. 2. 3. 4 Essai pesée au Kerdane

Le but de cet essai est de déterminer les caractéristiques physiques (densité apparente, teneur en eau, porosité, indice des vides...) des échantillons de sol de dimensions 1 cm^3 , par pesées immergées dans de l'huile de Kerdane. L'avantage de cette huile est qu'elle est inactive vis-à-vis du sol, non mouillante, faiblement miscible dans l'eau, et utilisée pour remplir les pores en chassant l'air seulement et non l'eau interstitielle. Elle peut être facilement éliminée des échantillons lors du séchage à l'étuve.

L'essai de pesée au Kerdane est basé sur la mesure de la Poussée d'Archimède. On commence par mesurer le poids humide P_h d'un échantillon de limon de dimensions 1 cm^3 . Ensuite, ce dernier est immergé dans l'huile pour remplir tous les pores et remplacer l'air par l'huile. Il est par la suite retiré et essuyé à l'aide d'un papier absorbant afin d'enlever l'excès d'huile sur ses surfaces extérieures. Puis, on mesure son poids $P_{h+kerdane}$. Puis, à l'aide d'une nacelle suspendue à la balance en bas, on immerge l'échantillon dans un récipient d'huile de Kerdane et on mesure son poids immergé P_{imm} . Finalement, l'échantillon est séché dans une étuve à $105\text{ }^\circ\text{C}$ durant 24 heures et on mesure son poids sec P_s . Les photos de la **Figure II. 8** montrent les différentes étapes de l'essai de pesée au Kerdane :

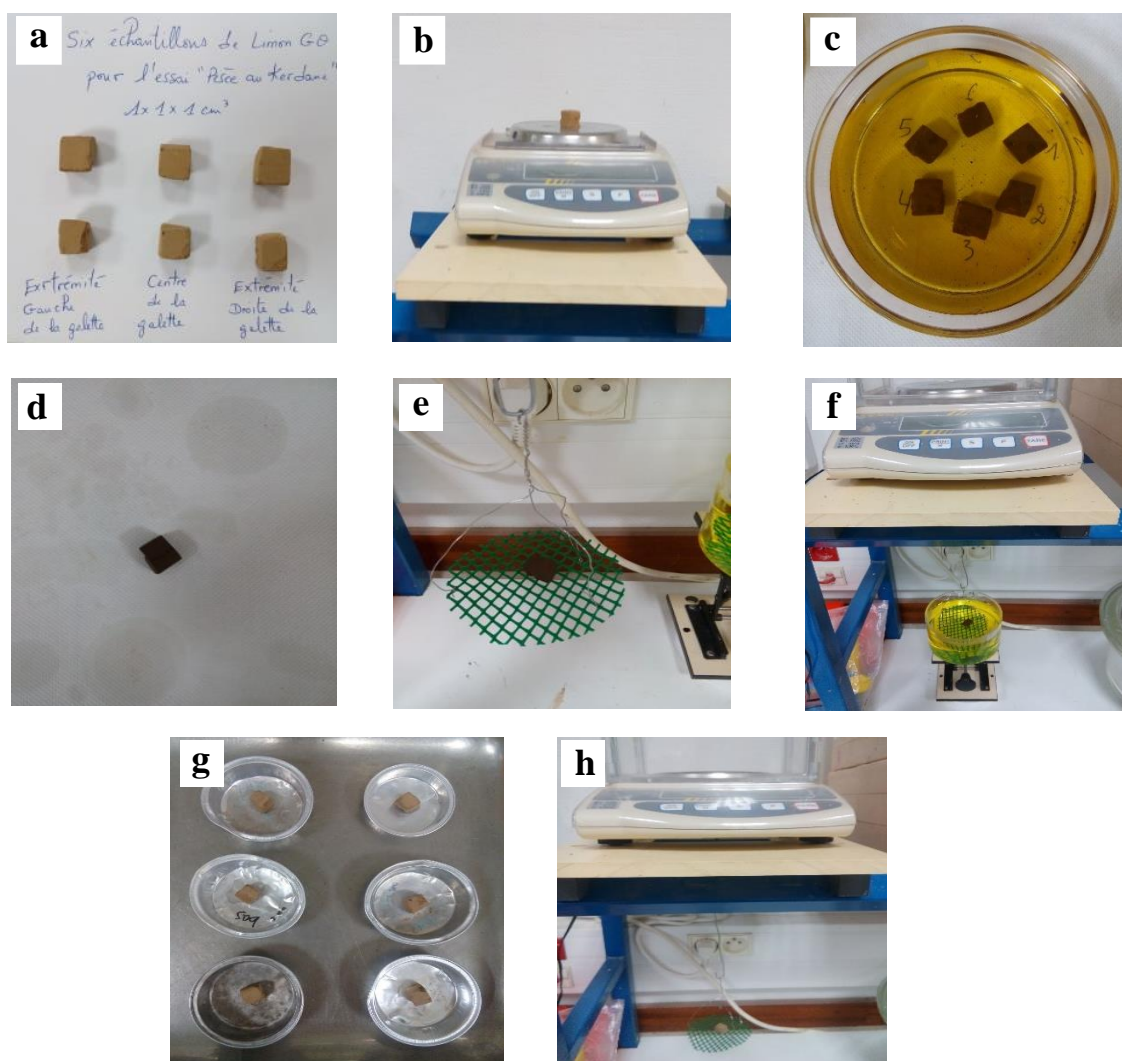


Figure II. 8 : Les différentes étapes de l'essai de pesée immergée dans du Kerdane : (a) Préparation des échantillons de dimensions $1 \times 1\text{ cm}^2$, (b) Pesée du poids humide de l'échantillon (P_h), (c) Immersion des échantillons dans l'huile de Kerdane, (d) Essuyage des échantillons à l'aide d'un papier absorbant, (e) Pesée du poids humide + Kerdane ($P_{h+kerdane}$), (f) Pesée du poids immergé (P_{imm}), (g) Echantillon après passage à l'étuve et (h) Pesée du poids sec des échantillons

Le volume de l'échantillon immergé est donné par la relation :

$$V = \frac{(P_{h+Kerdane} - P_{imm})}{\rho_k} \quad (II.4)$$

- $P_{h+Kerdane}$: poids humide +Kerdane (kg)
- P_{imm} : poids immergé (kg)
- ρ_k : masse volumique de l'huile de Kerdane = 0.758 g/cm³.

Les autres caractéristiques se calculent à l'aide des formules du **Tableau II. 4** :

Tableau II. 4 : Formules des caractéristiques physiques déduites de l'essai de Kerdane

Paramètres	Formules
Le poids volumique humide (kN/m ³)	$\gamma_h = \frac{P_h \times g}{V}$
Le poids volumique sec (kN/m ³)	$\gamma_d = \frac{P_s \times g}{V}$
La teneur en eau (%)	$w = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$
L'indice des vides	$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$
Porosité	$n = \frac{e}{1+e}$
Le degré de saturation	$S_r = \frac{w \times \gamma_s}{e \times \gamma_w}$
Le poids volumique des grains solides (kN/m ³)	$\gamma_s = 26,5$

II. 3 Confection des échantillons

Afin d'étudier les transferts hygrothermiques à travers la terre crue renforcée ou non avec des fibres de lin et d'analyser ainsi l'effet de chaque composant de ce matériau composite, des échantillons de fibres de lin seules, de terre crue seule et de terre renforcée avec des fibres ont été élaborés.

II. 3. 1 Fibres de lin

Des échantillons de fibres de lin assemblées en formes cylindriques et rectangulaires ont été préparés pour réaliser les essais de transferts thermique et hygrométrique. Les échantillons cylindriques ont 40 mm de diamètre et 70 mm d'épaisseur. Les échantillons rectangulaires sont de dimensions 50 × 60 mm² et d'épaisseur dépendant de la densité ciblée (voir **Tableau II. 5**). L'effet de la densité ainsi que l'arrangement des fibres a été testé afin d'illustrer leurs effets sur les propriétés hygrothermiques.

II. 3. 2 Terre crue : Limon GO

Plusieurs types d'échantillons cylindriques ont été préparés selon la même méthode de préparation est similaire. Les cylindres de 100 mm de diamètre et de 12 mm d'épaisseur ont été utilisés pour les essais hygrométriques et des cylindres de 100 mm de diamètre et de 50 mm d'épaisseur ont été utilisés pour les essais thermiques et essais couplés hygrothermiques (voir **Tableau II. 5**). La confection de l'échantillon consiste à mélanger d'abord le limon et l'eau puis placer le matériau dans un moule Proctor pour être compacté à l'aide d'une presse statique (**Figure II. 9**). Les échantillons compactés sont ensuite placés sous cloche dans une chambre thermostatée à 23°C pendant 24 heures pour permettre l'homogénéisation de leur teneur en eau interne. [Andrianatrehina et al. \(2019\)](#), [Moulay et al. \(2021\)](#), [Daheur et al. \(2021\)](#) ont montré que la durée de 24h est suffisante pour atteindre cet objectif.

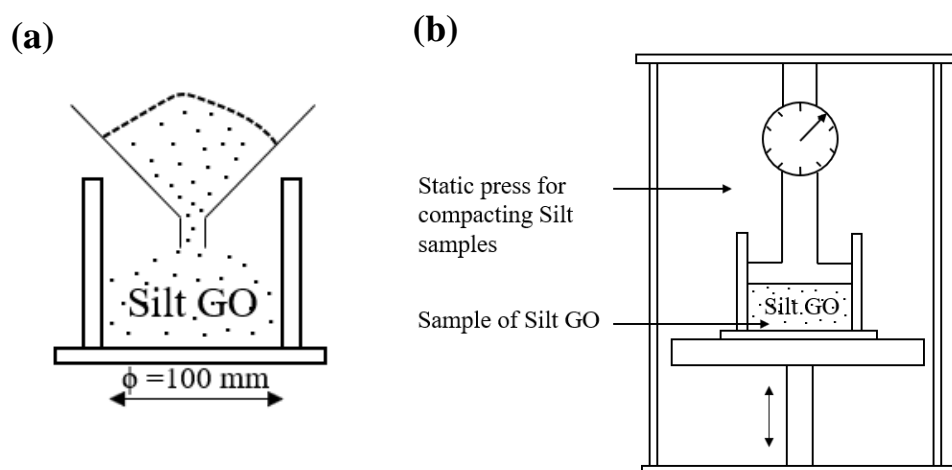


Figure II. 9 : (a) Schéma du limon mélangé à l'eau et versé dans un moule Proctor, (b) Schéma du compactage de l'échantillon à l'aide d'une presse statique

II. 3. 3 Matériau composite limon-fibres de lin

Différentes dispositions de fibres de lin dans le sol ont été envisagées dans le but de vérifier l'effet de leurs orientations sur la capacité thermique et hygrométrique du matériau composite terre-fibres.

II. 3. 3. 1 Limon- fibres de lin aléatoires

Le limon et les fibres de lin ajoutées de manière aléatoire ont été mélangés à sec, puis la quantité d'eau correspondant à la teneur en eau cible est ajoutée durant le malaxage. Le même protocole

expérimental décrit dans la section II. 3. 2 a été utilisé pour compacter des échantillons avec 1, 2, 3, 4 et 5% de fibres.

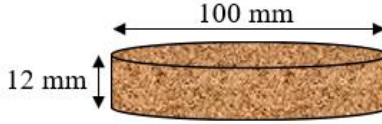

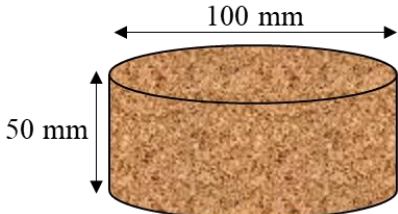

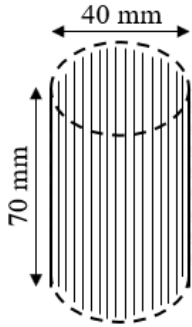
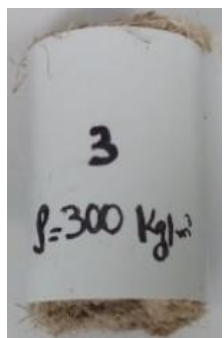
II. 3. 3. 2 Limon - fibres de lin disposées en lits transversaux

Le limon a été mélangé avec de l'eau puis divisé en trois parties égales et la quantité de fibres de lin a été divisée en deux parties. Dans le moule, les couches de limon et de fibres ont été placées alternativement. En utilisant la presse statique, des échantillons de 12 mm d'épaisseur et 100 mm de diamètre ont été préparés (voir **Tableau II. 5**).

II. 3. 3. 3 Limon - fibres de lin disposées en fagots longitudinaux

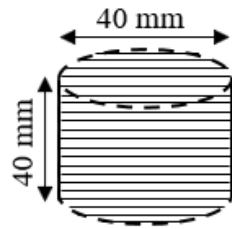
Des fagots de fibres d'une densité de 300 kg/m^3 ont été insérés dans la matrice terre crue pour assurer le meilleur contact avec la matrice terre. Des échantillons avec différents pourcentages de fibres, 4, 6, 9, 11 et 17% ont été préparés. Chaque pourcentage correspond au nombre de fagots insérés (voir **Tableau II. 5**).

Tableau II. 5 : Différents échantillons préparés pour les essais de transferts hydrothermiques

	Dimensions	Echantillons	Type d'essais de transfert
Terre crue			Transferts hygrométriques
Limon GO compacté			Transferts thermiques et couplés hydrothermiques
Fibres de lin seules Fibres de lin en arrangement longitudinal			Transferts hygrométriques et thermiques

Fibres de lin seules

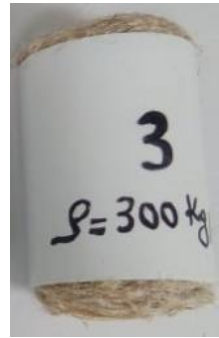
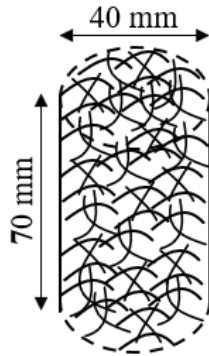
Fibres de lin en arrangement transversal



Transferts hygrométriques

Fibres de lin seules

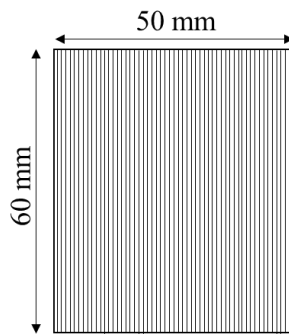
Fibres de lin en arrangement aléatoire



Transferts hygrométriques et thermiques

Fibres de lin seules

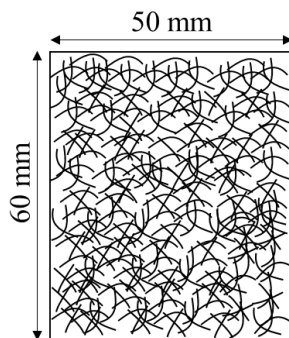
Fibres de lin en arrangement transversal



Transferts thermiques

Fibres de lin seules

Fibres de lin en arrangement aléatoire

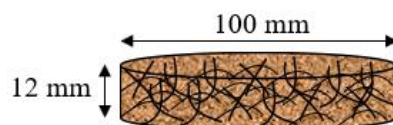


Transferts thermiques

Terre crue-fibres de lin

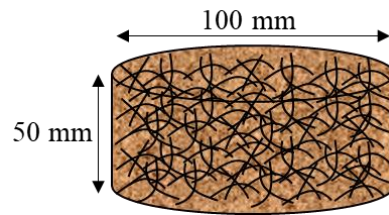
Limon GO mélangé avec des fibres de lin aléatoires

1%, 2%, 3%, 4% et 5%



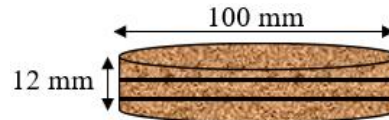
Transferts hygrométriques

Transferts thermiques



**Terre crue-
fibres de lin**

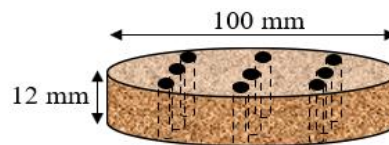
Limons GO
renforcés avec
des lits
transversaux
de fibres de lin
1% et 2%



Transferts
hygrométriques

**Terre crue-
fibres de lin**

Limons GO
renforcés avec
des fagots de
fibres
longitudinales
4%, 6%, 9%,
11% et 17%



Transferts
hygrométriques

II. 4 Méthodes et protocoles expérimentaux

II. 4. 1 Caractérisation hygrométrique

II. 4. 1. 1 Détermination des Isothermes d'adsorption/désorption

La méthode qui permet d'obtenir un point de la courbe d'isotherme d'adsorption/désorption consiste à placer un échantillon dans une enceinte maintenue à une température **T** et humidité **HR** constantes. A l'aide des pesées à intervalles de temps réguliers, la variation de masse de l'échantillon en fonction du temps est déterminée. Les mesures s'arrêtent dès que la masse de l'échantillon devient constante ce qui signifie que l'échantillon est en équilibre avec l'ambiance (**T**, **HR**) de l'enceinte. Connaissant la masse humide de l'échantillon, il suffit de le passer à l'étuve pour déterminer sa masse sèche afin de déduire sa teneur en eau **w**. Le résultat est alors un couple (**HR**, **w**) qui présente un point de la courbe isotherme d'adsorption/désorption.

Dans notre cas, l'enceinte contrôlée en humidité et température est un dessiccateur (**Figure II. 10**) dont l'humidité relative HR est imposée à l'aide d'une solution saline saturée en sel placée au fond. Différents types de sels ont été utilisés pour imposer différentes humidités afin de compléter la courbe $w = f(HR)$ (voir **Tableau II. 6**).

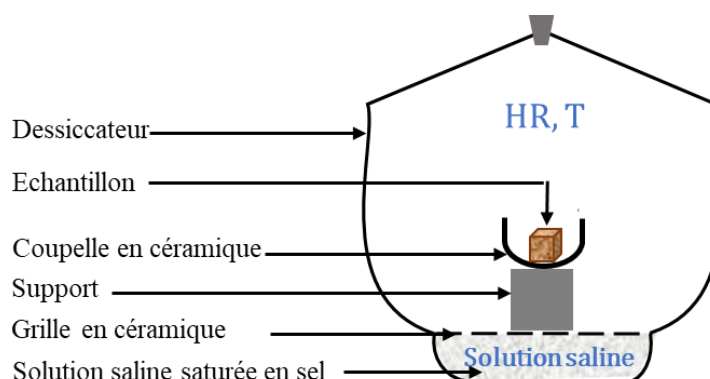


Figure II. 10 : Essai de détermination des isothermes d'adsorption/désorption par la méthode gravimétrique

Tableau II. 6 : Tableau des sels pour imposer une humidité relative (Ghembaza, 2004)

Sel	T°C	Humidité relative en %					Pression négative en MPa				
		20°	40°	50°	60°	80°	20°	40°	50°	60°	80°
osmose		-	-	-	-	-	0.05-1.5	0.05-1.5	0.05-1.5	0.05-1.5	0.05-1.5
K ₂ SO ₄		97.59		95.82		95.79	3.29	3.43	6.29	6.5	7.292
Na ₂ SO ₃		91	-	-	-	-	13.13	-	-	-	-
KCl		85	-	-	-	-	22.63	-	-	-	-
KBr		81.77		79.02			27.18	32	34.71	40	48
NH ₄ Cl		81	-	-	-	-	34.59	-	-	-	-
NaNO ₃		75.13		69.04		65.32	38.62	38.62	54.61	54.61	72.2
NaCl		75.41		74.84		74.42	38.12	40	42.72	40	50.09
NaNO ₂		66	-	-	-	-	57.85	-	-	-	-
CaNO ₃		56	-	-	-	-	80.73	-	-	-	-
KcNs		47	-	-	-	-	105.12	-	-	-	-
K ₂ CO ₃		43.16		40.91		35.42	113.49	132	131.75	148	175.97
MgCl ₂		33.03		30.54		26.05	149.62	174	174.74	200	228.07
CaCl ₂		32.5	-	-	-	-	156.49	-	-	-	-
LiCl		11.14		11.05		10.51	296.41	330	324.68	356	381.96

II. 4. 1. 2 Mesure de la perméabilité à la vapeur

II. 4. 1. 2. 1 Méthode de la coupelle

Deux dispositifs expérimentaux basés sur « la méthode de la coupelle » [Hibouche, 2013 ; Bennai et al., 2016 ; Ferroukhi, 2016] selon la norme **ISO 12572 : 2001** ont été développés au laboratoire pour mesurer la perméabilité à la vapeur d'eau des échantillons de fibres de lin, de limon seul et de limon mélangé avec différents pourcentages de fibres de lin. Le principe de la

mesure consiste à placer un échantillon cylindrique d'épaisseur e et de diamètre ϕ sous un gradient d'humidité relative constant, unidirectionnel et en conditions isothermes. Les humidités relatives sont imposées à l'aide de solutions salines saturées en sel. La densité de flux j_v [kg / (m².s)] correspond à la pente de la variation de la masse de vapeur transférée à travers l'échantillon en fonction du temps. A l'aide d'un capteur hygro-thermique, on mesure les humidités relatives RH (%) imposées par les solutions salines saturées et la température T[K] durant l'essai ce qui permet de calculer la pression de vapeur :

$$p_v = RH \times p_{\text{sat}}(T) \quad (\text{II.5})$$

où $p_{\text{sat}}(T)$ est la pression de vapeur d'eau saturée donnée par :

$$p_{\text{sat}}(T) = e^{23.5771 - \frac{4042.9}{T[\text{K}] - 37.58}} \quad [\text{Pa}] \quad [\text{Peuhkuri, 2003}] \quad (\text{II.6})$$

En se basant sur la loi de Fick, la perméabilité à la vapeur des différents matériaux est déterminée [Hibouche, 2013 ; Casnedi et al., 2020 ; Bennai et al., 2016 ; Ferroukhi, 2016] :

$$\delta_v = e \frac{j_v}{\Delta p_v} = e \frac{j_v}{p_{v2} - p_{v1}} \quad (\text{II.7})$$

➤ Terre crue – fibres de lin

Le dispositif est composé d'un échantillon de terre cylindrique (avec ou sans renforcement de fibres) scellé dans le haut d'un récipient contenant une solution saline saturée en chlorure de calcium (CaCl₂) permettant de maintenir une humidité relative $RH \approx 30\%$ dans l'atmosphère en contact avec la surface inférieure de l'échantillon. Le récipient contenant l'échantillon de terre et la solution saline, est ensuite placé à l'intérieur d'un dessiccateur et suspendu à une balance de précision permettant de mesurer sa variation de masse en fonction du temps. Dans le fond du dessiccateur, une solution saline saturée de chlorure de potassium (K₂SO₄) a été placée pour imposer une humidité relative $RH \approx 90\%$ dans l'atmosphère qui est en contact avec la face supérieure de l'échantillon, ce qui permet d'avoir un gradient d'humidité relative (**Figure II. 11**). Selon la loi de Fick, la perméabilité à la vapeur d'eau des échantillons peut être déterminée.

➤ Fibres de lin

Le dispositif consiste à sceller un échantillon de fibres de lin dans le haut d'un récipient contenant une solution saline saturée de chlorure de calcium (CaCl₂) pour maintenir une

humidité relative $RH \approx 30\%$ dans l'atmosphère sous l'échantillon. Ensuite, le récipient est placé dans un bocal en verre contenant au fond une seconde solution saline saturée en chlorure de potassium (K_2SO_4) pour maintenir une humidité relative $RH \approx 90\%$ dans l'atmosphère au-dessus de l'échantillon. Pour maintenir un flux de vapeur unidirectionnel et assurer une bonne étanchéité, un mastic a été mis autour de l'échantillon. Le récipient contenant la solution saline et l'échantillon est pesé deux fois par jour pour suivre la variation de la vapeur d'eau transférée pendant le test (**Figure II. 12**). En se basant sur la loi de Fick, la perméabilité à la vapeur d'eau peut être déterminée.

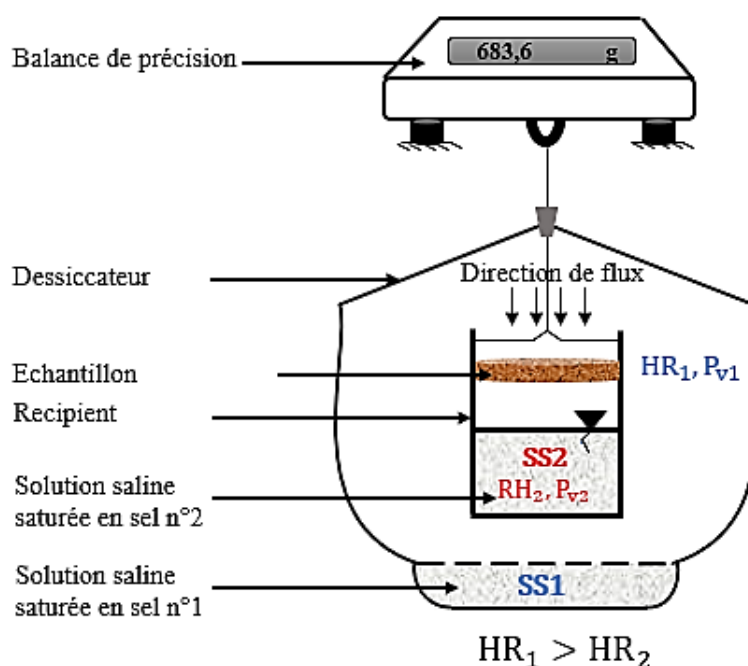


Figure II. 11 : Méthode de la coupelle pour la mesure de perméabilité à la vapeur des matériaux terre

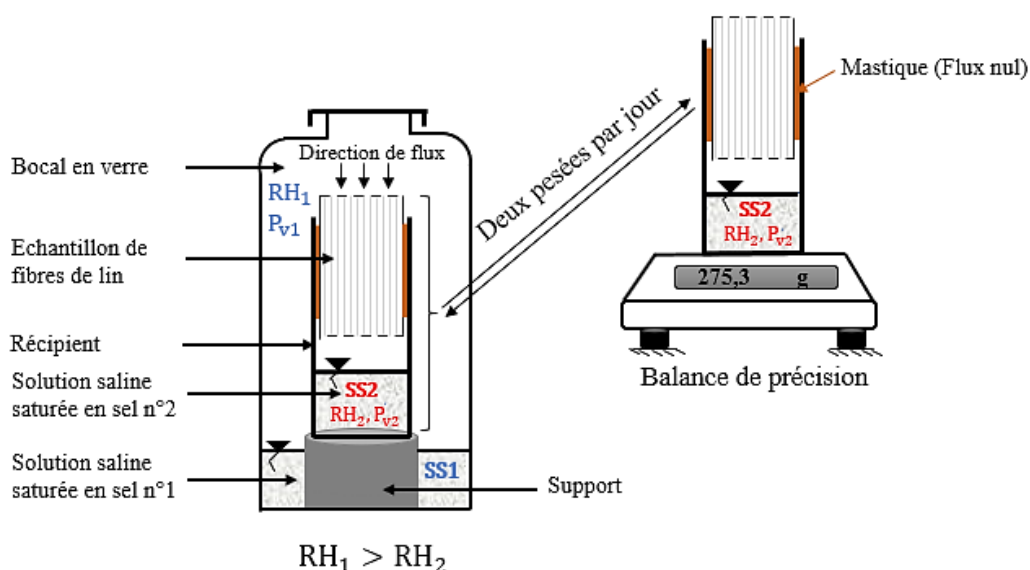


Figure II. 12 : Méthode de la coupelle pour la mesure de perméabilité à la vapeur des fibres de lin

II. 4. 1. 2. 2 Dispositif « Gravitest »

Le Gravitest est un dispositif automatisé de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau, basé sur la méthode de la coupelle (**Figure II. 13**). Le principe de cet appareil consiste à imposer un gradient d'humidité relative unidirectionnel et en conditions isothermes à travers un échantillon. Le Gravitest a une capacité de neuf coupelles, il représente une enceinte climatique contrôlée en humidité et température comportant un plateau tournant contenant les coupelles (**Figure II. 14**). Une solution saline saturée en sel placée au fond de la coupelle, permet d'imposer une autre humidité relative différente de celle de l'enceinte et donc conduisant à un gradient d'humidité. Selon un intervalle de temps bien déterminé, les coupelles se reposent sur une balance de 10^{-4} g de précision afin de mesurer la variation de la masse de vapeur échangée lors de l'essai. La taille des échantillons est de 8 cm de diamètre et de 1 à 3 cm d'épaisseur. L'enregistrement de la courbe de variation de masse de vapeur en fonction du temps permet de déduire la perméabilité à la vapeur de l'échantillon à l'aide de la loi de Fick (équation II. 5).

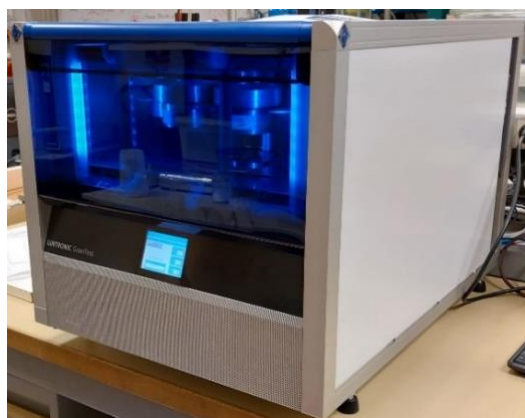


Figure II. 13 : Dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur Gravitest

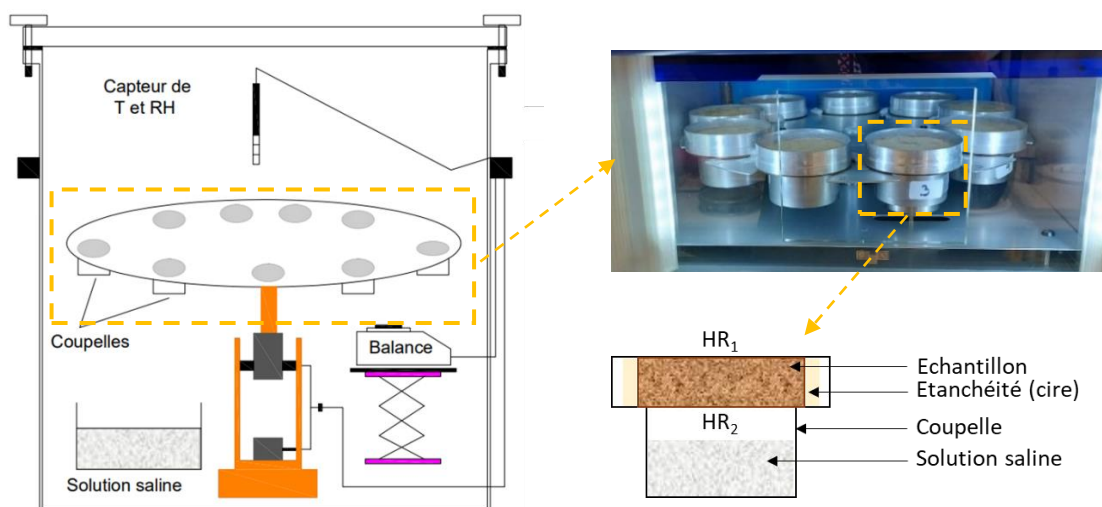


Figure II. 14 : Plateau tournant et coupelles - Gravitest

II. 4. 2 Caractérisation thermique

II. 4. 2. 1 Dispositif de mesure en régime transitoire : système « Tempos Meter »

C'est un dispositif de mesure des propriétés thermiques de différents types de matériaux en régime transitoire (**Figures II. 15** et **II. 16**). Il a le même principe que le dispositif KD2 Pro décrit dans le premier chapitre. Il s'agit d'un boîtier équipé de quatre sondes (TR-3, KS-3, SH-3 et RH-3) permettant de mesurer les propriétés thermiques : conductivité, effusivité, diffusivité thermiques et capacité volumique de chaleur. Les caractéristiques de ces sondes sont présentées dans le **Tableau II. 7**.

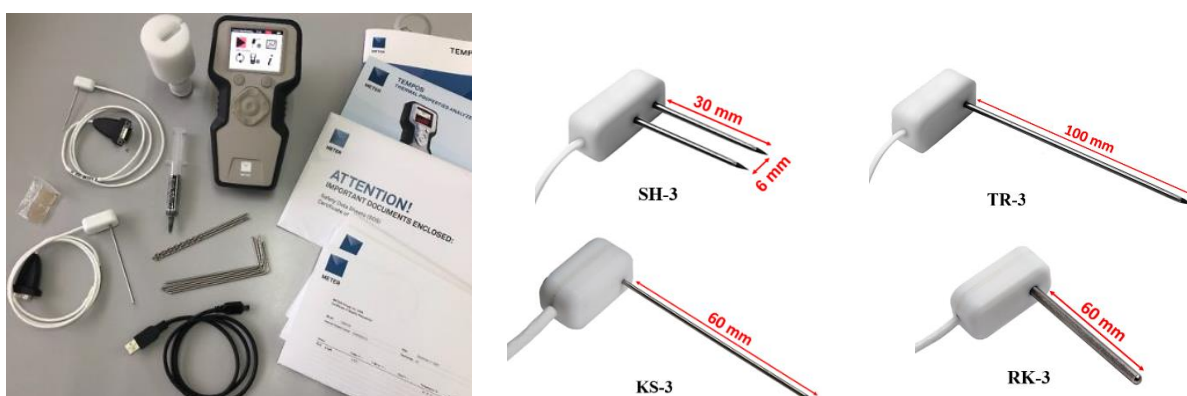


Figure II. 15 : Dispositif de mesure de la conductivité thermique « Tempos Meter »

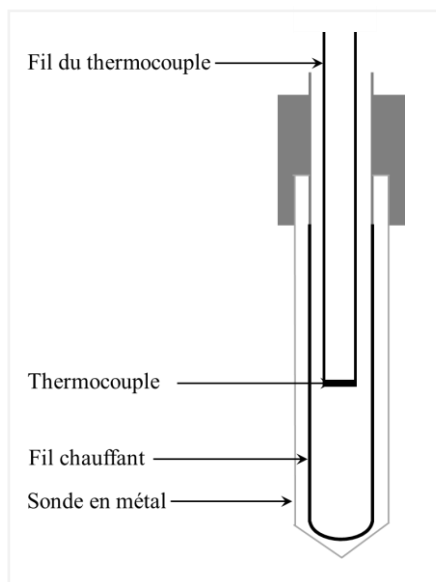


Figure II. 16 : Les différents composants des sondes du dispositif « Tempos Meter »

Tableau II. 7 : Caractéristiques des sondes du dispositif « Tempos Meter »

Durée de mesure	2 min
Température	-50°C à +150°C
Dimensions des aiguilles	<ul style="list-style-type: none"> - KS-3, 1.3 mm diamètre × 60 mm longueur - TR-3, 2.4 mm diamètre × 100 mm longueur - SH-3, 1.3 mm diamètre × 30 mm longueur - RK-3, 3,9 mm diamètre × 60 mm longueur
Capteur KS-3	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure la conductivité thermique (de 0.02 à 2.00 W/(m. °C)). - Les échantillons liquides et les matériaux isolants. - Mauvais choix pour les échantillons granulaires exemple le sol.
Capteur TR-3	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure la conductivité thermique (de 0.1 à 4.00 W/(m. °C)). - Utilisé principalement pour les matériaux granulaires ou poreux dur tel que le béton de ciment.
Capteur SH-3	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure de la conductivité thermique (de 0.02 à 2.00 W/(m. °C). - Mesure la diffusivité thermique (0.1 to 1 mm² /s) et la chaleur spécifique volumétrique (0.5 to 4 MJ/(m³. °C). - Compatible avec la plupart des matériaux solides et granulaires.
Capteur RK-3	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure de la conductivité thermique (de 0.1 à 6.00 W/(m. °C) et la résistivité thermique (de 17 à 1000 °C • cm/W). - Compatible avec les matériaux durs tels que les roches.
Précision	<ul style="list-style-type: none"> - 5 à 10% sur la conductivité - 7% sur la diffusivité - 7% sur la chaleur spécifique

La méthode de mesure est basée sur l'analyse par dissipation de chaleur. En effet, l'essai consiste à insérer une sonde à une ou deux aiguilles dans le matériau dont les propriétés thermiques (conductivité, diffusivité et capacité thermiques) sont à mesurer. La sonde SH-3 est composée de deux aiguilles distantes de 6 mm dont l'une est une source de chaleur et l'autre

est un capteur de température. La distance de 6mm est suffisante pour avoir une diffusion de chaleur à l'intérieur du matériau, ce qui permet de déterminer aussi la diffusivité et la capacité thermiques en plus que la conductivité. Les autres sondes KS-3, TR-3 et RK-3 ont une seule aiguille à la fois source de chaleur et capteur de température. Ces derniers permettent la mesure de la conductivité thermique uniquement.

L'équation pour la conduction radiale de la chaleur dans un milieu homogène, isotrope est la suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (\text{II.8})$$

- T : Température [K]
- r: distance radiale [m]
- D : diffusivité thermique [m²/s]
- t : Temps [s]

Lorsqu'une source de chaleur linéaire est introduite dans le milieu, l'augmentation de la température, depuis une température initiale T₀, à une distance r depuis l'axe de la source est :

Pour la sonde SH-3 à deux aiguilles :

$$\Delta T = T - T_0 = \left(\frac{q}{4 \pi \lambda} \right) \text{Ei} \left(\frac{-r^2}{4 D t} \right) \quad \text{si } t \leq t_h \quad (\text{II.9})$$

$$\Delta T = T - T_0 = \left(\frac{q}{\pi \lambda} \right) \left(\text{Ei} \left(\frac{-r^2}{4 D (t-t_h)} \right) - \text{Ei} \left(\frac{-r^2}{4 D t} \right) \right) \quad t > t_h \quad (\text{II.10})$$

- q : est la chaleur produite dans la sonde [W/m]
- λ : conductivité thermique [W/ (m. °C)]
- Ei : Equation intégrale définie comme suit :

$$-\text{Ei} \left(\frac{-r^2}{4 D t} \right) = -\gamma - \ln \left(\frac{r^2}{4 D t} \right) + \frac{r}{4 D t} - \left(\frac{r^2}{8 D t} \right) + \dots \quad (\text{II.11})$$

- γ = 0.5772 : constante d'Euler
- r : distance entre l'aiguille de chauffage et l'aiguille de mesure de température [m]
- t_h : temps de chauffage [s]

Pour les sondes KS-3, TR-3 et RK-3 à une seule aiguille :

$$\Delta T = T - T_0 = \left(\frac{q}{4 \pi \lambda} \right) \left(\ln (t) - \gamma - \ln \left(\frac{r^2}{4 D} \right) \right) \quad (\text{II.12})$$

$$= \left(\frac{q}{4 \pi \lambda}\right) \ln(t) + C$$

Cette équation présente une relation linéaire entre ΔT et $\ln(t)$ de pente $a = \frac{q}{4 \pi \lambda}$. Le tracé de cette fonction est présenté dans la **Figure II. 17** :

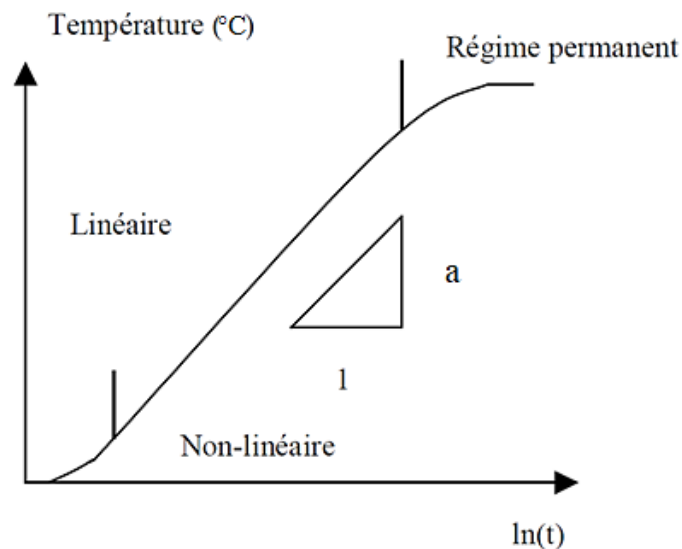


Figure II. 17 : Evolution de la température en fonction du temps - Résultat de dispositif « Tempos Meter » [Hibouche, 2013]

Finalement, la conductivité thermique est $\lambda = \frac{q}{4 \times \pi \times a}$ [W/ (m. °C)].

L'essai dure 120 secondes divisées comme indiqué dans la **Figure II. 18** :

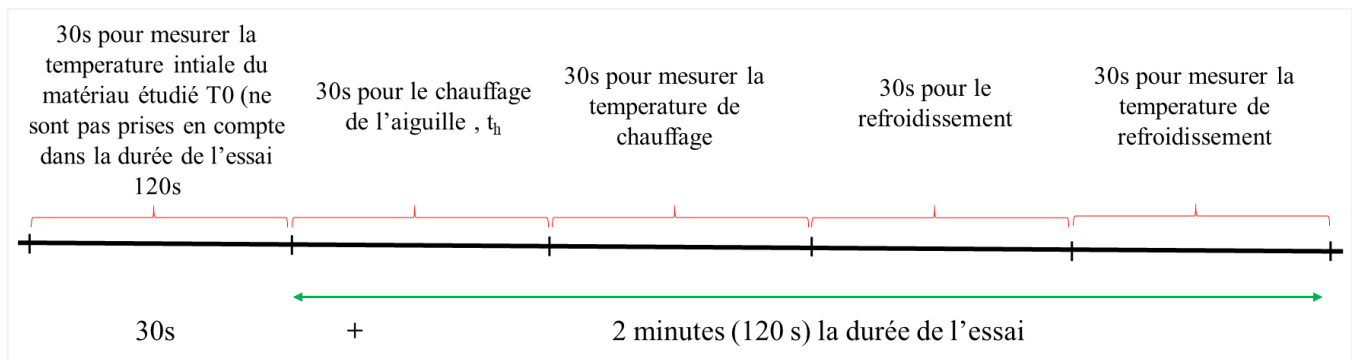


Figure II. 18 : Les durées des différentes étapes de mesure des propriétés thermiques à l'aide de « Tempos Meter »

II. 4. 2. 2 Dispositif de mesure de la résistance thermique en régime stationnaire

Le dispositif permet de mesurer la résistance et la conductivité thermiques en régime stationnaire des échantillons de $60 \times 50 \text{ mm}^2$ et d'épaisseur variant entre 0 et 20 mm (**Figure**

II. 19). Le dispositif est équipé de deux plaques thermo-régulées (plaque chaude et plaque froide) associées à des capteurs de température.

Les deux plaques assurent une homogénéité de la température sur chaque face de l'échantillon par serrage. La plaque du bas est au contact d'une source froide non réglable. La plaque du haut est au contact d'une source chaude, dont la puissance thermique est réglable.

Le principe de mesure consiste à régler la puissance thermique de la plaque chaude de façon à ce que la température chaude T_c soit la plus proche possible de la température ambiante. Le réglage s'opère par action sur la tension U réglable de 0 à 12V.

En régime permanent, lorsque les températures n'évoluent plus dans le temps, chaque plan a une température homogène sur toute sa surface et on peut déterminer la conductivité thermique [W/ (m. °C)] du matériau par la relation de Fourier décrite précédemment :

$$\lambda = \frac{q \times e}{\Delta T \times S} = \frac{V \times I \times e}{(T_c - T_f) \times S} \quad (\text{II.13})$$

- q : flux thermique [W]
- e : épaisseur du matériau étudié [m]
- S : surface du matériau exposée au flux thermique [m²]
- ΔT : écart entre les températures chaude T_c et froide T_f [K]
- V : tension appliquée à la résistance chauffante [V]
- I : intensité appliquée à la résistance chauffante [A]

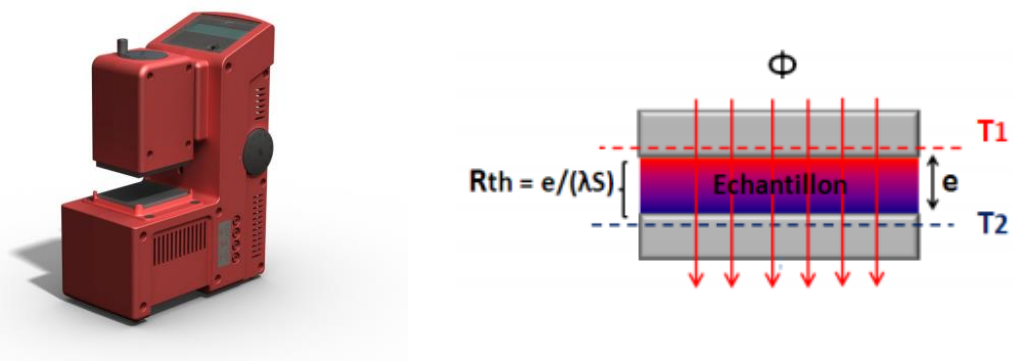


Figure II. 19 : Dispositif de mesure de la conductivité thermique « Plaque chaude gardée » en régime permanent

II. 5 Conclusion

Ce chapitre synthétise les différentes techniques et dispositifs expérimentaux utilisés pour établir la caractérisation hygro-thermique des éco-matériaux, terre crue, fibres de lin et matériau composite terre-fibres de lin. Dans la première partie, nous avons présenté les différents matériaux ainsi que leurs propriétés physiques. Ensuite, la méthode de la confection des échantillons de fibres de lin et du composite terre-fibres avec différents pourcentages et arrangement a été présentée. Finalement, la dernière partie a été consacrée à la description détaillée de tous les protocoles et les dispositifs expérimentaux utilisés pour réaliser les essais de transferts thermique et hygrométrique. En effet, la caractérisation thermique des différents matériaux a été réalisée à l'aide du dispositif « Tempos Meter ». Ce dernier, permet de déterminer les propriétés thermiques telles que la conductivité, la diffusivité et la capacité thermiques. En outre, en ce qui concerne la caractérisation hygrométrique, des dispositifs développés au laboratoire ainsi qu'un autre automatisé appelé « Gravitest » basés tous sur la méthode de la coupelle, ont été utilisés pour mesurer la perméabilité à la vapeur des fibres, de la terre crue et du matériau composite terre-fibres.

Chapitre III

*Caractérisation hygrométrique et
thermique de la terre crue renforcée :
Résultats expérimentaux et interprétations*

III. 1 Introduction

Dans ce chapitre, on se propose de présenter les résultats de la caractérisation thermique et hygrométrique des fibres de lin seules, du limon seul et du matériau composite limon-fibres de lin. Cette caractérisation a été effectuée à l'aide des dispositifs décrits dans le chapitre précédent. L'étude de l'effet de plusieurs paramètres tels que la teneur en eau, la température, le taux et l'orientation des fibres sur le comportement hygro-thermique des matériaux biosourcés mentionnés est discuté dans ce chapitre.

III. 2 Fibres de lin

III. 2. 1 Propriétés hygrométriques

III. 2. 1. 1 Isothermes d'adsorption-désorption

L'isotherme d'adsorption-désorption des fibres de lin a été déterminée à l'aide de la technique des dessiccateurs, par mesure de la teneur en eau d'échantillons cylindriques de 25 mm de diamètre et 70 mm de hauteur, soumis à différentes humidités relatives dans plusieurs dessiccateurs au même temps (**Figure III. 1**). On pèse l'échantillon une fois par jour et on arrête l'essai lorsque la masse devient constante (une semaine est généralement suffisante pour obtenir une masse constante), ce qui signifie que l'équilibre hydrique est atteint entre l'échantillon et l'humidité relative ambiante imposée. A l'équilibre, à partir des résultats obtenus de chaque dessiccateur, on obtient un point (RH, w) de la courbe d'adsorption des fibres de lin.

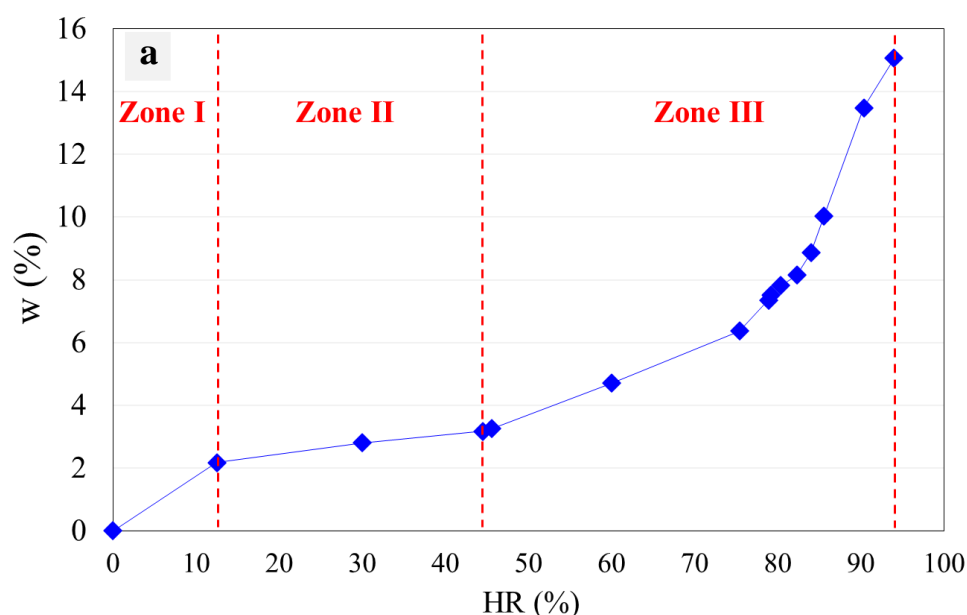


Figure III. 1 : Essai d'isotherme d'adsorption des fibres de lin

Les résultats de mesure de l'isotherme d'adsorption des fibres de lin sont illustrés dans la **Figure III. 2**. Il s'agit d'une isotherme de type II selon la classification de de l'IUPAC

(International Union of Pure and Applied Chemistry). D'après l'allure de la courbe, on peut distinguer trois zones :

- **Zone I** : correspond à une plage d'humidité relative entre 0 et 12.5%. Dans cette zone, on remarque une augmentation importante de la teneur en eau des fibres initialement sèches où la teneur en eau passe de 0 à 2.17% (soit de 0 à 7 kg/m³).
- **Zone II** : correspond à une plage d'humidité relative entre 12.5 et 44.5% où l'augmentation de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative est quasiment linéaire et faible. Dans cette zone, l'absorption d'eau se fait couche par couche et c'est ce qu'on appelle adsorption multicouches d'après Collet (2004) et Phung (2018).
- **Zone III** : correspond aux humidités relatives supérieurs à 44.5 %. Dans cette zone, on voit une augmentation plus importante de la teneur en eau où cette dernière passe de 3.25% pour une RH = 44.5% à 15.06% pour une RH = 94%. Ceci peut être expliqué par la condensation de l'eau au niveau des multicouches qui se rejoignent en créant des ponts liquide avec l'augmentation de l'humidité relative [Collet, 2004, Phung, 2018]. Les fibres végétales sont en général hydrophiles, donc en présence de grandes quantités de vapeur d'eau, ils absorbent de grandes quantités d'eau. On remarque aussi que les fibres de lin de notre étude ont une capacité d'adsorption d'eau plus faible que celle des fibres de lin présentées dans l'étude de Phung (2018) (voir **Figure I. 17**, chapitre I). Cette différence est due au fait qu'il ne s'agit pas du même procédé de transformation des fibres de lin et donc de propriétés mécaniques et hygrothermiques différentes des deux types de fibres de lin.



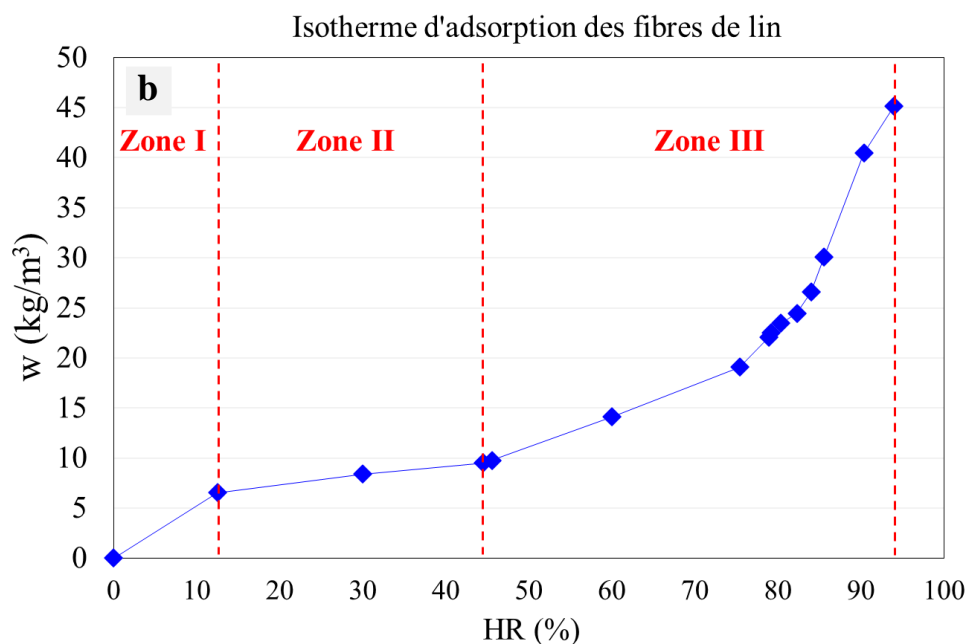


Figure III. 2 : Isotherme d'adsorption des fibres de lin, (a) en fonction de la teneur en eau pondérale et (b) en fonction de la teneur en eau massique

III. 2. 1. 2 Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur des fibres de lin a été déterminée à l'aide de la méthode de la coupelle décrite dans le paragraphe II. 5. 1. 2. 1. Afin d'évaluer l'effet de l'anisotropie des fibres via à vis du transfert de vapeur d'eau, des essais avec des fagots de fibres cylindriques en arrangement longitudinal, aléatoire et transversal ont été réalisés. Les fagots font 40 mm en diamètre et 70 mm en hauteur (**Tableau II. 5**). Cinq densités ont été évaluées pour chaque type d'arrangement ce qui permet d'analyser l'effet de ce paramètre physique sur le comportement hygrométrique des fibres de lin. La **Figure III. 3** montre la variation de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de la densité pour trois directions différentes. D'après les résultats, la perméabilité à la vapeur d'eau diminue avec l'augmentation de la densité des fibres. Celle, par exemple, des fibres longitudinales (parallèles à la direction du flux) passe de 1.11×10^{-10} à 6.4×10^{-11} kg/(m. s. Pa) lorsque la densité des fibres triple. Cette diminution est plus importante dans le cas des fibres transversales où la perméabilité passe de 6.83×10^{-11} à 3.9×10^{-11} kg/(m. s. Pa). Par ailleurs, les résultats mettent en évidence l'effet de l'orientation des fibres sur leur capacité à laisser passer la vapeur d'eau. En effet, plus les fibres sont orientées dans le même sens que le flux de vapeur, plus elles sont perméables à la vapeur d'eau.

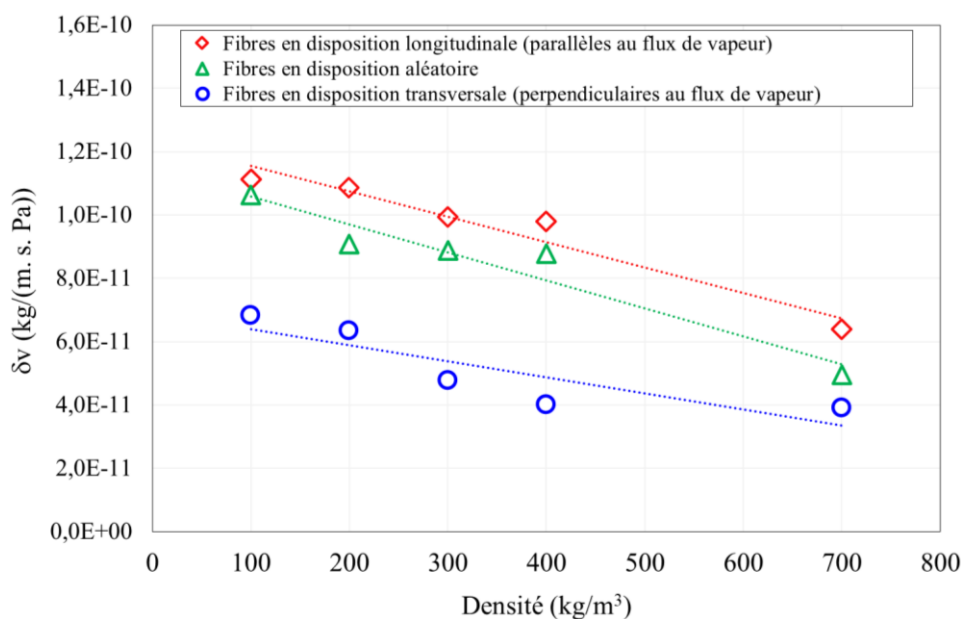


Figure III. 3 : Evolution de la perméabilité à la vapeur des fibres de lin en fonction de leurs densités et directions

III. 2. 2 Propriétés thermiques

III. 2. 2. 1 Dispositif « Tempos Meter » de mesure de la conductivité thermique en régime transitoire

Les conductivités thermiques des fibres de lin en différents arrangements, densités et températures ont été déterminées afin d'évaluer les effets de ces paramètres sur le comportement thermique. Des fagots de fibres de densités 100, 200, 300 et 400 kg/m³ ont été préparés. Un tube en PVC de diamètre réglable a été utilisé afin de faire varier la densité (**Figure III. 4**). Une fois la densité fixée, la sonde KS-3 du dispositif « Tempos Meter » qui permet de mesurer les propriétés thermiques des matériaux isolants, est insérée dans le fagot de fibres. Avant de lancer la mesure, les fibres ainsi que la sonde sont placées dans une enceinte climatique régulée en température permettant d'évaluer l'effet de la température sur la conductivité thermique des fibres de lin. Les fonctionnalités et le principe de mesure du dispositif « Tempos Meter » ont été détaillés dans le paragraphe II. 4. 2. 1 du chapitre II. A l'aide de ce dispositif, une tension est imposée au niveau de la sonde KS-3 pour mesurer par la suite l'évolution de la température en fonction du temps qui permet la détermination des propriétés thermiques des fibres de lin.



Figure III. 4 : Essai de mesure des propriétés thermiques des fibres de lin

Les résultats des essais de mesure de la conductivité thermique des fibres de lin en différents arrangements, densités et températures sont illustrés dans les **Figures III. 5** et **III. 6**. Ces résultats illustrent bien les effets de la densité, de la température et de l'arrangement des fibres sur la conductivité thermique. En effet, plus la densité des fibres est importante, moins elles sont conductrices de chaleur. L'augmentation de la conductivité en fonction de la densité est expliquée par la diminution de la porosité dans les fagots. Ceci a été montré par différents auteurs dans la littérature pour différents matériaux de construction. Pour les fibres transversales, la conductivité varie linéairement de 0.03 à 0.06 W/(m. °C) avec une pente de 9×10^{-5} (W.m²)/(°C. kg) et pour les fibres aléatoires, elle varie linéairement de 0.045 à 0.067 W/(m. °C) avec une pente de 8×10^{-5} (W.m²)/(°C. kg) pour une densité de 100 à 400 kg/m³. On peut remarquer aussi, que les fibres en arrangement aléatoire sont plus conductrices de chaleur que celles en arrangement transversal. Ceci est dû au fait que l'augmentation de nombre de points de contact entre fibres améliore la diffusion de la chaleur, et donc la porosité dans le cas des fibres aléatoires est plus faible que dans le cas des fibres transversales. Par contre, la disposition transversale (fibres perpendiculaires au sens de flux) rend la diffusion de chaleur difficile vu que la chaleur passe par l'air et les fibres en alternance. De plus, on voit bien l'augmentation de la conductivité avec la hausse de la température. La dépendance de la conductivité thermique λ (W/(m. °C)) des matériaux isolants à la température a été traitée dans plusieurs travaux [Berardi et Naldi, 2017 ; Koru, 2016 ; Khoukhi, 2018 ; Xu et al., 2019 . Abdou et Budaiwi, 2005 ; Bennai, 2017]. Selon leurs résultats, la valeur de λ augmente linéairement avec l'augmentation de la température. En prenant l'exemple de l'étude de Khoukhi et al. (2018) qui ont étudié l'effet de la température sur la conductivité thermique du polystyrène, la **Figure III. 7** montre bien la corrélation linéaire entre ces deux paramètres. Ceci

peut être expliqué par le fait qu'à fortes températures, les molécules d'air deviennent plus agitées ce qui accélère leur mouvement de la zone chaude vers la zone froide et donc le matériau sera plus conducteur.

Les **Figures III. 5** et **III. 6** montrent une corrélation linéaire entre la conductivité thermique λ et la température T quels que soient l'arrangement et la densité des fibres. D'après les résultats, cette relation linéaire est définie par l'équation suivante :

$$\lambda = \lambda_0(1 + b T) \quad (\text{III.1})$$

- λ_0 : conductivité thermique des fibres à $T=0$ °C
- $b = \frac{a}{\lambda_0}$ [°C⁻¹]
- $a = 0.0003$: pente de la droite linéaire [W/m]

Dans le domaine de construction, la conductivité thermique des matériaux de construction et surtout d'isolation est évaluée dans des conditions standards de 23 °C de température et 50% d'humidité relative et considérée ensuite constante quelles que soient la température ambiante et l'humidité. Néanmoins, les résultats obtenus dans cette étude et celles de la littérature mettent en évidence la dépendance de la conductivité thermique de plusieurs facteurs. Les performances thermiques dans un climat plus chaud ou plus froid peuvent présenter un écart important par rapport aux valeurs obtenues dans les conditions standards (23 °C et 50%). Par conséquent, cela peut affecter la précision des performances thermiques et énergétiques du bâtiment.

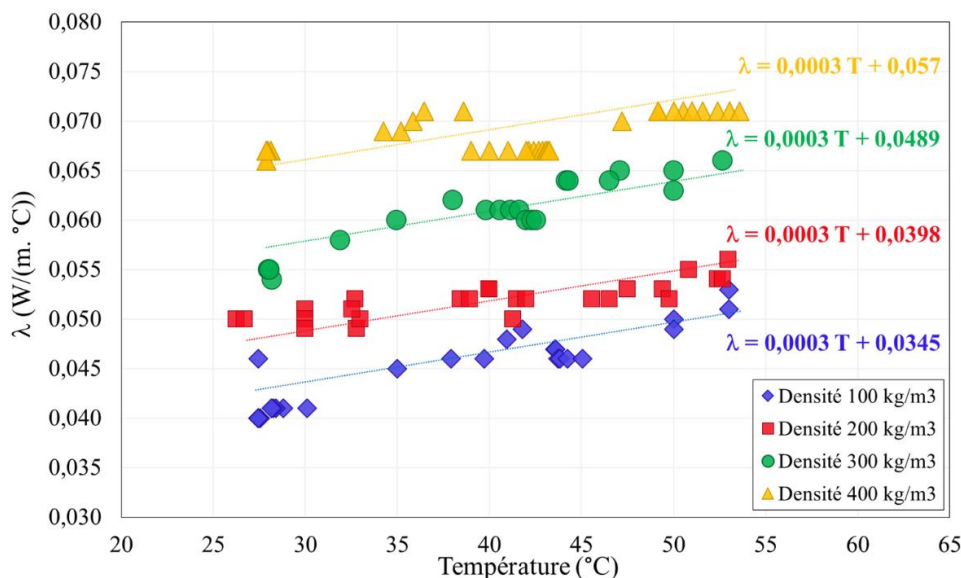


Figure III. 5 : Evolution de la conductivité thermique des fibres de lin en arrangement aléatoire en fonction de la température et la densité

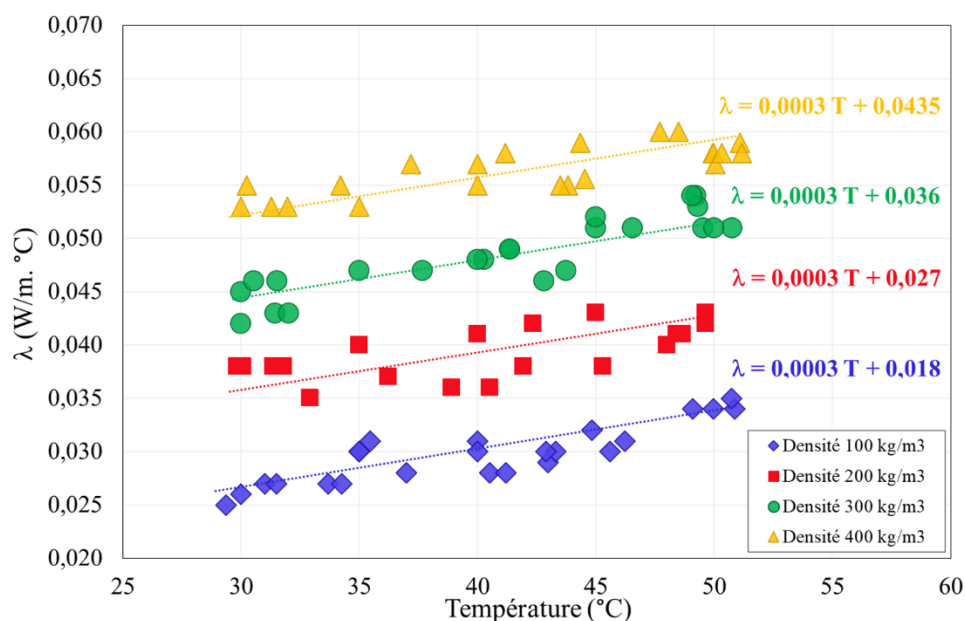


Figure III. 6 : Evolution de la conductivité thermique des fibres de lin en arrangement transversal en fonction de la température et la densité

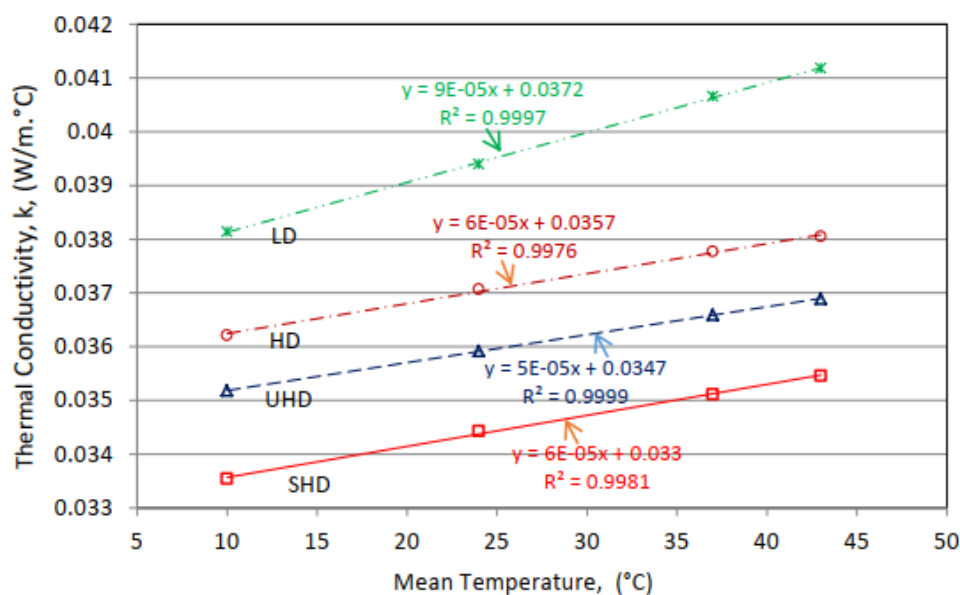


Figure III. 7 : Evolution de la conductivité thermique du polystyrène en fonction de la température [Khoukhi et al., 2018]

Une comparaison entre les valeurs de la conductivité thermique des fibres aléatoires et transversales pour les différentes densités : 100, 200, 300 et 400 kg/m³ est présentée dans les **Figures III. 8 (a), (b), (c) et (d)**. Elle montre que quel que soit la densité, les fibres aléatoires sont toujours plus conductrices de la chaleur que les fibres transversales. Ceci peut être expliqué par le fait que la disposition transversale s’oppose plus au sens flux de chaleur puisque les fibres sont perpendiculaires au flux. De plus, elles sont parallèles donc la chaleur passe en alternance par l’air et les fibres, ce qui fait diminuer la circulation de la chaleur puisque la

conductivité thermique de l'air est de l'ordre de 0.025 W/ (m. K) [Kallel, 2016]. Par contre, l'augmentation du nombre de points de contact entre fibres du fait d'une disposition aléatoire améliore la diffusion de chaleur dans l'échantillon.

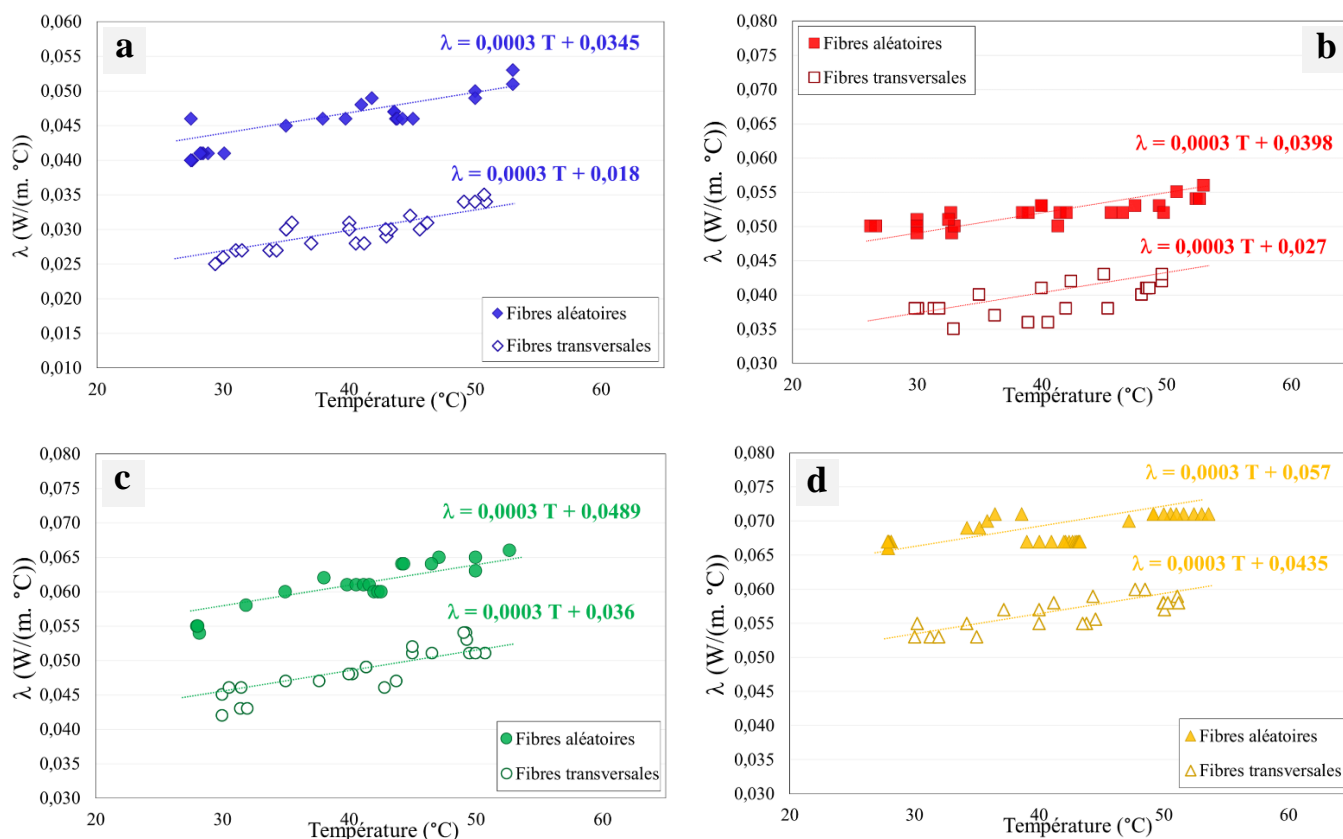


Figure III. 8 : Comparaison des résultats de conductivité thermique des fibres aléatoires et transversales pour les différentes densités : (a) 100 kg/m³, (b) 200 kg/m³, (c) 300 kg/m³ et (d) 400 kg/m³

En outre, la température a un impact sur la capacité thermique des fibres de lin quel que soit l'arrangement (**Figure III. 9**). On observe une corrélation linéaire aussi entre les deux paramètres. L'évolution de la capacité thermique pour les fibres en disposition aléatoire suit une pente de 0.0038 W/m alors que celle des fibres en disposition transversale suit une pente plus importante égale à 0.0063 W/m (quasiment le double). Ceci est dû au fait que les fibres transversales sont perpendiculaires au sens du flux de chaleur, donc la diffusion est plus difficile que les cas des fibres aléatoires ce qui amène à un stockage de chaleur dans les fibres, plus important. Les résultats montrent que la relation entre la capacité thermique et la densité peut être définie comme suit :

$$c = c_0(1 + b' T) \quad \text{(III.2)}$$

- c_0 : conductivité thermique des fibres à $T=0$ °C

- $b' = \frac{a'}{c_0} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
- Pour les fibres en arrangement aléatoire : $a' = 0.0038$: pente de la droite linéaire [W/m]
- Pour les fibres en arrangement transversal : $a' = 0.0063$: pente de la droite linéaire [W/m].

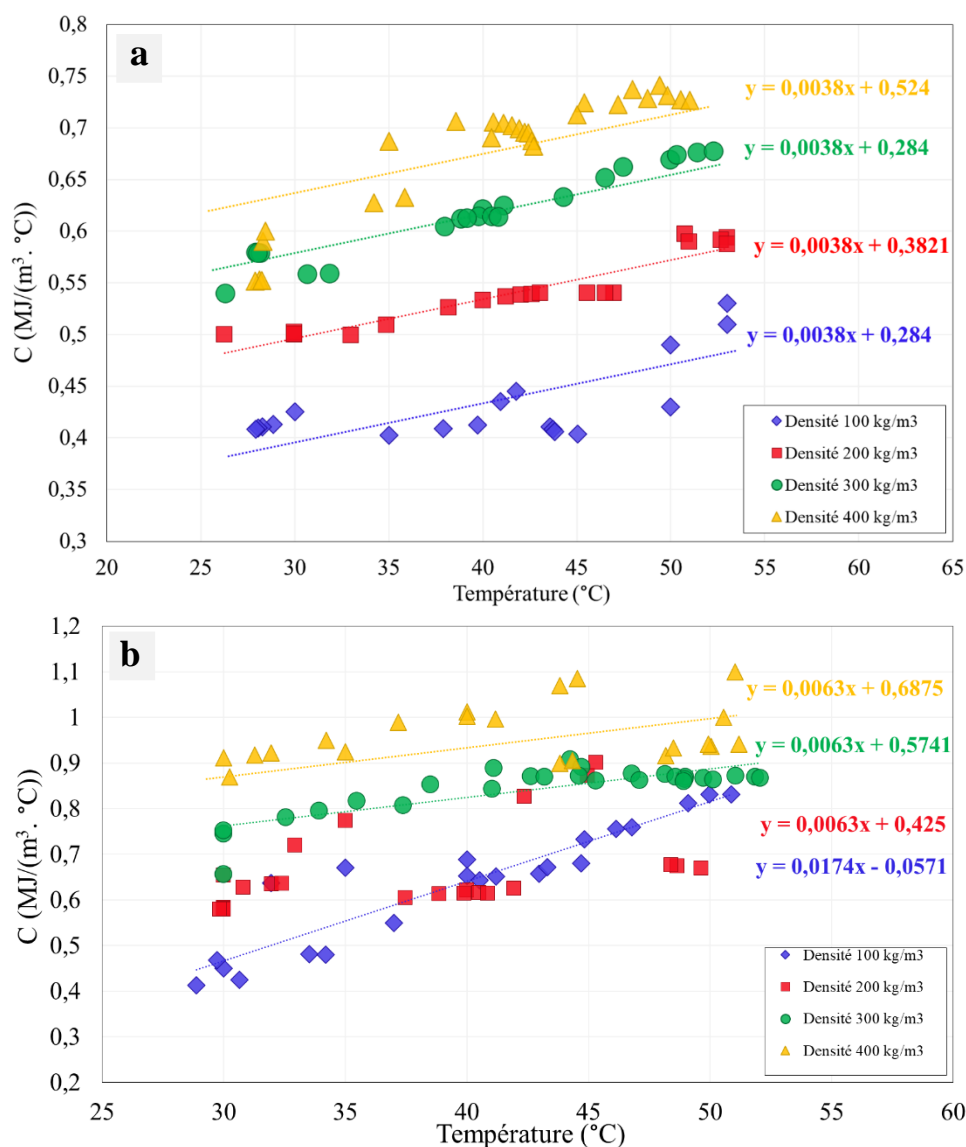


Figure III. 9 : Evolution de la capacité thermique des fibres de lin en arrangement aléatoire (a) et transversal (b) en fonction de la température et la densité

III. 2. 2. 2 Dispositif « Mesure de la conductivité thermique » en régime permanent

Les mesures ont été effectuées sur des échantillons parallélépipédiques de fibres à l'état sec de 50 mm de largeur et 60 mm de longueur et d'épaisseur e dépendant de la compacité. L'essai consiste à placer les échantillons entre deux plaques chaude et froide afin qu'ils soient soumis

à un gradient de température constant et unidirectionnel. L'effet de la densité ρ (kg/m^3) a été aussi évalué dans cette partie et les résultats vont être comparés à ceux obtenus à l'aide du dispositif « Tempos Meter ». En effet, la densité de l'échantillon de fibres de masse constante est fixée par la compression entre les deux plaques ce qui permet de diminuer son épaisseur e .

La **Figure III. 10** illustre l'évolution de la conductivité thermique des fibres de lin en arrangement aléatoire et transversal en fonction de la densité. Les essais ont été réalisés dans une salle thermostatée dont la température est de l'ordre de 29°C . Les résultats mettent en évidence l'effet de la densité sur la conductivité thermique, plus le matériau est dense moins il est conducteur de la chaleur. Ceci confirme les résultats obtenus par le dispositif « Tempos Meter ».

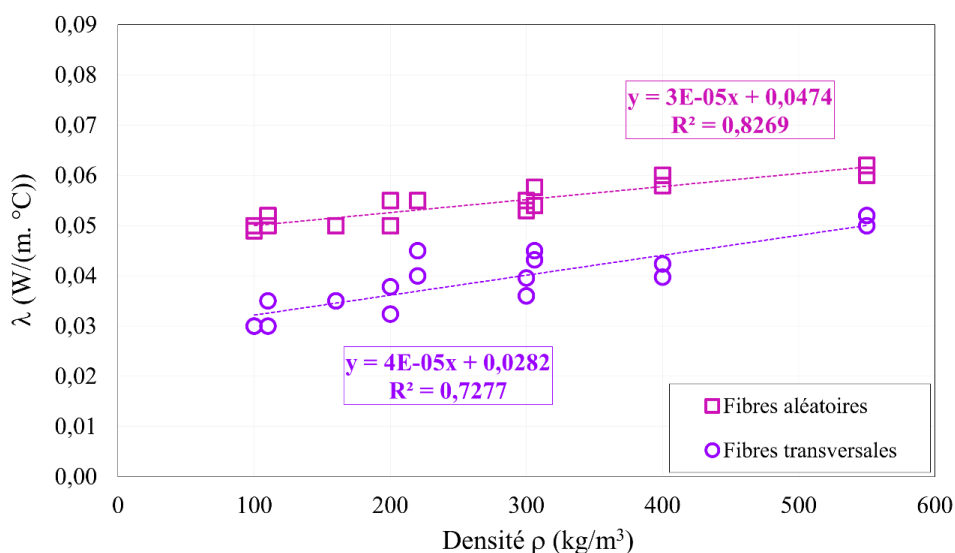


Figure III. 10 : Conductivité thermique de fibre de lin en fonction de la densité

La **Figure III. 11** présente la superposition des résultats obtenus par les deux dispositifs thermiques pour l'arrangement aléatoire des fibres de lin seulement. Les résultats présentés sont pour une température moyenne de l'ordre de $29 \pm 2^\circ\text{C}$. La comparaison des résultats des deux dispositifs présente un écart maximal important entre les conductivités thermiques de l'ordre de 25%. Cet écart peut être expliqué par le fait que l'échantillon n'est pas isolé latéralement, ce qui engendre des déperditions importantes de chaleur durant le flux axial. Par ailleurs, le contrôle de la densité des fibres est très aléatoire vu qu'il est défini par la distance très peu précise entre les deux plaques. D'ailleurs, on remarque d'après la **Figure III. 11**, que le coefficient de corrélation R^2 est égal à 0,9786 pour les résultats obtenus à l'aide de « Tempos Meter » et à 0,8269 pour les résultats de l'autre dispositif. En conclusion et pour toutes ces

raisons, le dispositif « Tempos Meter », appareil professionnel, nous semble le plus fiable et sera adopté pour la suite de la caractérisation thermique des matériaux de construction.

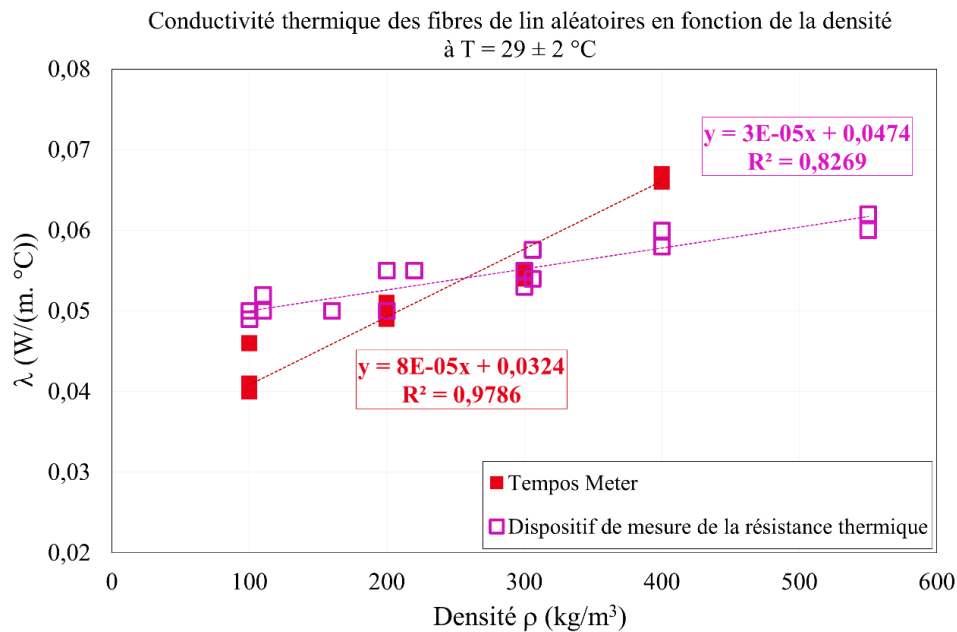


Figure III. 11 : Superposition des résultats des deux dispositifs « Tempos Meter » et « Dispositif de mesure de la résistance thermique »

De nombreuses études ont montré que la conductivité thermique des différents matériaux augmente avec l'augmentation de la densité. On peut citer l'exemple de Huang et al. (2018) qui ont étudié les propriétés hygrothermiques des fibres de bambou et qui ont montré que la conductivité augmente en fonction de la densité et en fonction de l'humidité comme le montre la **Figure III. 12.**

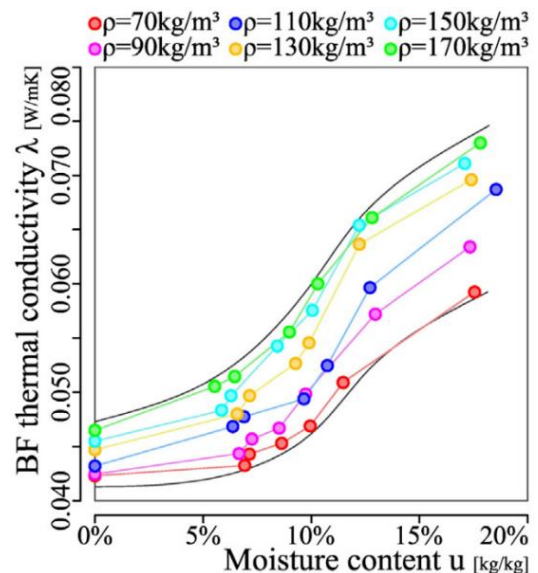


Figure III. 12 : Evolution de la conductivité thermique de fibres de bambou en fonction de la densité et de l'humidité relative [Huang et al., 2018]

Contrairement à Vaitkus (2014) qui a trouvé que la conductivité thermique des fibres de lin aléatoires (longues et hachées) décroît de 0.052 W/ (m. K) à 0.042 W/ (m. K) pour une densité variant de 40 kg/m³ à 80 kg/m³ et elle croit par

la suite de 0.042 W/ (m. K) à 0.048 W/ (m. K) pour une densité de 80 kg/m³ à 100 kg/m³. Par contre, la conductivité thermique des fibres de chanvre diminue en fonction de la densité quel que soit le type de fibres longues ou bien hachées (**Figure III. 13**).

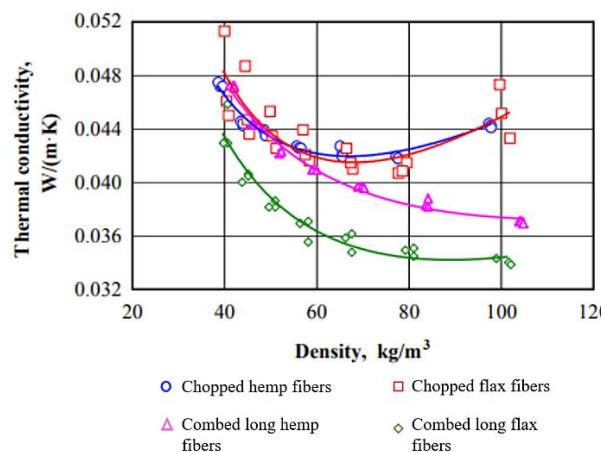


Figure III. 13 : Evolution de la conductivité thermique de fibres de lin et de chanvre en fonction de la densité [Vaitkus, 2014]

III. 3 Limon GO

III. 3. 1 Propriétés hygrométriques

III. 3. 1. 1 Isothermes d'adsorption/désorption

Les isothermes d'adsorption/désorption du limon GO ont été déterminées à l'aide de la technique des dessiccateurs à solutions saline saturées, par mesure de la teneur en eau des échantillons de 10×10×10 mm³ de volume soumis à différentes humidités relatives imposées en conditions isothermes. Trois états initiaux pour le limon ont été envisagés : état sec, état initial de compactage (quasi-saturation à une teneur en eau égale à 14%) et état saturé (voir **Tableau III. 4**). Les masses des échantillons sont mesurées deux fois par jour ce qui permet de vérifier si l'équilibre hydrique est atteint entre l'échantillon et l'humidité relative imposée.

Les résultats sont présentés dans la **Figure III. 15**. Les isothermes sont de type II d'après la classification de l'IUPAC. En analysant les résultats, on peut observer trois zones distinctes pour les courbes d'adsorption/désorption :

Zone I : correspond à une plage d'humidité relative de 0 à 12.5 % où on voit une augmentation en cas d'adsorption (ou bien diminution en cas de désorption) de la teneur en eau de 0 à 1,5% pratiquement pour les trois courbes.

Zone II : correspond à une plage d'humidité de 12.5 à 80% où l'augmentation en cas d'adsorption (ou bien diminution en cas de désorption) de la teneur en eau en fonction de l'humidité est linéaire et de faible pente.

Zone III : correspond à une plage d'humidité relative de 80 à 100%. Cette zone correspond à une augmentation plus importante en cas d'adsorption (ou bien diminution en cas de désorption) de la teneur en eau de 2.5 à 20%.

Les courbes d'isothermes d'adsorption/désorption caractérisent la capacité de stockage hygrométrique des matériaux. D'après les résultats, on note une hystérésis puisque les courbes d'adsorption et de désorption ne sont pas confondues. Ceci est dû au fait que les matériaux ne libèrent pas les molécules d'eau de la même façon qu'ils les accumulent. On peut remarquer aussi que la capacité du limon à stocker l'humidité est faible pour une plage d'humidité de 0 à 85% où la teneur en eau passe d'une manière douce de 0 à 3.1%. En revanche, pour des humidités plus fortes (de 85 à 100%), on voit une croissance forte de la teneur en eau de 3,1 à 20%. En comparant ces résultats avec ceux de [Fabbri et Morel \(2016\)](#) réalisés sur un sable-limoneux, composé de 15% d'argile, 20% de limon et 65% de sable (**Figure III. 17**), on peut constater un comportement hydrique similaire à celui du limon GO. [Phung \(2018\)](#) a également déterminé les isothermes pour deux types de sol (A : 26.7 % de gravier ; 40.5 % de sable et 32.8 % de limon et d' argile et B : 26 % de gravier, 35.5 % de sable et 38.5 % de limon et d'argile). L'auteur a obtenu le même type d'isothermes (Type II), mais la capacité d'emmagasinement hydrique de notre matériau limon GO est à-peu-près deux fois plus importante (**Figure III. 18**).



Figure III. 14 : Essai d'isotherme d'adsorption des fibres de lin

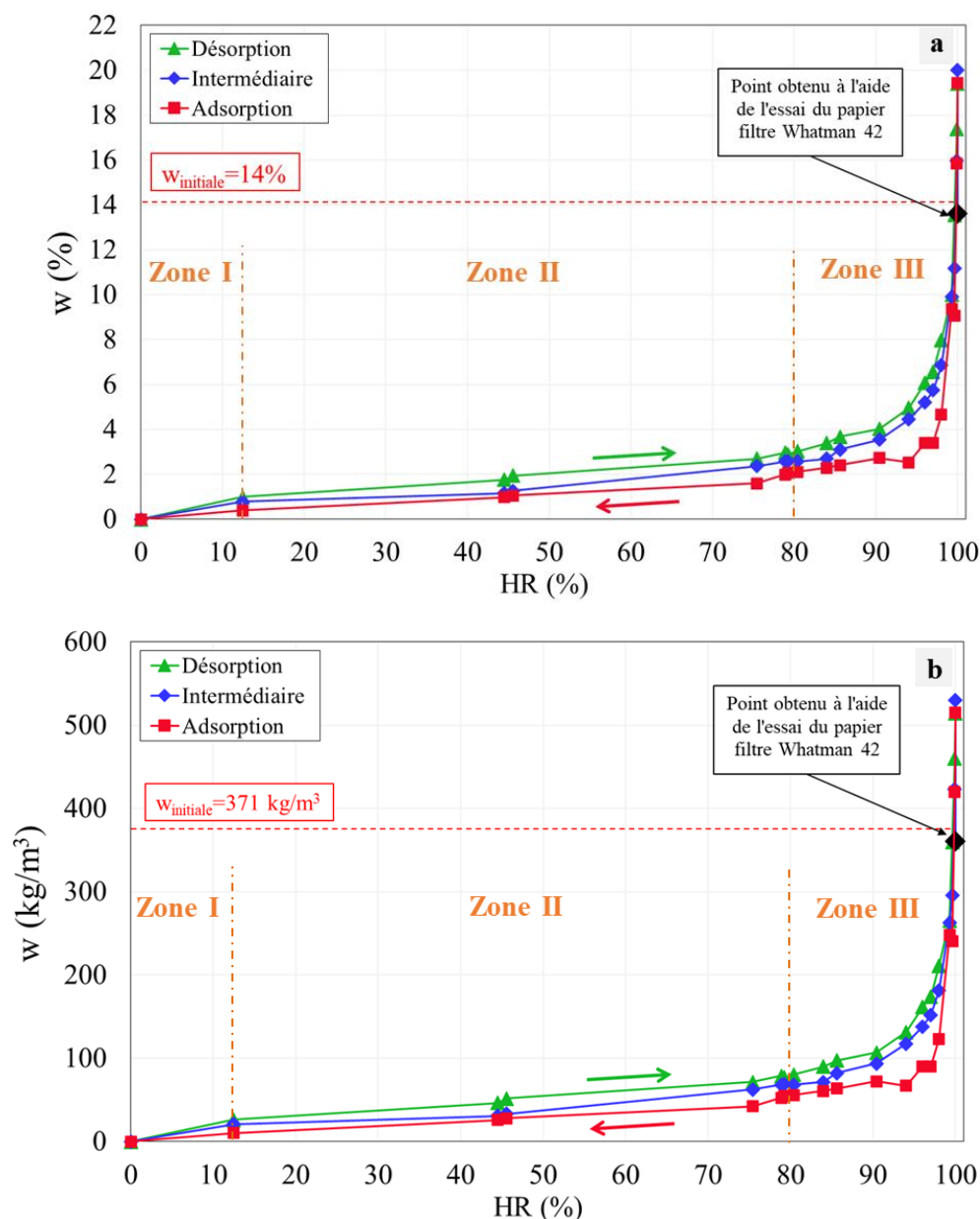


Figure III. 15 : Isothermes d’adsorption/désorption de la terre crue : (a) en teneur en eau (%) et (b) en teneur en eau massique (kg/m^3)

A présent, si on s’intéresse au comportement hydrique associé en termes de variation de volume, nous pouvons représenter les isothermes d’adsorption-désorption dans les 5 plans de la **Figure III.16**. Les figures (a) et (b) présentent la variation de volume (ou indice des vides) en fonction de la teneur en eau et de la succion respectivement. On constate que quel que soit le chemin suivi, dessiccation ou imbibition, la variation de la succion ne provoque pas de variation de volume, autrement dit, pas de retrait sur un chemin de drainage, et pas de gonflement sur un chemin d’humidification. Ceci est dû à l’état initial du matériau compacté qui lui octroie un comportement fortement surconsolidé, donc peu sensible à la sollicitation hydrique. Les plans (c) et (d) présentent la variation du degré de saturation en fonction de la

teneur en eau et de la succion respectivement. On observe une variation quasi-linéaire du degré de saturation en fonction de la teneur en eau, due à l'indice des vides quasi-constant. La figure (d) montre la variation du degré de saturation en fonction de la succion, d'abord quasi-linéaire pour les faibles succions ($s < 10$ kPa), puis la pente de variation s'adoucit pour tendre vers un degré de saturation résiduel de l'ordre de quelques % pour les fortes succions. La figure (e) n'est rien d'autre que la courbe de rétention du matériau ou SWRC (Soil Water Retention Curve). L'allure de cette courbe est similaire à celle de la figure (d), vu que l'indice des vides ne varie pas.

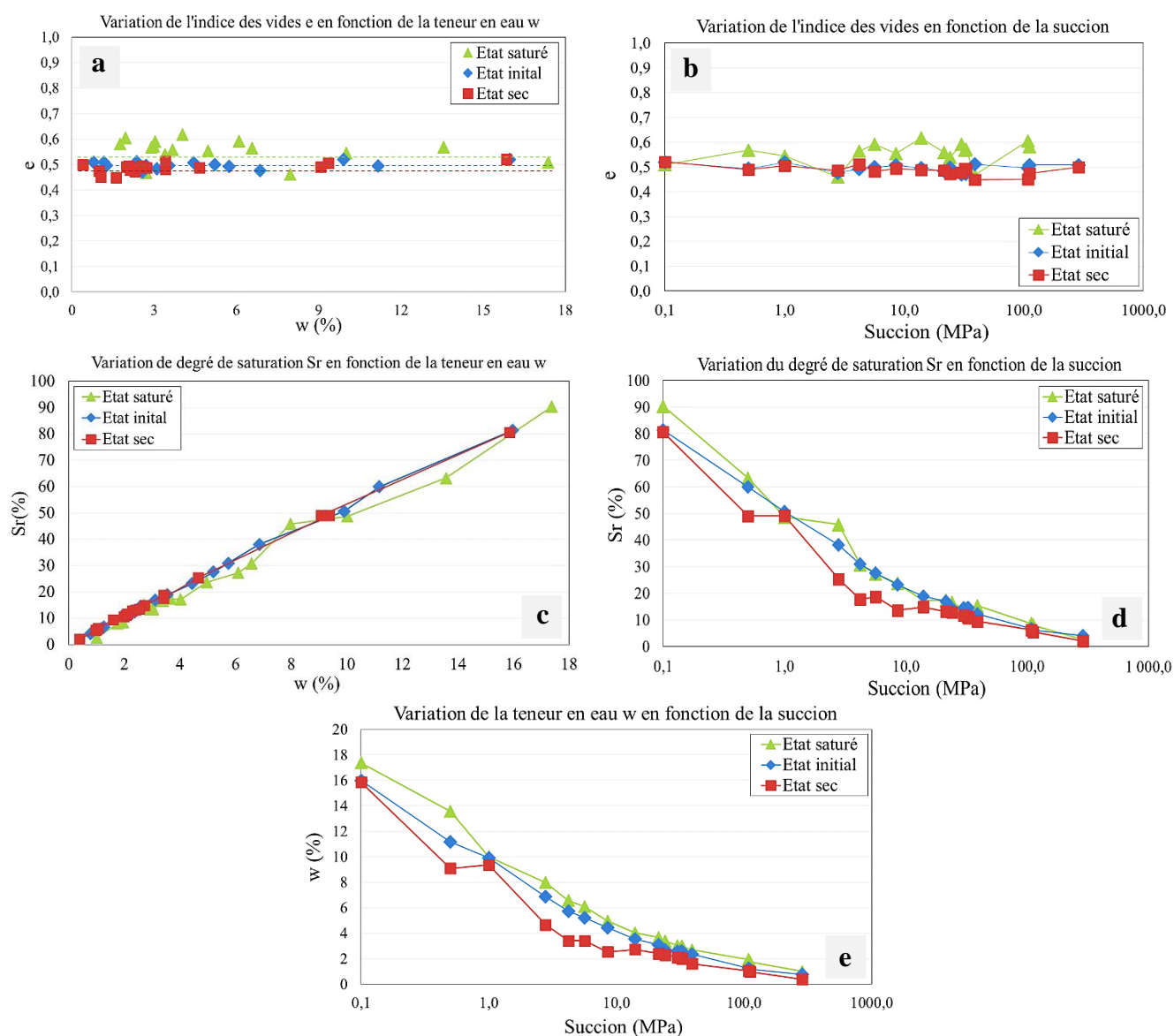


Figure III. 16 : Les courbes des différents paramètres physiques du limon

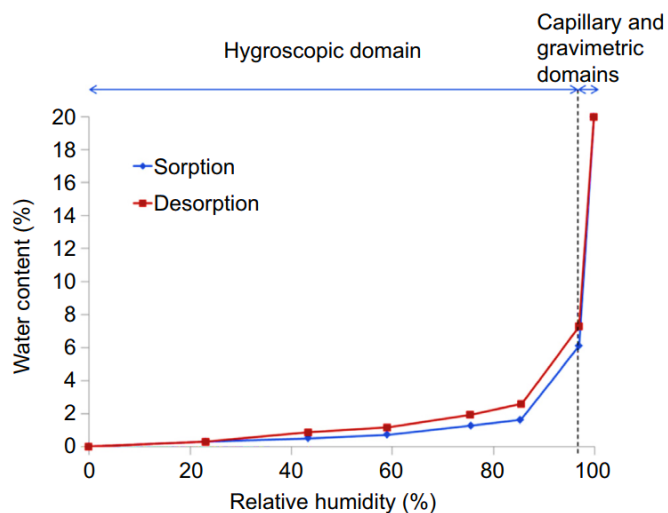


Figure III. 17 : Isotherme d'adsorption/désorption du sable – limoneux (Fabbri & Morel., 2016)

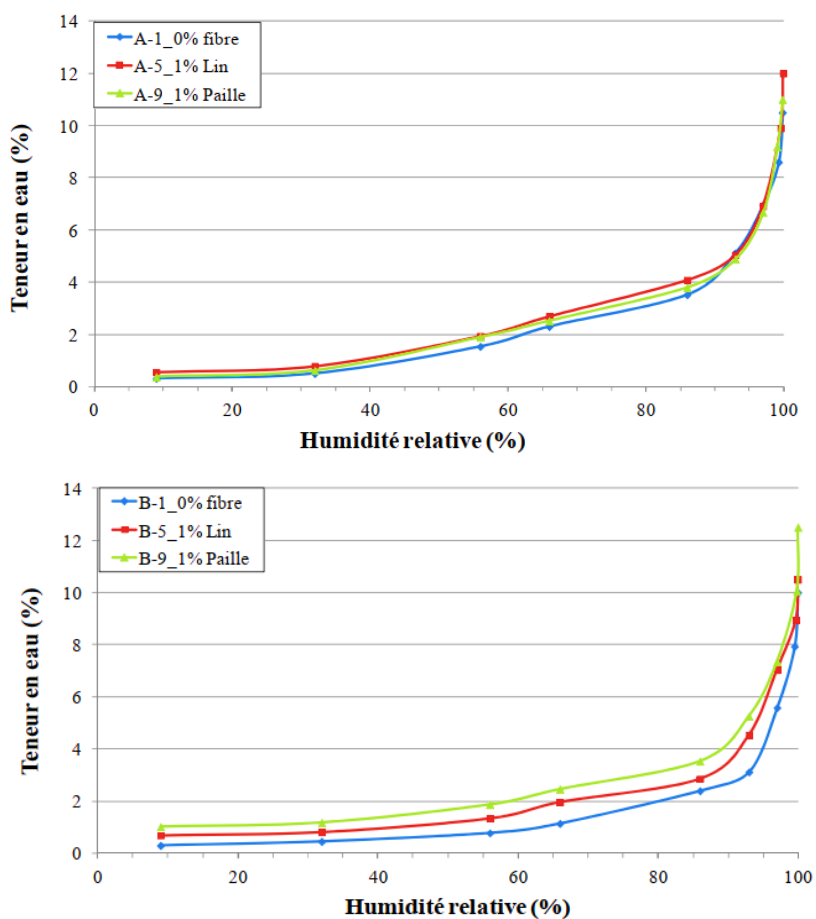


Figure III. 18 : Courbes d'isothermes de désorption de la terre-fibres de lin et de paille pour les deux types de sol A et B respectivement (Phung, 2018)

III. 3. 1. 2 Perméabilité à la vapeur d'eau

III. 3. 1. 2. 1 Dispositif « Gravitest »

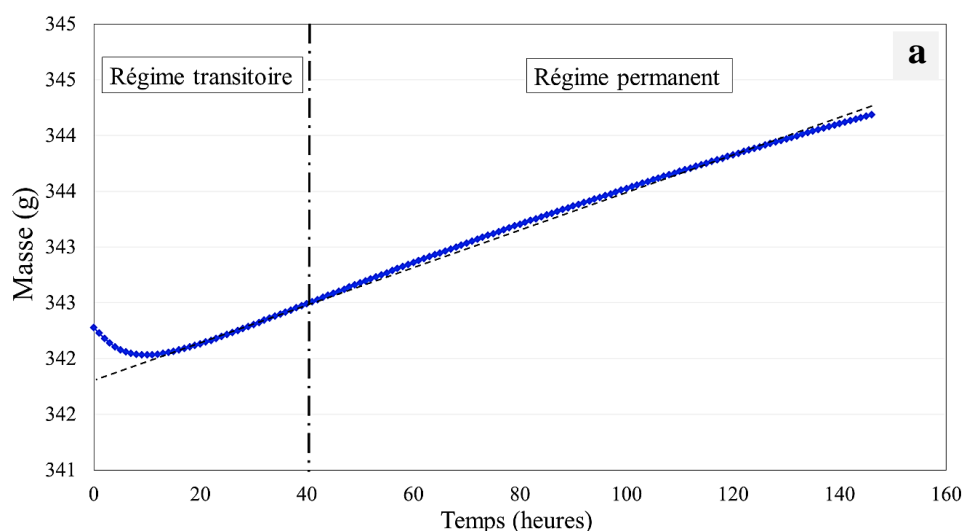
➤ Impact de la méthode de mesure

Deux essais de mesure de la perméabilité à la vapeur du limon GO ont été réalisés à l'aide du dispositif « Gravitest », un en coupelle sèche et l'autre en coupelle humide (voir **Tableau III. 1**) afin de voir l'effet des conditions aux limites hydriques sur la perméabilité à la vapeur. Les échantillons utilisés pour cette partie sont cylindriques, quasi-saturés (état initial de compactage, $S_r = 71\%$) et de 100 mm de diamètre et de 12 mm d'épaisseur. Les propriétés physiques des deux échantillons sont présentées dans le **Tableau III. 4**.

Tableau III. 1 : Conditions climatiques en humidité et température pour les essais coupelles sèche/humide

	Coupelle sèche	Coupelle humide
Humidité relative dans la coupelle (%)	3 (gel de silice)	93
Humidité relative à l'intérieur de la chambre climatique (%)	50	50
Température (°C)	23	23

Les **Figures III. 19 et III. 20** présentent l'évolution des masses de vapeur et des densités de flux de vapeur d'eau respectivement en fonction du temps lors des deux essais. Elles montrent bien les régimes transitoire et permanent par lesquels passe les échantillons au cours des tests de transfert de vapeur d'eau. Au début du régime transitoire, on observe une chute de masse de 342.5 à 342 g. Ceci est dû au fait que l'échantillon est initialement quasi-saturé ($S_r = 71\%$) et donc son humidité initiale est plus importante que celle du gradient auquel il est soumis. Ainsi, l'échantillon qui cherche à s'équilibrer avec le gradient de vapeur imposé, perd de l'humidité (vapeur + liquide) à partir de sa masse initiale.



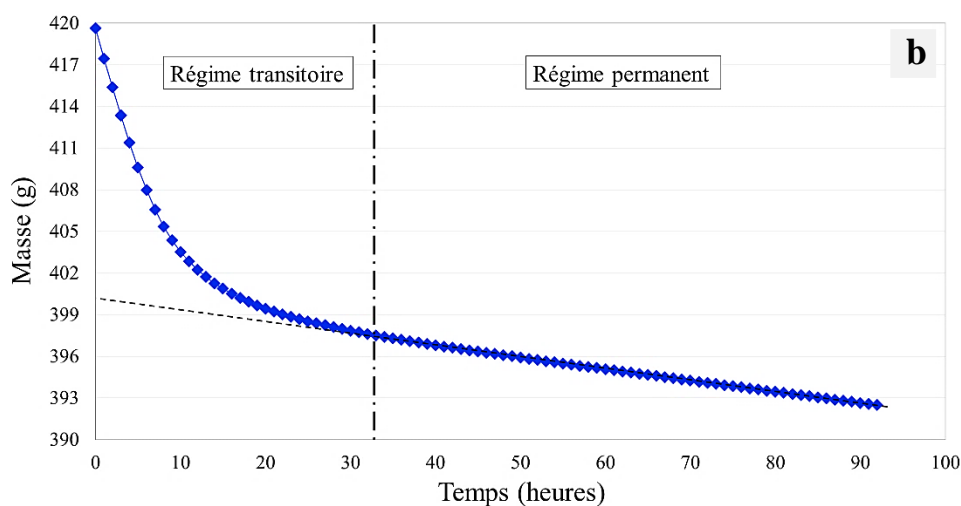


Figure III. 19 : Courbes des variations des masses de vapeur d'eau : (a) Coupelle sèche et (b) coupelle humide

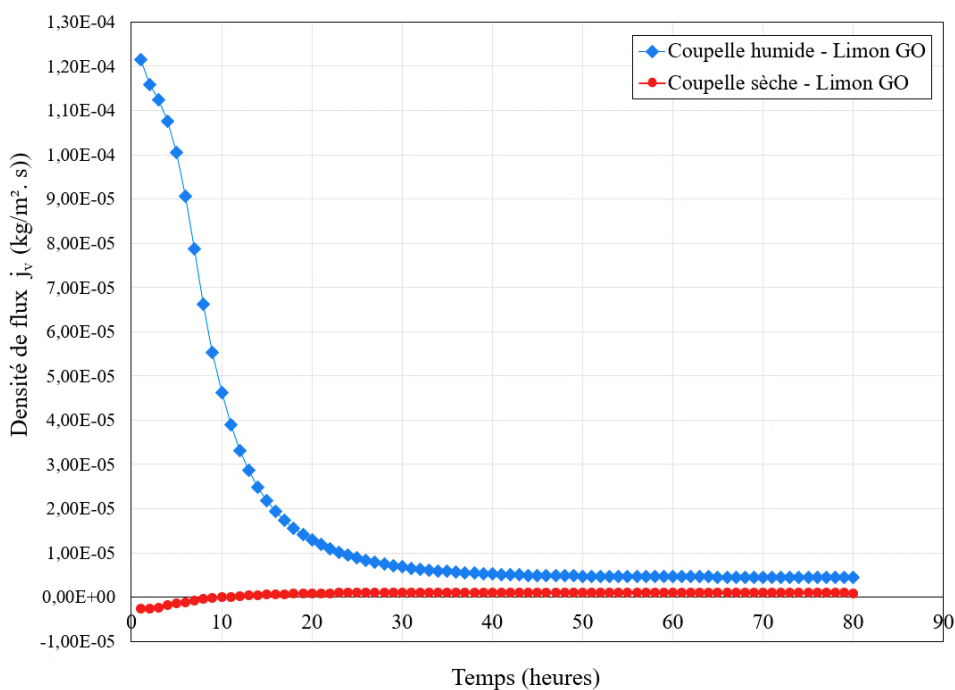


Figure III. 20 : Superposition des résultats de transfert de vapeur - Coupelle sèche/humide

Connaissant l'épaisseur des échantillons ainsi que les pressions de vapeur d'eau appliquées, on peut déterminer la perméabilité à la vapeur en se basant sur la loi de Fick.

Tableau III. 2 : Résultats de l'essai de mesure de la perméabilité à la vapeur

	Coupelle sèche	Coupelle humide
Perméabilité à la vapeur (kg/ (m. s. Pa))	8×10^{-12}	4.19×10^{-11}

On peut remarquer d'après les résultats présentés dans le **Tableau III. 2**, qu'il y a une différence entre la perméabilité à la vapeur de la terre obtenue à l'aide de la coupelle humide (wet cup) et celle obtenue à l'aide de la coupelle sèche (dry cup). Ceci peut être expliqué par le fait que dans le cas de la coupelle sèche, le transfert se fait uniquement sous forme vapeur à cause de la faible valeur de la teneur en eau. En revanche, dans le cas de la coupelle humide, l'humidité relative aux interfaces de l'échantillon sont respectivement 93% et 50%. Ceci provoque une augmentation de la teneur en eau dans le matériau et l'humidité se diffuse par des mécanismes de condensation-évaporation aux interfaces liquide-vapeur [Chamoin, 2013 ; Collet et al., 2013 ; Vololonirina et al., 2014 ; Latif et al., 2015 ; Bennai, 2017]. Par exemple Bennai, (2017) a mesuré la perméabilité à la vapeur du béton de chanvre par les deux méthodes et il a trouvé un écart de 78% entre les coupelles sèche et humide comme le montre la **Figure III. 21**.

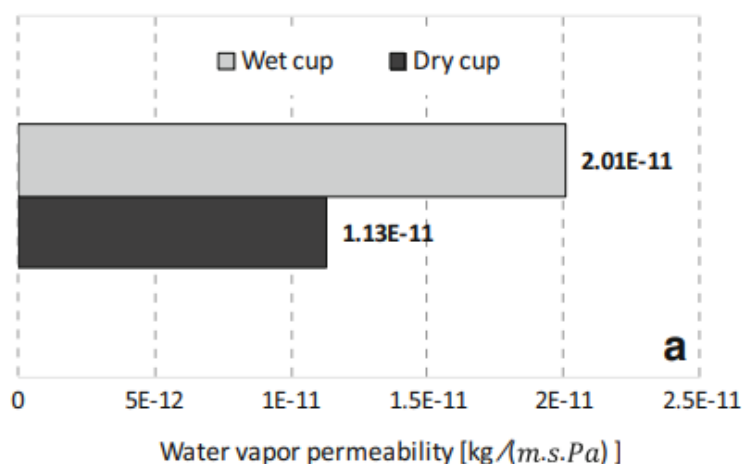


Figure III. 21 : Résultats de mesure de la perméabilité à la vapeur du béton de chanvre par les coupelles sèche et humide [Bennai, 2017]

Dans le même contexte, d'autres études ont montré que l'humidité relative a un effet sur la perméabilité à la vapeur. Latif et al. (2015) ont effectué une comparaison entre les facteurs de résistance à la vapeur du béton de chanvre, du plâtre et de la laine de bois obtenus par les deux méthodes de coupelles sèche et humide. Dans tous les cas, ils ont remarqué que les valeurs de la coupelle humide sont toujours supérieures à celles de la coupelle sèche. Ils ont constaté donc que la présence de valeurs d'humidités relatives élevées entraîne des transferts d'eau liquide avec les transferts de vapeur. Par ailleurs, Chamoin (2013) a étudié l'effet de l'humidité sur la perméabilité à la vapeur en appliquant différents gradients de vapeur d'eau à travers le béton de chanvre projeté (SI2C) et en blocs (Easy-Chanvre) comme l'indique le **Tableau III. 3**. Il constate que la perméabilité augmente avec l'humidité, qu'il explique par la présence de

transport de l'eau liquide à travers l'échantillon, qui devient visible à des valeurs d'humidité plus élevées.

Tableau III. 3 : Valeurs expérimentales de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre pour différents gradients d'humidité [Chamoin, 2013]

	HR_i	0	0	23	23	43	58	81	81
	HRe	50	23	33	43	58	81	90	94
SI2C	$\delta_v \times 10^{11}$ (kg/(m. s. Pa))	2.92	3.24	13.90	3.86	4.82	5.32	17.48	21.30
	R^2	0.998	0.994	0.993	1.000	0.999	0.995	0.995	0.996
	$\delta_v \times 10^{11}$ (kg/(m. s. Pa))	2.93	4.42	11.23	5.83	4.83	5.64	13.36	14.47
Easy-Chanvre	R^2	0.998	0.991	0.993	1.000	0.999	0.997	0.994	0.996

➤ Effet de la teneur en eau

Afin d'évaluer l'effet de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur du limon GO, huit échantillons de 100 mm de diamètre et 12 mm d'épaisseur ont été préparés et placés dans les coupelles de Gravitest comme le montre la **Figure III. 22**. La méthode des coupelles humides est choisie pour cet essai. La teneur en eau varie entre 0% (état sec) et 20% (état saturé). Deux échantillons ont été envisagés pour chaque teneur en eau afin d'assurer une répétabilité des mesures. Le **Tableau III. 4** résume les propriétés physiques des échantillons.



Figure III. 22 : Echantillons en différentes teneurs en eau pour l'essai de mesure de la perméabilité à la vapeur à l'aide de « Gravitest »

Tableau III. 4 : Propriétés physiques des échantillons de Limon GO en différentes teneurs en eau

	N° échantillon	γ_h (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Sr (%)
Etat « sec »	1	17.70	17.63	0.36	2.03
	2	17.58	17.53	0.28	1.55
Etat non saturé	3	18	16.97	9	44
	4	18	16.57	9	42
Etat initial de compactage (Quasi-saturé)	5	19.67	17.23	14	73.86
	6	19.44	17.02	14	71.82
Etat saturé	7	20.27	16.92	20	98.35
	8	20.08	16.69	20	96.77

Les résultats de l'essai sont résumés dans les **Figures III. 23 (a) et (b) et III. 24**, qui présentent la variation de la perméabilité à la vapeur en fonction du temps et de la teneur en eau respectivement. La **Figure III. 23 (a)** montre bien les deux régimes transitoire et permanent par lesquels passe un échantillon soumis au transfert de vapeur d'eau. Le régime permanent est atteint après 27 heures environ (100000 secondes) sauf pour la teneur en eau la plus élevée (20%) où le régime permanent est atteint au bout de 40 heures environ (150000 secondes). On voit bien l'instabilité de la perméabilité à la vapeur du limon GO pendant le régime transitoire ce qui est dû au fait que l'échantillon est en train de s'équilibrer avec l'ambiance à laquelle il est soumis. Par contre, en régime permanent la perméabilité est stable. L'analyse des résultats présentés dans la **Figure III. 24** montre que la perméabilité à la vapeur d'eau augmente légèrement avec la teneur en eau ; l'écart relatif entre la perméabilité à la vapeur de l'échantillon à 0% de teneur en eau et celui à 9% est de l'ordre de 31% ce qui n'est pas négligeable ; par contre pour les échantillons de 9 à 14% ou bien de 14 à 20% de teneur en eau, l'écart ne dépasse pas 7%. L'augmentation de la perméabilité en fonction de la teneur en eau, peut être expliquée par le fait d'avoir un transfert d'eau liquide en même temps que le transfert de vapeur. Ce transfert se fait de l'échantillon vers l'enceinte climatique de « Gravitest » puisqu'elle est moins humide que la coupelle.

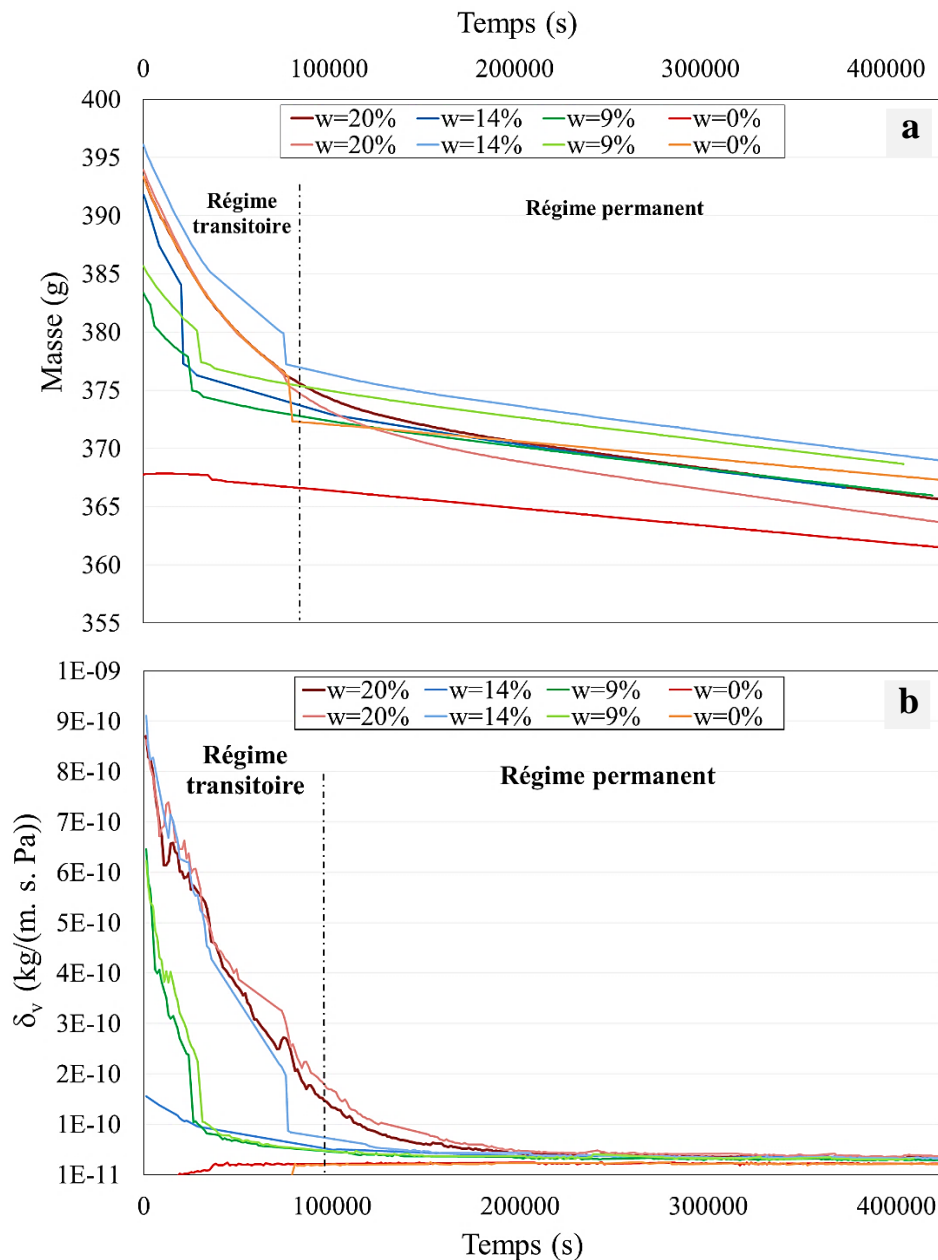


Figure III. 23 : (a) Evolution de la masse de vapeur d'eau en fonction du temps et (b) Evolution de la perméabilité à la vapeur en fonction du temps

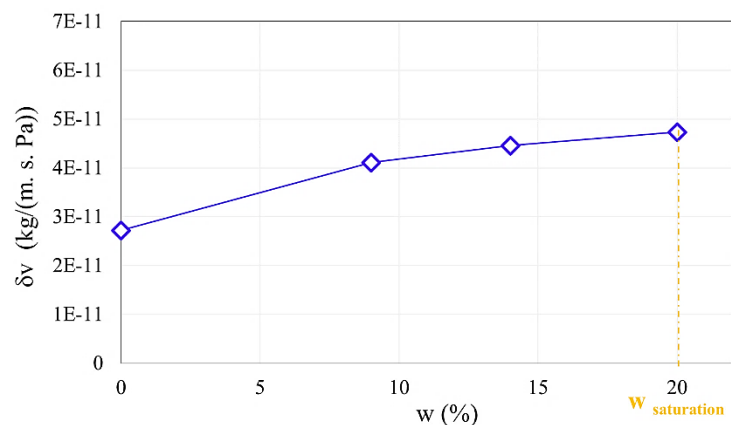


Figure III. 24 : Evolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau

Dans le même contexte, Ouméziane et al. (2012) et Collet et Pretot (2012) ont étudié l'effet de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur sur les bétons de chanvre. Les deux études ont montré que la perméabilité augmente en fonction de la teneur en eau. Medjelekh et al. (2017) ont étudié aussi l'effet de la teneur eau sur la perméabilité des briques en terre crue. La perméabilité de la terre crue augmente aussi avec la hausse de la teneur en eau. Abbas (2021) a mesuré la perméabilité à la vapeur d'eau de différentes formulations de béton de chanvre (C2-H*, C2-H+S, C2-S) et de moelles végétales de tournesol et de maïs (HB-S et HB-M). Pour les différents bétons, les résultats confirment l'effet de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur élevé par les études mentionnées précédemment. Abbas (2021) illustre que la présence de l'eau dans les échantillons de béton, engendre des transferts d'eau liquide avec les transferts de vapeur ce qui justifie la surestimation de la perméabilité à la vapeur et les transferts d'eau sont plus importants que ceux de la vapeur. De plus, les bétons avec des moelles végétales (HB-S et HB-M) montrent une augmentation de la perméabilité à la vapeur avec l'augmentation du taux de saturation. En effet, les moelles sont très hydrophiles et caractérisées par une capacité d'absorption d'eau importante même aux faibles taux de saturation. Abbas (2021), compare les résultats de son étude avec ceux de la littérature. La **Figure III. 25** récapitule les travaux qui ont étudié l'effet de la teneur en eau sur la capacité des matériaux de construction à diffuser la vapeur d'eau.

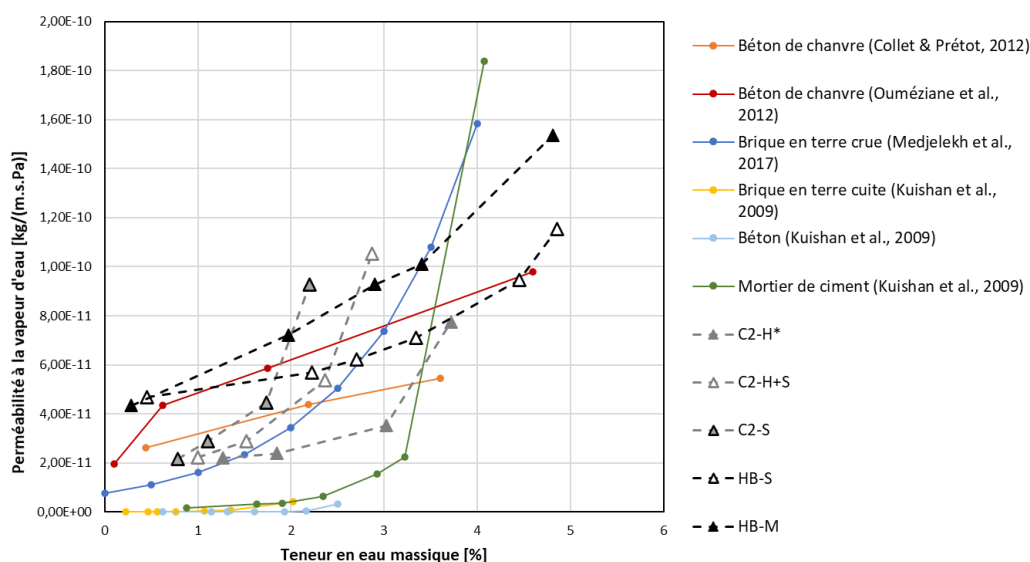


Figure III. 25 : Récapitulatif des résultats montrant l'effet de la teneur en eau sur la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux de construction

III. 3. 1. 2. 2 Méthode de la coupelle

La perméabilité à la vapeur d'eau du limon GO a été mesurée à l'aide de la méthode des dessiccateurs décrite dans le chapitre II. L'échantillon a 100 mm de diamètre et 12 mm d'épaisseur et est initialement sec. Ses propriétés physiques sont résumées dans le **Tableau III. 5**. La **Figure III. 26** présente un exemple de courbe de variation de la masse de vapeur d'eau transportée durant l'essai. Deux phases peuvent être observées dont la première dure environ deux jours, où le flux de vapeur est non linéaire en fonction du temps, correspondant au régime transitoire. Une deuxième phase linéaire suit le régime permanent dont la pente correspond à la densité de flux j_v . Selon la loi de Fick, la perméabilité à la vapeur d'eau du limon GO est égale à $\delta_v = 9.38 \times 10^{-12}$ kg/ (m. s. Pa).

Tableau III. 5 : Propriétés physiques du limon GO pour les essais de transfert de vapeur d'eau

γ_h (kN/m ³)	w (%)	Porosité n (%)
23.59	10.52	11

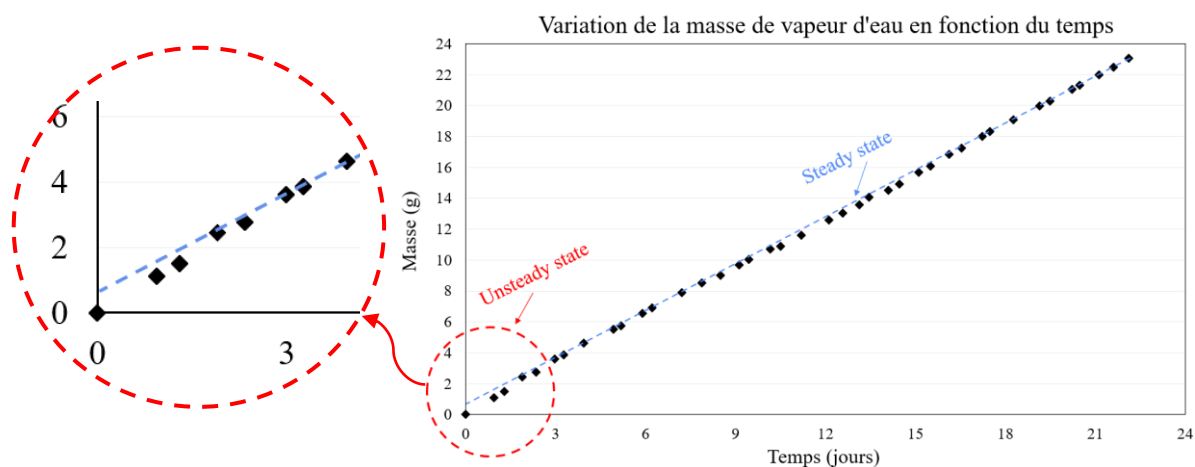


Figure III. 26 : Courbe de variation de la masse de vapeur échangée durant l'essai en fonction du temps

Une comparaison de la perméabilité à la vapeur du limon avec celle d'autres matériaux à base de terre compactée (voir **Tableau III. 6**), montre que l'ordre de 10^{-11} - 10^{-12} kg/ (m. s. Pa) est l'ordre qui caractérise la terre crue.

Tableau III. 6 : Perméabilité à la vapeur d'eau de la terre crue compactée

Matériau : Terre compactée	Perméabilité à la vapeur δ_v (kg/ (m. s. Pa))
[Dondi et al., 2003]	3.35×10^{-12} - 1.27×10^{-11} 1860 kg/m ³ - 1780 kg/m ³
[McGregor et al., 2014]	3.46×10^{-12} - 3.66×10^{-11} 1815 kg/m ³ - 1758 kg/m ³
[Cagnon et al., 2014]	1.0×10^{-11} - 2.7×10^{-11}
Limon GO (Gravitest)	2.72×10^{-11} - 4.74×10^{-11} Sr = 0% - Sr = 100%

Si on compare les résultats de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau obtenus par les deux méthodes « Gravitest » et « Dessiccateurs » à ceux d'autres matériaux de construction traditionnel, on trouve que le limon GO seul est de 10 à 100 fois plus perméable à la vapeur d'eau (voir **Tableau III. 7**).

Tableau III. 7 : Perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux de construction traditionnel [Hibouche, 2013]

Matériau	Perméabilité à la vapeur δ_v (kg/ (m. s. Pa))
Béton plein	6.33×10^{-13}
Plâtre	2.74×10^{-12}
Terre cuite	3.16×10^{-13} - 1.9×10^{-12}
Limon GO (Gravitest)	2.72×10^{-11} - 4.74×10^{-11} pour respectivement Sr = 0% - Sr = 100%

III. 3. 2 Propriétés thermiques

III. 3. 2. 1 Conductivité thermique

La conductivité thermique de la terre crue a été évaluée en fonction de la teneur en eau. Les mesures ont été effectuées sur un échantillon cylindrique de dimensions 100 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur (**Figure III. 27**) à l'aide du dispositif « Tempos Meter ». L'échantillon est initialement saturé en eau. En effet, le limon est compacté selon les propriétés présentées dans le **Tableau III. 4** (état quasi-saturé) puis, la teneur en eau de saturation est calculée en fonction de son poids volumique γ_d (kN/m³). La quantité d'eau nécessaire pour la saturation sera ajoutée à l'échantillon à l'aide d'une seringue. Par la suite, l'échantillon est enveloppé dans un film cellophane et sous cloche afin que sa teneur en eau s'homogénéise. Il est ensuite

séché à l'air libre de manière contrôlée afin d'atteindre une teneur en eau cible. La perte d'eau en fonction du temps est ainsi mesurée à l'aide d'une balance de 10^{-3} g de précision. Ceci permet le séchage des échantillons et la mesure de la perte d'eau en fonction du temps. A l'aide du dispositif « Tempos Meter » qui est basé sur la méthode de dissipation de chaleur, les propriétés thermiques (conductivité, diffusivité et capacité thermique) sont ainsi mesurées en fonction de la teneur en eau.

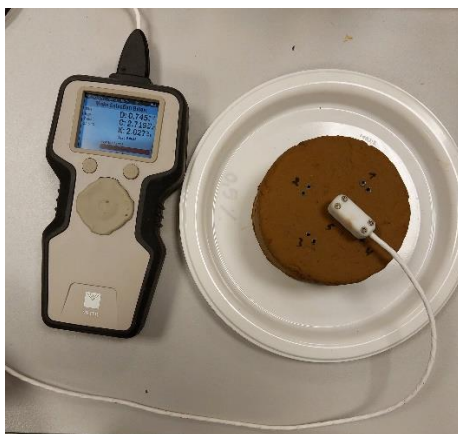


Figure III. 27 : Mesure de la conductivité thermique de la terre crue à l'aide du dispositif « Tempos Meter »

Les **Figures III. 28 (a)** et **(b)** illustrent les résultats obtenus. On remarque que l'augmentation de la teneur en eau entraîne une augmentation de la conductivité thermique. Plus le matériau est humide, plus il est conducteur de la chaleur. En effet, la conductivité passe de 0.76 W/ (m. K) à l'état sec à $1,94 \text{ W/ (m. K)}$ à l'état saturé ($w=20\%$). Ceci est dû au fait que l'air sec possède une conductivité thermique ($\lambda = 0.025 \text{ W/ (m. K)}$) plus faible que celle de l'eau ($\lambda = 0.62 \text{ W/ (m. K)}$) (voir **Figure III. 29**) [Kallel, 2016]. Ce phénomène a été observé par d'autres auteurs comme Phung (2018) qui a évalué l'impact de la teneur en eau sur la conductivité thermique de la terre crue, et il a trouvé qu'elle augmente de 1.4 à 2.5 W/ (m. K) pour une teneur en eau qui varie entre 0.5 et 16% . Laurent (1986) a également montré que la conductivité de l'argile sèche de 1600 kg/m^3 de densité diminue de 1.22 à 0.63 W/ (m. K) pour une diminution de la teneur en eau de 17 à 6% . Maintenant, si on compare les résultats obtenus pour le limon GO avec ceux des matériaux de construction traditionnels tels que le béton de ciment [Zhang, 2015], on trouve que le limon est plus isolant à l'état sec ($S_r = 0\%$) avec un ratio de l'ordre de 1.58 , plus isolant également pour un degré de saturation $S_r = 20\%$ avec un ratio de l'ordre de 1.18 , mais par contre pour des degrés de saturation plus importants, les deux matériaux ont un comportement similaire puisque c'est l'eau qui domine et conduit la chaleur (voir **Figure III. 30**).

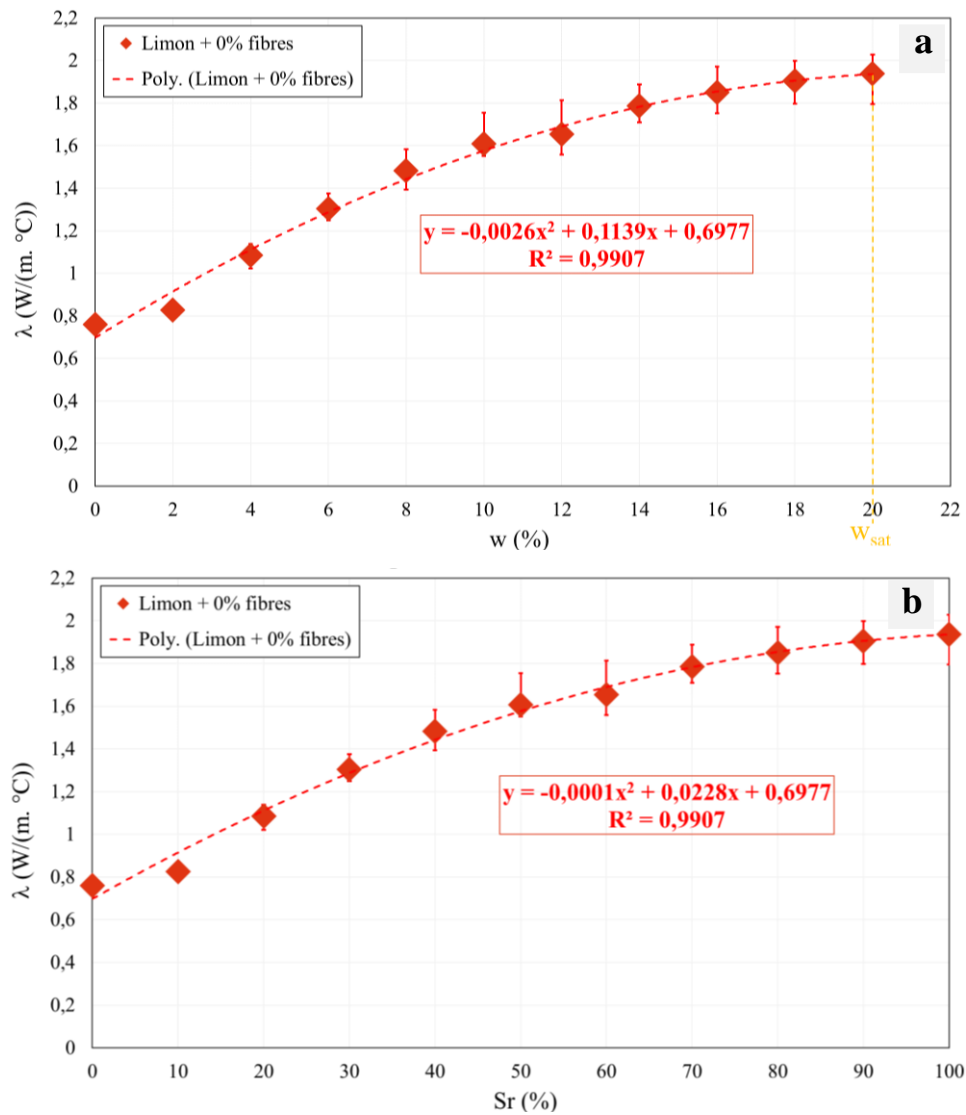


Figure III. 28 : Conductivité thermique de la terre crue en fonction : (a) de la teneur en eau et (b) du degré de saturation

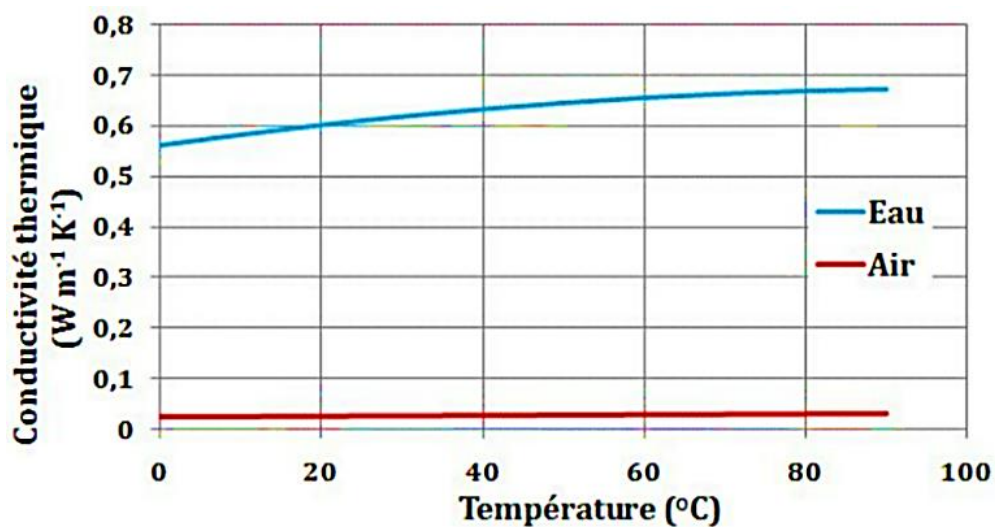


Figure III. 29 : Conductivité thermique de l'eau et de l'air sec en fonction de la température

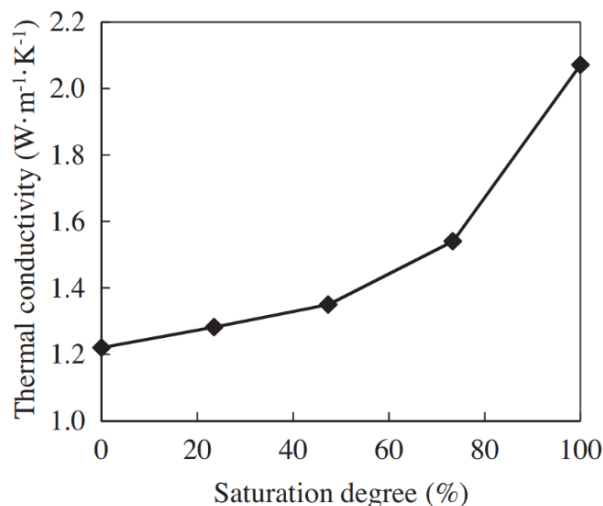
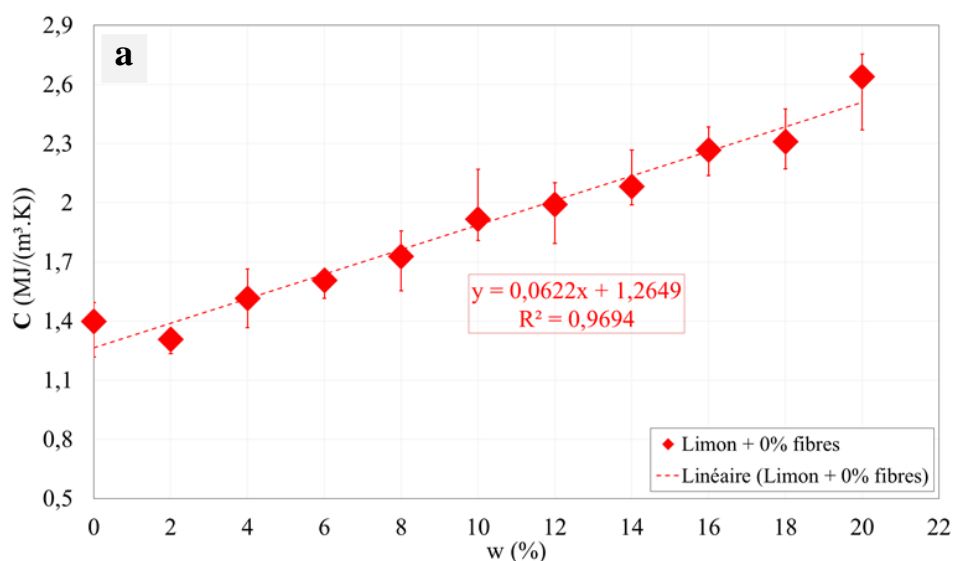


Figure III. 30 : Evolution de la conductivité thermique du béton de ciment en fonction du degré de saturation [Zhang et al., 2018]

III. 3. 2. 2 Capacité thermique

Le même comportement a été observé pour la capacité thermique. En effet, elle augmente linéairement avec une pente de 0.0622 (MJ/(m³.K.%)) avec l'augmentation de la teneur en eau de 1.4 à 2.64 MJ/(m³.K)) de l'état sec à l'état saturé (**Figures III. 31 (a) et (b)**). On conclut que la capacité thermique du limon GO est plus importante lorsqu'il est humide. La présence de l'eau est un facteur positif pour la capacité thermique. Allam et al. (2018), De Bruijn et Johansson (2013) et Jerman et Černý (2012) ont montré que la capacité thermique des différents matériaux de construction humides est plus importante que celle des matériaux secs. Jerman et Černý (2012) par exemple, ont montré que la capacité thermique des matériaux d'isolation thermique humides est de 4 à 5 fois supérieure à celle des matériaux secs.



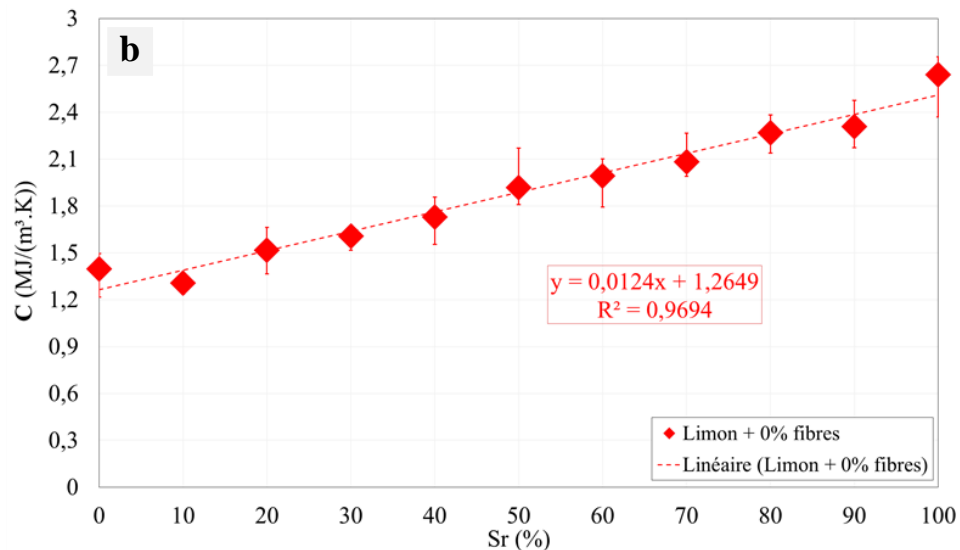


Figure III. 31 : (a) et (b) Evolutions de la capacité thermique en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation respectivement

Abbas (2021) a récapitulé les résultats de la littérature ainsi que ses propres résultats à propos l'évolution de la capacité thermique volumique en fonction de la teneur en eau massique (voir Figure III. 32). Les deux paramètres sont en corrélation linéaire que ce soit pour le béton de chanvre [Bennai, 2017], briques de terre [Laurent, 1986], le bois [Glass et Zelinka, 2010], etc...

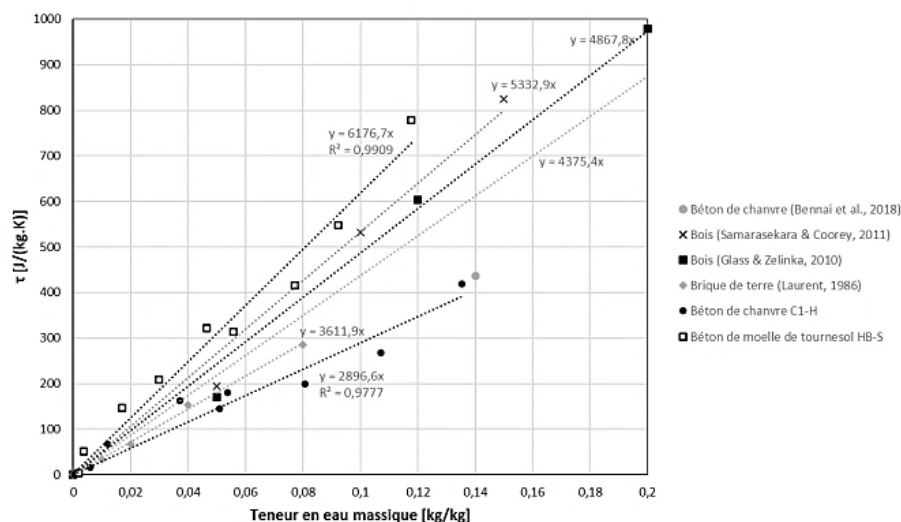


Figure III. 32 : Evolution de la capacité thermique massique en fonction de la teneur en eau massique des différents matériaux de la littérature [Abbas, 2021]

III. 3. 2. 3 Diffusivité thermique

Une analyse générale des résultats qui concerne la diffusivité thermique (Figure III. 33 (a) et (b)), montre une évolution complexe en fonction de la teneur en eau. Il s'agit d'une évolution en forme concave où la diffusivité augmente de 0.56 à 0.86 mm²/s pour une teneur en eau de 0

à 14% respectivement, puis elle baisse de 0.86 mm²/s à 0.74 mm²/s pour une teneur en eau de 14 à 20%. En effet, ceci peut être dû à la faible diffusivité thermique de l'eau qui est de l'ordre de 0.144 mm²/s. Plus on se rapproche de la saturation, plus l'eau remplace l'air dont la diffusivité thermique est de l'ordre de 20 mm²/s [Ngohe-Ekam, 1992].

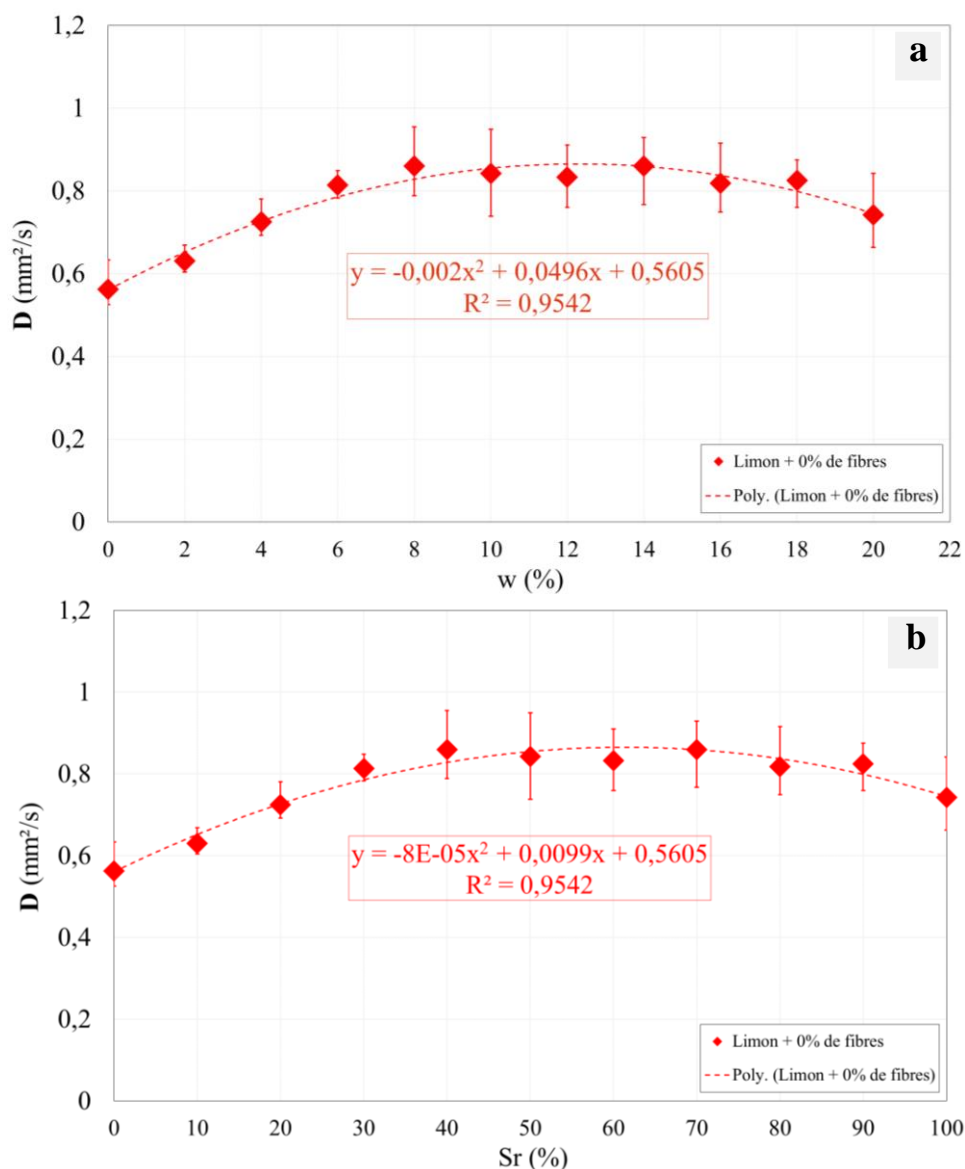


Figure III. 33 : (a) et (b) Courbes d'évolutions de la capacité thermique en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation respectivement

III. 4 Matériau composite limon - fibres de lin

III. 4. 1 Propriétés hygrométriques

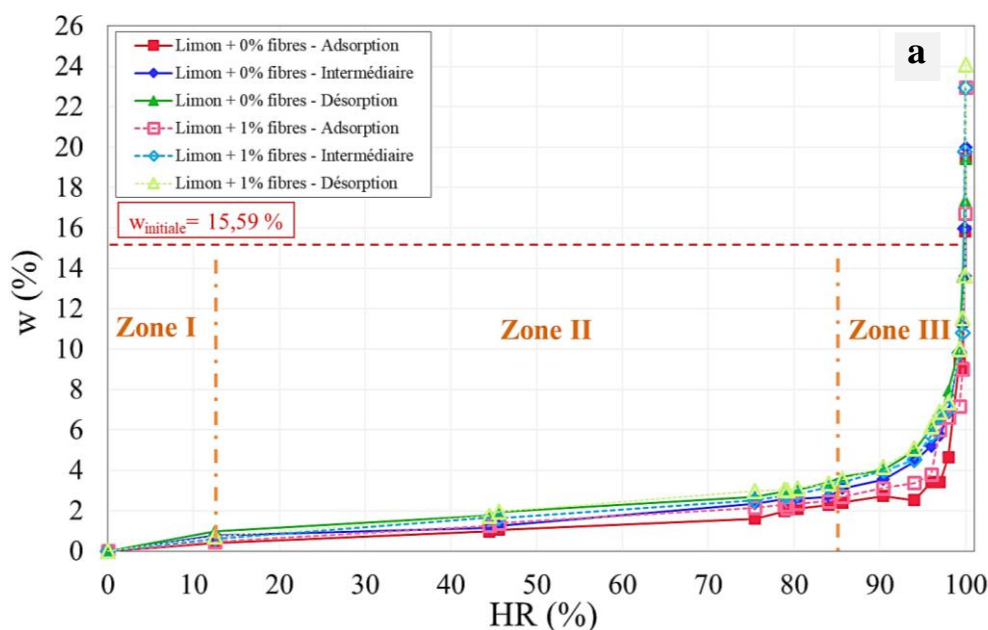
III. 4. 1. 1 Isothermes d'adsorption/désorption

En utilisant la technique décrite dans le chapitre II, les isothermes d'adsorption/désorption sont obtenues pour la terre crue mélangée avec 1% des fibres de lin. Les résultats de l'essai sont présentés dans les **Figures III. 34 (a) et (b)**, elles représentent également des isothermes de Type II. Le phénomène d'hystérésis est toujours présent mais d'une façon plus faible par rapport au limon GO seul. En comparant les isothermes d'adsorption/désorption de la terre fibrée à celles de la terre seule, on trouve que la capacité de cette dernière à stocker l'eau est légèrement plus faible que la terre mélangée avec 1% de fibres de lin. Ceci est dû à la présence des fibres végétales qui ont une capacité d'adsorption d'eau importante [Phung, 2018]. Cet effet s'accroît pour les fortes humidités relatives. D'une manière analogue au limon, on distingue trois zones distinctes pour les courbes d'adsorption/désorption du limon fibré :

Zone I : correspond à une plage d'humidité relative de 0 à 12.5 % où on voit une augmentation en cas d'adsorption (ou bien diminution en cas de désorption) de la teneur en eau de 0 à 1% pratiquement pour les trois courbes.

Zone II : correspond à une plage d'humidité de 12.5 à 85% où l'augmentation en cas d'adsorption (ou bien diminution en cas de désorption) de la teneur en eau en fonction de l'humidité est linéaire et faible.

Zone III : correspond à une plage d'humidité relative de 85 à 100%. Cette zone correspond à une augmentation plus importante en cas d'adsorption (ou bien diminution en cas de désorption) de la teneur en eau de 3 à 20%.



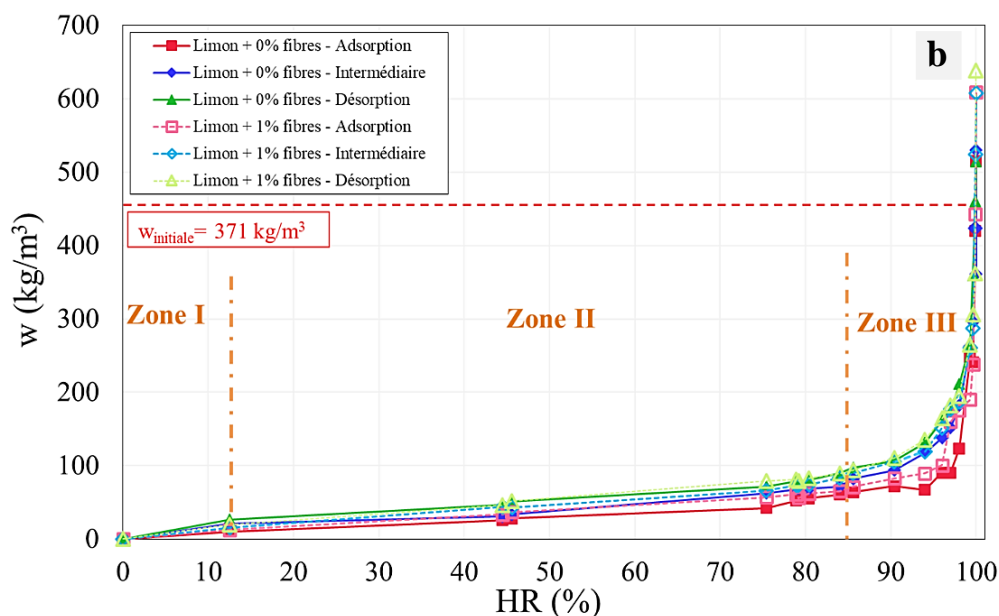
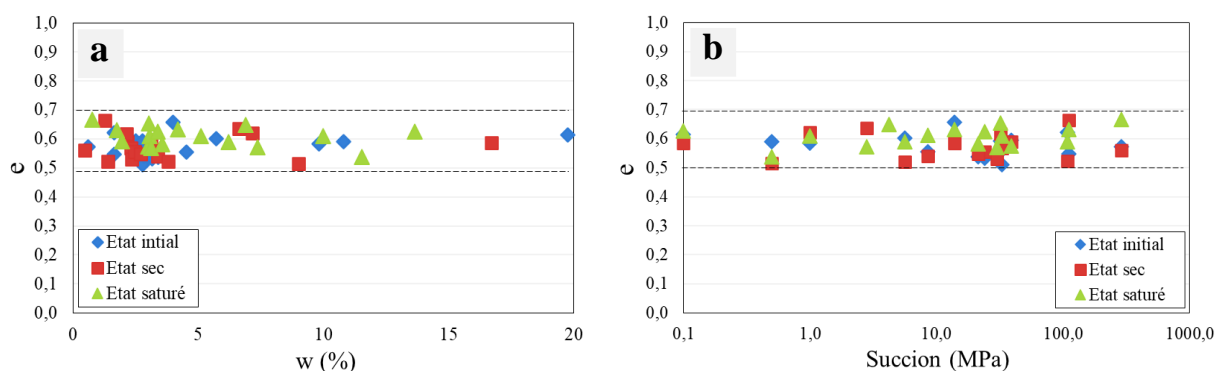


Figure III. 34 : Isothermes d'adsorption/désorption du limon-fibres de lin : (a) en teneur en eau (%) et (b) en teneur en eau massique

La représentation de ces résultats dans les cinq plans présentés dans la section III. 3. 1. 1 montre que dans les plans $[w, e]$ et $[suction, e]$ (**Figure III. 35 (a) et (b)**), l'indice des vides est peu sensible à la variation de l'état hydrique du matériau et ce, malgré la dispersion des points expérimentaux observée et liée à la présence des fibres de manière aléatoire. Concernant les autres plans $[w, Sr]$, $[suction, Sr]$ et $[suction, w]$ (**Figure III. 35 (c), (d) et (e)**), on observe, aux incertitudes de mesures près, le même comportement que pour le limon non-fibré de la **Figure III. 16**. Autrement dit, l'ajout d'1% de fibres de lin n'influence pas de manière significative les chemins de drainage et d'humidification.



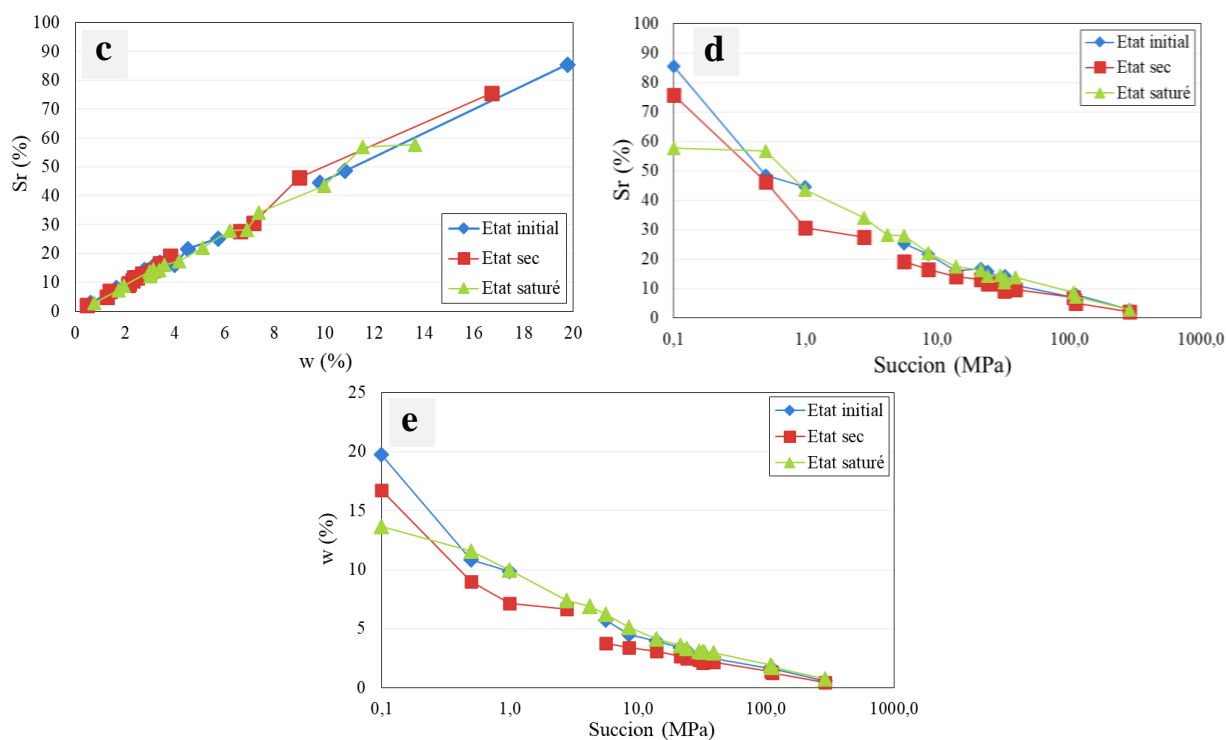


Figure III. 35 : Les courbes des différents paramètres physiques du limon mélangé avec 1% de fibres de lin

III. 4. 1. 2 Perméabilité à la vapeur d'eau

III. 4. 1. 2. 1 Méthode de la coupelle

La perméabilité à la vapeur du matériau composite terre-fibres de lin a été déterminée pour différentes teneurs en fibres en utilisant la méthode des dessiccateurs décrite dans le chapitre II. Les fibres sont ajoutées à la terre en disposition aléatoire et transversale (**Tableau II. 5**). Les propriétés des échantillons sont présentées dans le **Tableau III. 8**. Sur la **Figure III. 36**, les résultats montrent une augmentation de la perméabilité à la vapeur avec l'augmentation du taux de fibres, indépendamment de leur disposition. Cette augmentation est brusque avec l'ajout de 1% de fibres à la terre, par rapport à celle de la terre seule non fibrée. La perméabilité à la vapeur passe de 9.93×10^{-12} à 1.10×10^{-11} kg/ (m. s. Pa), et à 1.30×10^{-11} kg/ (m. s. Pa) dans le cas de fibres transversales et aléatoires, respectivement. Ensuite, cette augmentation s'atténue lorsque le pourcentage de fibres augmente avec une pente de 2.65×10^{-13} kg/ (m. s. Pa), quelle que soit la disposition des fibres. La forte pente observée lorsque le taux de fibres passe de 0 à 1%, est due à la diminution de la densité du matériau fibré avec l'augmentation du taux de fibres. Par exemple, dans le cas des fibres transversales, la densité varie de 23.59 kN/m^3 pour la terre crue seule à 18.62 kN/m^3 pour 1% de fibres ajoutées (**Tableau III. 8**). Cependant, les dispositions aléatoire et transversale des fibres n'ont pas facilité la diffusion de la vapeur d'eau.

Pour cette raison, l'augmentation de la perméabilité à la vapeur a été atténuée avec l'augmentation du taux de fibres ajouté. En plus de la forte perméabilité des fibres, comparée à celle de la terre crue seule, la diminution de la densité du composite, explique l'augmentation significative de la perméabilité, du moins pour cette faible teneur en fibres. A partir de 1% de fibres ajoutées, la perméabilité à la vapeur continue à diminuer légèrement avec l'augmentation du pourcentage de fibres, ce qui est compatible avec la faible augmentation de la densité des échantillons. De plus, pour un pourcentage donné de fibres, la perméabilité du limon GO renforcé avec une disposition aléatoire est plus élevée que celle avec la disposition transversale. Ceci est cohérent avec la tendance des courbes de la **Figure III. 3**, où la perméabilité à la vapeur d'eau obtenue avec la distribution des fibres seules, était plus importante dans le cas aléatoire que dans le cas transversal.

Tableau III. 8 : Propriétés physiques des échantillons de limon GO - fibres de lin

	Taux de fibres (%)	γ_h (kN/m ³)	w (%)	Porosité n (%)
Limon avec des fibres aléatoires	1	22.77	15.59	14
	2	21.97	16.08	17
	3	21.16	16.94	20
	4	19.68	17.78	26
	5	18.45	18.35	30
Limon avec des fibres transversales	1	18.62	13.09	30
	2	18.68	13.73	29

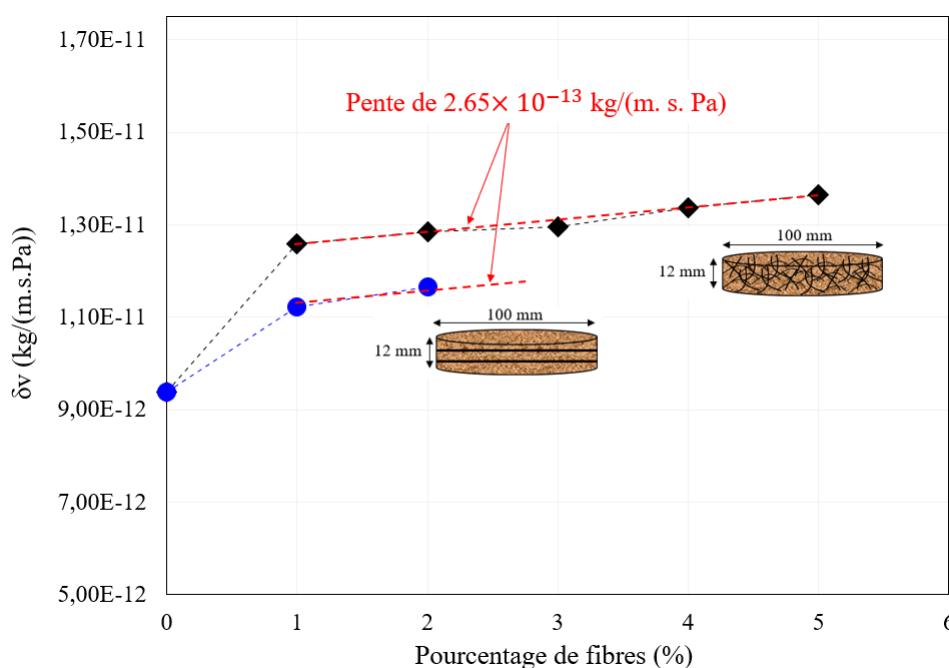


Figure III. 36 : Evolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de pourcentage des fibres de lin en arrangement aléatoire et transversal

III. 4. 1. 2. 2 Dispositif « Gravitest »

Effet du taux de fibres

A l'aide du dispositif « Gravitest », la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau composite limon-fibres de lin a été déterminée en fonction de différents arrangements et taux de fibres. Les mêmes échantillons utilisés pour la méthode des dessiccateurs ont été conservés pour ces essais, mais ils étaient plus humides. Les échantillons ont un effet séché avec le temps. La **Figure III. 37** résume les résultats obtenus de l'évolution de la perméabilité à la vapeur du matériau composite limon-fibres de lin en arrangement transversal et aléatoire pour différentes teneurs en fibres. Il s'agit des valeurs moyennes de perméabilité parce que pour chaque échantillon, l'essai est répété deux fois. On remarque que quel que soit le type d'arrangement, la perméabilité à la vapeur de la terre crue s'améliore avec l'ajout des fibres de lin. Plus le taux de fibres augmente, plus la capacité du matériau composite terre-fibres à diffuser la vapeur d'eau augmente. Ceci confirme les résultats obtenus dans la **Figure III. 36** à l'aide de la méthode des dessiccateurs. Selon la **Figure II. 37**, l'évolution de la perméabilité est linéaire entre 0 et 4% pour l'arrangement aléatoire et entre 0 et 1% pour celui transversal avec une pente de l'ordre de 2.1×10^{-12} kg/ (m. s. Pa), puis on observe une augmentation plus importante de 3.34×10^{-11} à 3.9×10^{-11} kg/ (m. s. Pa) le limon-fibres aléatoires et de 2.86×10^{-11} à 3.14×10^{-11} kg/ (m. s. Pa).

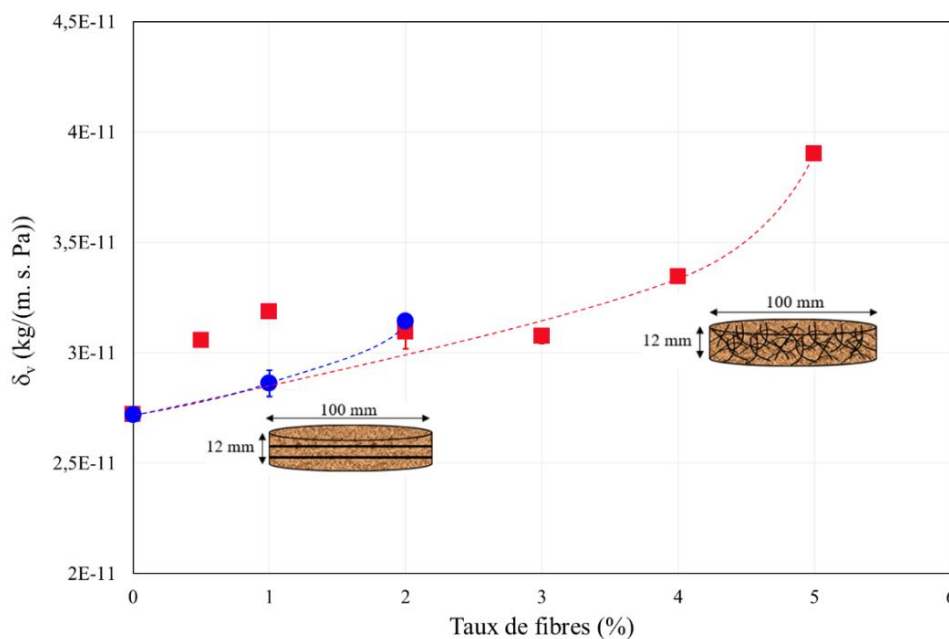


Figure III. 37 : Evolution de la perméabilité à la vapeur du matériau composite limon-fibres de lin en arrangement transversal et aléatoire

En comparant la perméabilité à la vapeur d'eau du limon fibré à celle d'autres matériaux à base de terre crue fibrée, on remarque que l'ordre de grandeur qui caractérise la terre crue fibrée ou non varie toujours entre 10^{-11} et 10^{-12} kg/ (m. s. Pa) (**Tableau III.9**).

Tableau III. 9 : Perméabilité à la vapeur des matériaux fibrés à base de terre crue de la littérature

Matériaux	Perméabilité à la vapeur δv (kg/ (m. s. Pa))
Pisé [Allinson et al., 2012]	5.75×10^{-11} - 1.27×10^{-11}
Béton de terre fibré « Cématerre » [Hibouche, 2013]	7.64×10^{-12}
Terre + Paille [Casnedi et al., 2020]	1.98×10^{-11}
Béton de terre fibré « Cématerre » [Hamrouni, 2023, Annexe A2]	1.06×10^{-11}

III. 4. 2 Propriétés thermiques

III. 4. 2. 1 Conductivité thermique

Les propriétés thermiques du matériau composite terre crue-fibres de lin ont été mesurées à l'aide du dispositif « Tempos Meter » (**Figure III. 38**). L'objectif de ce paragraphe est de déterminer l'impact de la teneur en eau sur les propriétés thermiques de la terre mélangée avec des fibres de lin aléatoires de l'état sec et à l'état saturé. Plusieurs études signalent que la conductivité, la capacité et la diffusivité thermiques des matériaux augmentent avec l'augmentation de la teneur eau. Hall et Allinson (2009), Collet et Pretot (2014) ; Gourlay et al. (2017), Troppová et al. (2015) et Yu et al. (2011) ont trouvé une corrélation linéaire entre la conductivité thermique et la teneur en eau pour le béton de chanvre, le pisé, le bois... D'autres auteurs ont trouvé une relation exponentielle [Taoukil et al., 2013 ; Boutin, 1996] (**Figure III. 39**). [Brouard, Belayachi, Hoxha, et al., 2017] et [Brouard, Belayachi, Ranganathan, et al., 2017] se sont concentrés sur l'étude de la conductivité thermique de différentes formulations de matériaux composites argile-tournesol et argile-paille de colza. Comme le montre la **Figure III. 40**, ils ont trouvé que la conductivité thermique augmente avec la teneur en eau.



Figure III. 38 : Mesure de la conductivité thermique de la terre crue-fibres de lin à l'aide du dispositif « Tempos Meter »

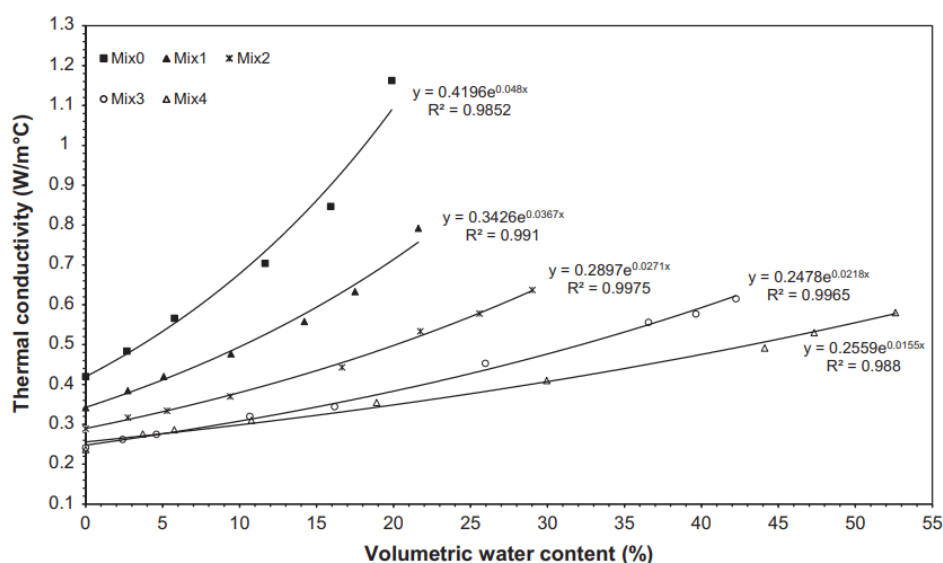


Figure III. 39 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau volumétrique [Taoukil et al., 2013]

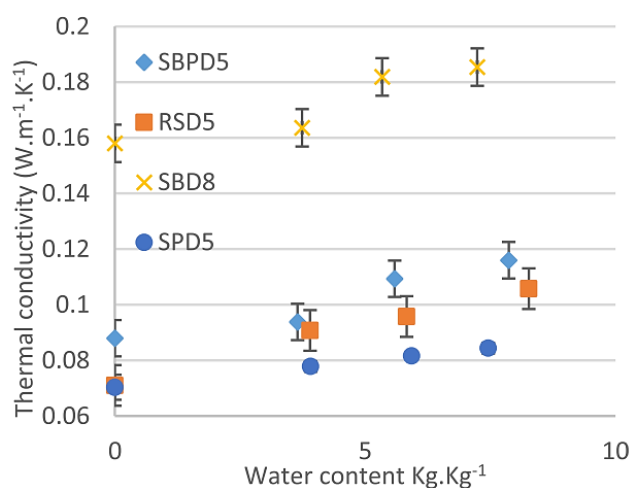


Figure III. 40 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau volumétrique [Brouard, Belayachi, Hoxha, et al., 2017]

Dans cette partie, les mesures des propriétés thermiques ont été réalisées pour la terre mélangée avec deux pourcentages de fibres de lin, 1% et 3% d'une manière aléatoire. Les propriétés

physiques des échantillons sont les mêmes que celles présentées dans le **Tableau III. 8**. Les résultats sont illustrés dans les **Figures III. 41 (a) et (b)** qui sont conformes avec les résultats obtenus par les autres auteurs. On remarque que la conductivité et la capacité thermiques augmentent en fonction de la hausse de la teneur en eau. Ceci est dû au fait que plus le matériau est humide, plus les pores et les fibres sont remplis d'eau.

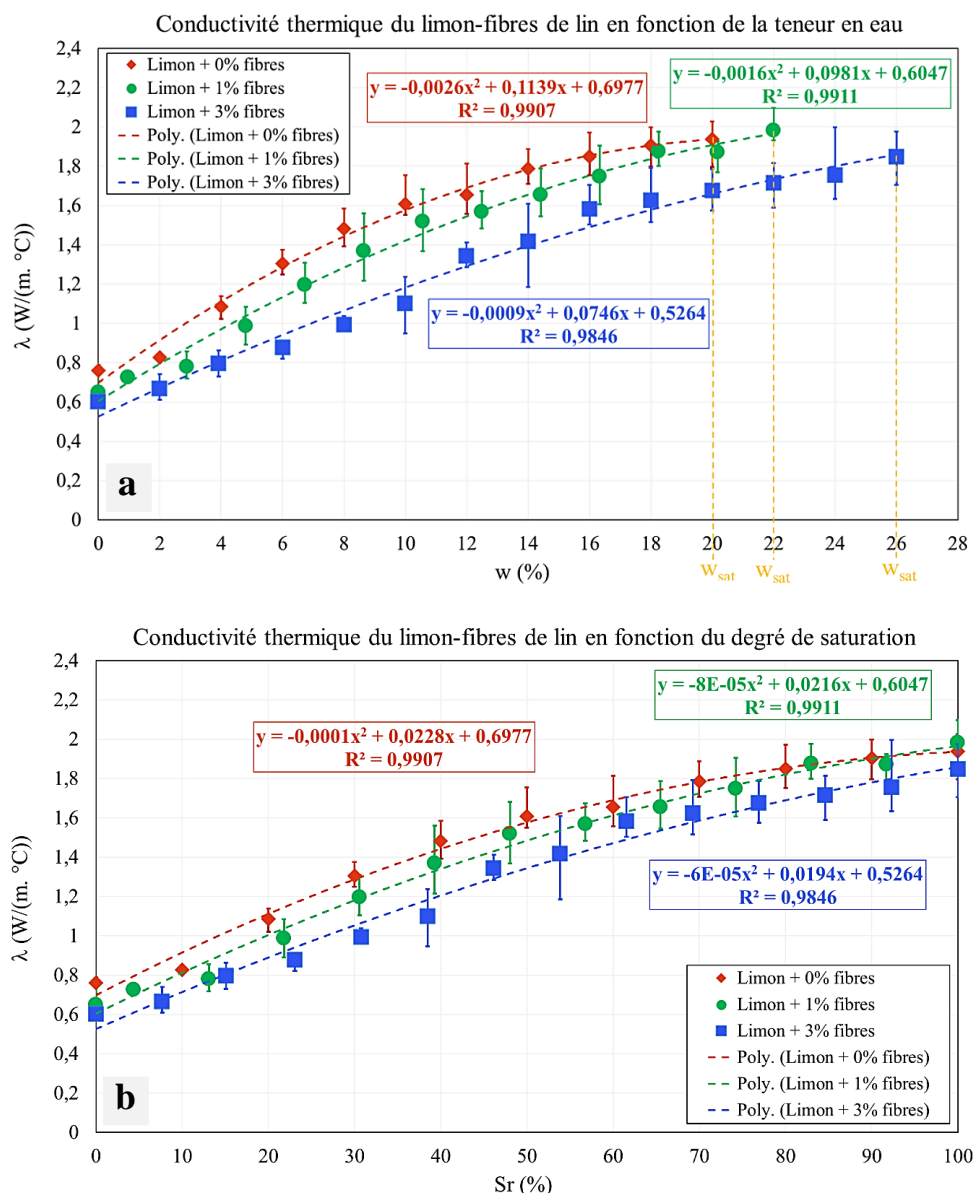


Figure III. 41 : Evolution de la conductivité thermique du limon-fibres de lin en fonction : (a) de la teneur en eau et (b) du degré de saturation

D'une part, on sait très bien que la conductivité thermique de l'air sec est plus faible que celle de l'eau. D'autre part, il a été montré dans cette étude que la conductivité thermique des fibres de lin croît avec la teneur en eau. De plus, on a constaté que la conductivité thermique du matériau composite terre-fibres diminue en augmentant le taux de fibres. Ceci est expliqué par

la faible conductivité thermique des fibres de lin. Ce résultat confirme les résultats obtenus par les travaux de Boukhattem et al. (2017) qui montrent que la présence de fibres végétales dans les matériaux composites entraîne une diminution de la conductivité thermique quel que soit la teneur en eau du matériau, mais cette diminution est plus importante lorsque le mélange est sec. Abbas (2021) est arrivé à la même conclusion. En effet, ses résultats confirment que le béton de maïs HB-S qui a la forte teneur en agrégat végétal hydrophile, a de faibles conductivités thermiques en fonction de l'augmentation du degré de saturation. Il a également comparé ses résultats à ceux de la littérature (Figure III. 42) .

On peut également remarquer, d'après la Figure III. 41 (b), que l'évolution de la conductivité thermique en fonction du degré de saturation (S_r) du limon seul et du limon mélangé avec 1 et 3 % de fibres de lin aléatoires s'adoucit à partir de $S_r= 70\%$. Ce pourcentage décrit la quasi-saturation des différents matériaux. Dans ce domaine, tout l'air est entouré par l'eau et il est non continu. Donc, ce sont les fibres de lin et l'eau qui conduisent la chaleur, ce qui peut expliquer l'évolution lente de la conduction lorsqu'on s'approche de la saturation. Par contre, pour des degrés de saturation inférieurs à 70%, c'est l'air qui est continu et l'eau discontinue ce qui peut justifier la variation remarquable de la conductivité thermique.

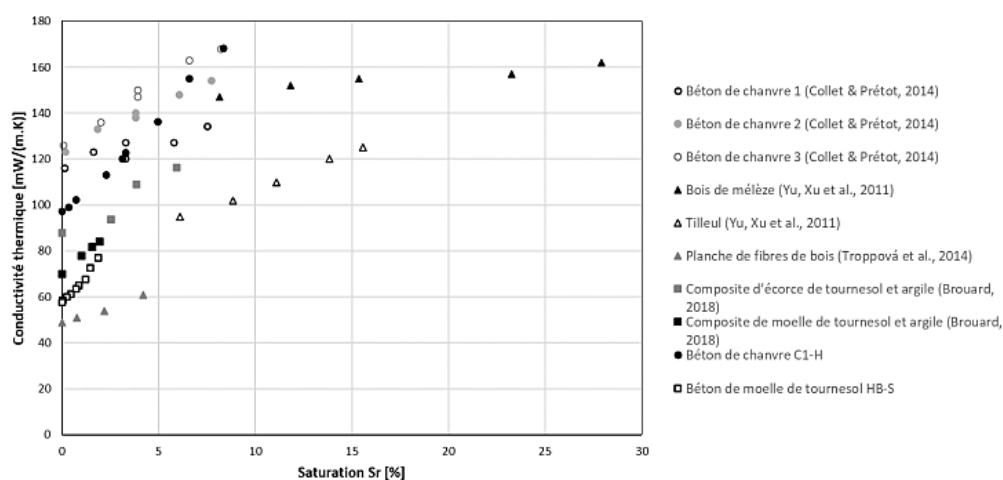


Figure III. 42 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de degré de saturation [Abbas, 2021]

Par ailleurs, si on compare les résultats de cette étude à ceux d'autres études réalisées sur la terre fibrée, on trouve que Phung (2018), a montré également que la conductivité thermique pour deux formulations de bauge augmente avec la teneur eau. De plus, il a montré que l'ajout des fibres de paille entraîne une diminution de la conductivité thermique (Figure III. 43).

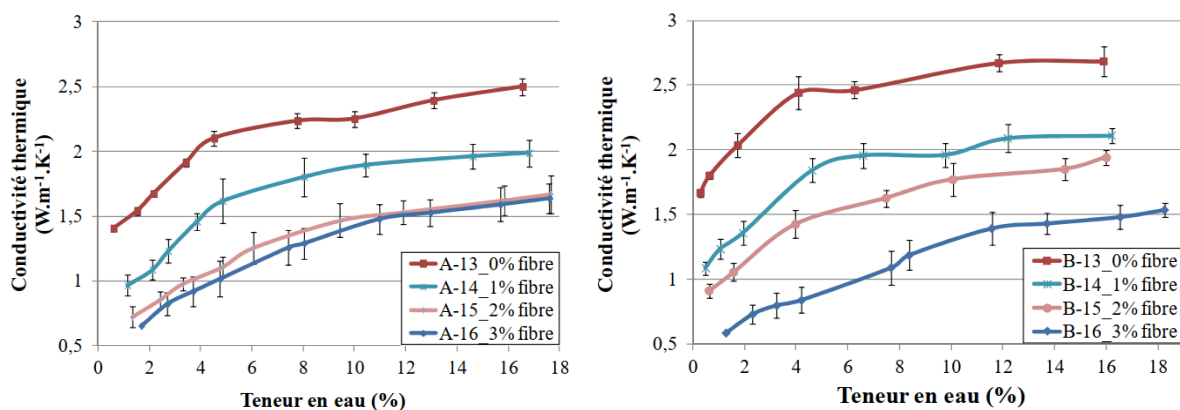
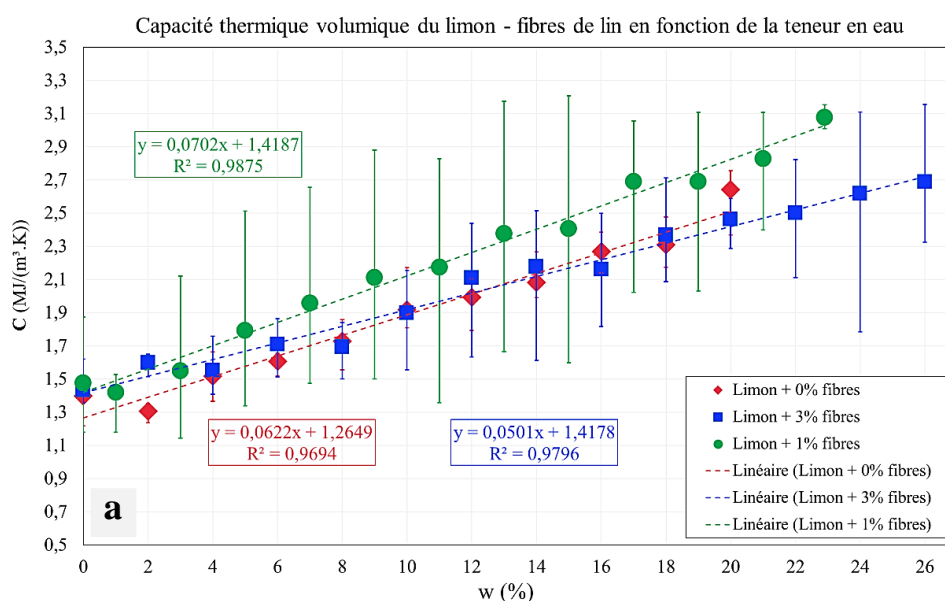


Figure III. 43 : Effet de la teneur en eau et du taux de fibres sur la conductivité thermique [Phung, 2018]

III. 4. 2. 2 Capacité thermique

En ce qui concerne la capacité thermique, le même comportement a été observé (Figures III. 44 (a) et (b)). La capacité thermique augmente linéairement avec l'augmentation de la teneur en eau. Contrairement à la conductivité thermique où la présence de l'eau affecte négativement l'isolation thermique du matériau, les matériaux les plus humides ont une capacité thermique plus importante comparés aux matériaux secs. Par exemple, la capacité thermique de la terre mélangée avec 3% de fibres de lin passe de 1.5 à 3.1 MJ/ (m³.K) de l'état sec à l'état saturé respectivement. De plus, on remarque que l'ajout des fibres améliore la capacité des matériaux à base de terre à stocker la chaleur.



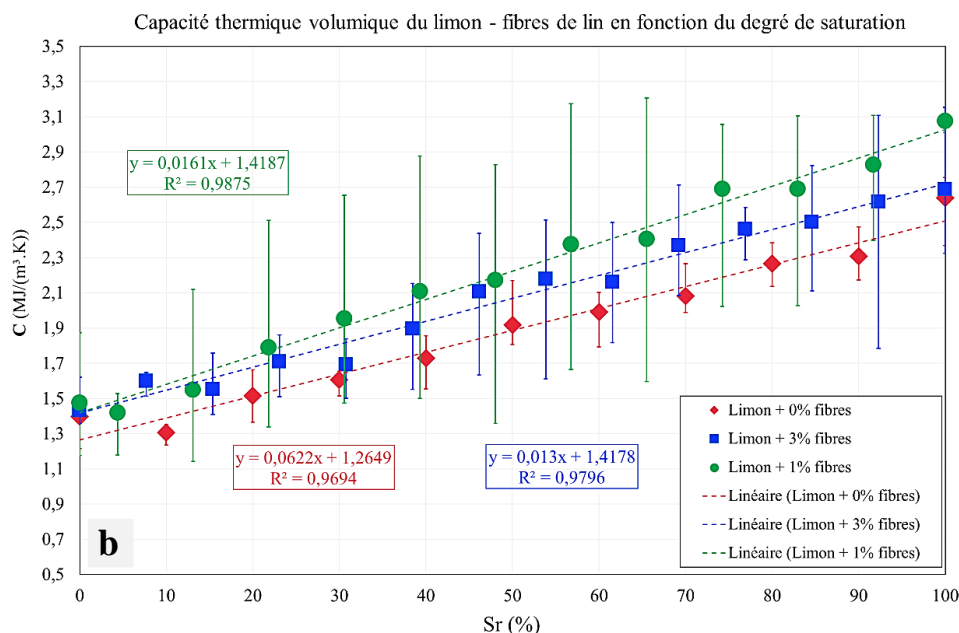


Figure III. 44 : Evolution de la capacité thermique du limon-fibres de lin en fonction de la teneur en eau (a) et du degré de saturation (b)

III. 4. 2. 3 Diffusivité thermique

Concernant la diffusivité thermique (**Figures III. 45 (a) et (b)**), on observe une variation concave en fonction de la teneur en eau. Ceci est expliqué par l'effet de l'eau qui affecte la diffusion de la chaleur à cause de sa faible diffusivité thermique. De plus, elle diminue avec l'augmentation du taux de fibres insérées, et ceci est dû à la faible conductivité thermique des fibres de lin en comparaison avec la conductivité de la terre seule. Donc, la présence des fibres rend la diffusion de chaleur à l'intérieur du matériau composite difficile.

D'une part, une comparaison des résultats de cette étude avec ceux de la littérature en ce qui concerne la conductivité thermique de la terre-fibres de lin montre que les ordres de grandeurs sont similaires (**Tableau III. 10**).

Tableau III. 10 : Conductivité thermique des matériaux à base de terre de la littérature

Matériau	Conductivité thermique (W/(m. K))
Limon + 0% fibres	0.76 – 1.94 w = 0% (sec) - w = 20 % (saturé)
Limon + 3% fibres	0.602 – 1.85 w = 0% (sec) - w = 26 % (saturé)
Terre compactée [Ben Mansour et al., 2016]	0.699 - 1.212 w = 1.02 % - w = 3.25 %
Terre compactée	0.62 – 0.95

[Medjelekh et al., 2017]	w = 0 % (sec) - w = 5.2 %
Béton de terre fibré	0.558 – 1.32
[Hibouche, 2013]	w = 0% (sec) - w = 28 % (saturé)
Pisé	1.01 - 0.83
[Allinson et al., 2012]	

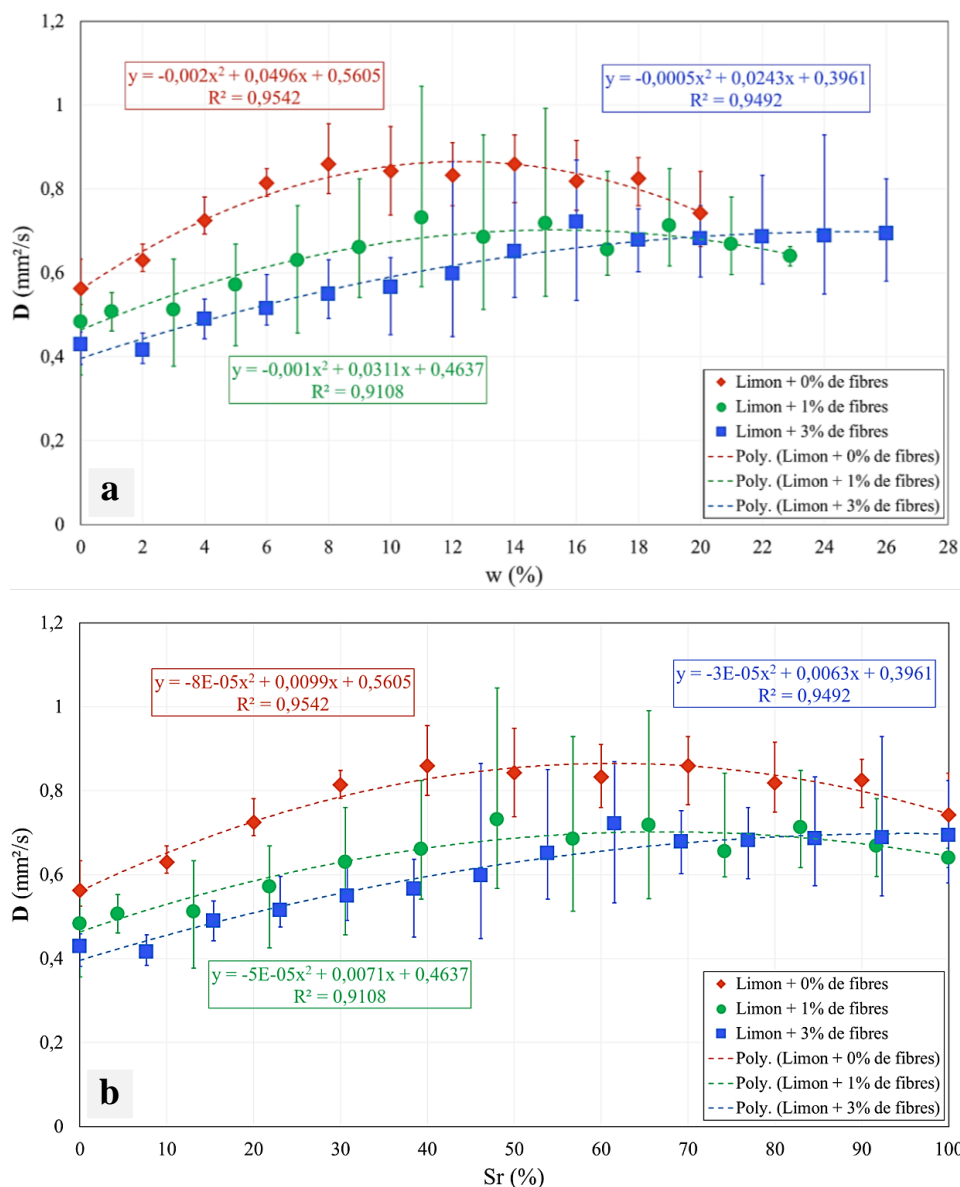


Figure III. 45 : Evolution de la diffusivité thermique du limon-fibres de lin en fonction de la teneur en eau (a) et de degré de saturation (b) respectivement

D'autre part, si on compare les résultats du limon seul avec ceux des matériaux de construction traditionnel, on trouve que le limon seul est plus isolant à l'état sec et à l'état saturé que le béton de ciment avec un ratio de 1.84 et 1.13 respectivement. Ceci est dû à la présence de grandes quantités d'eau à l'intérieur du matériau et donc c'est l'eau qui domine le transfert de la chaleur grâce à sa conductivité thermique importante (de l'ordre de $0.62 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), [Kallel,

2016]). Ceci étant, si on compare la conductivité thermique du limon fibré à celle du béton de ciment, on observe que le limon mélangé avec 3% de fibres de lin est à peu-près deux fois plus isolant que le béton de ciment avec un ratio de l'ordre de 2.3. A l'état saturé, les deux matériaux ont un comportement similaire puisque c'est l'eau qui domine et conduit la chaleur (**Tableau III. 11**).

Tableau III. 11 : Conductivité thermique de béton de ciment en fonction de la teneur en eau

Matériau	Conductivité thermique λ (W/m. °C)
Limon + 0% fibres	0.76 - 1.94
	pour resectivement Sr = 0% (sec) - Sr = 100 % (saturé)
Limon + 3% fibres	0.602 - 1.85
	pour resectivement Sr = 0% (sec) - Sr = 100 % (saturé)
Béton plein [Zhang et al., 2018]	1.4 - 2.2
	pour resectivement Sr = 0% (sec) - Sr = 100 % (saturé)

III. 5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux résultats de l'identification expérimentale hygro-thermique des éco-matériaux, terre crue, fibres de lin et matériau composite terre-fibres de lin. L'influence de plusieurs paramètres tels que la température, la teneur en eau, la densité, le taux de fibres sur les propriétés hygro-thermiques de ces matériaux biosourcés a été analysé.

En ce qui concerne les fibres de lin seules, les résultats montrent d'une part que leur conductivité thermique augmente linéairement en fonction de la température (de 30°C jusqu'à 50°C) et la densité (de 100 kg/m³ jusqu'à 400 kg/m³) quel que soit le type d'arrangement (aléatoire ou transversal). Le même constat a été observé pour la capacité thermique. D'autre part, les résultats de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau des fibres de lin montrent qu'elle diminue avec l'augmentation de la densité. De plus, les résultats ont mis en évidence l'effet de l'orientation des fibres sur leur capacité à diffuser la vapeur d'eau. Plus les fibres sont orientées dans la direction du flux de vapeur, plus elles sont perméables à la vapeur d'eau et plus elles diffusent facilement la vapeur d'eau.

En ce qui concerne le matériau composite limon-fibres, l'ajout des fibres a montré une amélioration du comportement hygrothermique. Dans un premier temps, la détermination des

isothermes d'adsorption/désorption du limon seul et du limon mélangé avec 1% de fibres aléatoires a montré une amélioration de façon peu significative de la capacité de stockage d'eau. D'autres pourcentages de fibres doivent être testés pour bien montrer l'effet de l'ajout des fibres comme ceci a été démontré dans d'autres études de la littérature. Dans un deuxième temps, la perméabilité à la vapeur d'eau du limon-fibres a été déterminée par deux méthodes différentes (Méthode des dessiccateurs et dispositif « Gravitest »). Les résultats montrent que cette dernière augmente en fonction du taux de fibres ajouté quel que soit l'arrangement des fibres, aléatoire ou bien transversal. Cela est dû à la diminution de la densité du matériau qui engendre une porosité plus importante et donc une perméabilité à la vapeur d'eau plus importante. En plus, la perméabilité des fibres qui est de l'ordre de 10^{-10} kg/ (m. s. Pa) est plus importante que celle de limon GO comme le montre les résultats de cette étude. En outre, l'étude de l'effet du pourcentage de fibres sur la perméabilité à la vapeur, l'influence de la teneur en eau (de l'état sec à l'état saturé) et l'influence de la température (23°C et 40°C) ont été évaluées. Les résultats montrent que plus le matériau est humide, plus il est perméable à la vapeur. Ceci peut être expliqué par la présence des transferts d'eau liquide en parallèle avec les transferts de vapeur. De plus, l'augmentation de la température influence la capacité du matériau à diffuser la vapeur d'eau. Plus elle augmente, plus on observe une baisse de perméabilité quel que soit le matériau (limon seul ou limon mélangé avec des fibres de lin aléatoires). Finalement, en ce qui concerne la caractérisation thermique, l'effet de la teneur en eau ainsi que l'effet de la teneur en fibres ont été étudiés. Une augmentation des propriétés thermiques telles que la conductivité thermique et la capacité thermique en fonction de la teneur en eau a été bien observée. De plus, l'ajout de 1% et 3% de fibres de lin entraîne une diminution de la conductivité et de la diffusivité thermiques, ce qui rend le limon plus isolant. Aussi, la capacité thermique augmente est donc la capacité de la terre à stocker la chaleur augmente.

Les résultats de ce chapitre ont permis de comprendre le comportement hygrothermique des fibres de lin, de la terre seule et du matériau composite terre crue - fibres de lin. Nous avons constaté que l'ajout des fibres de lin est un facteur avantageux pour le confort hygrothermique dans les constructions. L'originalité qui réside dans ce chapitre est l'étude du comportement hygrothermique des fibres de lin. Des méthodes ont été développées pour mesurer leur perméabilité à la vapeur et pour déterminer leur isotherme d'adsorption et le dispositif temps a servi pour mesurer les propriétés thermiques.

Les paramètres thermiques et hygrométriques mesurés serviront à alimenter le modèle numérique des transferts couplés hygrothermiques qui sera présenté dans le chapitre V.

Chapitre IV

*Transferts couplés hygrothermiques :
Développement d'un dispositif prototype*

IV. 1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes focalisés sur la caractérisation physique et hygro-thermique des fibres de lin, du limon seul et du matériau composite limon - fibres de lin. Une campagne d'essais expérimentale thermique et hygrométrique a été réalisée afin de mesurer les propriétés hygrothermiques de ce composite. Les transferts thermiques et hygrométriques dans ces composites sont bien évidemment couplés. En effet, un bâtiment est le siège de différentes sollicitations dynamiques venant de l'extérieur (le rayonnement solaire, la pluie et la température) ou de l'intérieur (systèmes de chauffage et de ventilation, pièces humides, occupation humaine qui est aussi source de chaleur et d'humidité). Sous ces multiples sollicitations environnementales : variation de température et d'humidité relative, des échanges et des interactions à la fois complexes et simultanées (de flux de chaleur et de masse d'air et d'humidité) ont toujours lieu. Ainsi, ce chapitre traite du développement d'un dispositif expérimental prototype de couplage hygrothermique et des mesures préliminaires réalisées sur le limon GO. Une description détaillée de ce dispositif de couplage hygrothermique est aussi présentée. Ensuite, on présente des essais préliminaires de transfert thermique, hygrométrique et couplés hygrothermiques, réalisés sur différents matériaux afin de vérifier le bon fonctionnement du dispositif de couplage. La dernière partie est consacrée aux résultats des essais de transferts couplés à travers le limon GO.

IV. 2 Dispositif expérimental prototype de couplage hygrothermique

IV. 2. 1 Description du dispositif

Il s'agit d'un dispositif expérimental développé dans le cadre de cette thèse, au laboratoire LOMC. Il est composé de deux boîtes confectionnées à l'aide d'un matériau isolant (polystyrène extrudé), où la température et l'humidité relative sont contrôlées : une boîte dite chaude et une autre dite froide (**Figures IV. 1 (a) et (b)**). L'idée est de garder le même principe de la méthode de la boîte chaude [Ezbakhe et al., 2000 ; Hibouche, 2013 ; Saidi, 2018], mais en ajoutant l'aspect hygrométrique. Ce dispositif permet donc d'imposer deux gradients de température et d'humidité simultanément aux deux interfaces du matériau. Les échantillons étudiés peuvent être cylindriques de dimensions de 100 mm de diamètre et 10 à 70 mm

d'épaisseur ou bien parallélépipédiques de dimensions $270 \times 270 \times e$ mm³ (e varie entre 10 à 70 mm).

- La boîte chaude est de dimensions $410 \times 410 \times 430$ mm³. Elle est maintenue à une température chaude à l'aide d'une membrane chauffante fixée sur l'une de ses parois. La température chaude est régulée à l'aide d'un régulateur de température. Des thermocouples de type K sont insérés à l'intérieur de la boîte pour suivre l'évolution de la température chaude. Au début de l'expérience, une tension arbitraire est fixée, puis des ajustements adéquats lui sont apportés au fur et à mesure jusqu'à l'obtention de la température chaude souhaitée. Au fond de la boîte, on place un récipient contenant une solution saline saturée en sel. Cette solution permet d'imposer une humidité relative dans l'atmosphère en contact avec la surface inférieure de l'échantillon. Elle est contrôlée en temps réel à l'aide de capteurs hygrométriques. Selon la valeur de l'humidité souhaitée, on choisit le type de sel comme le montre le **Tableau II. 6**. La boîte chaude est placée au sein d'une autre boîte dite froide.
- La boîte froide est de dimensions $960 \times 960 \times 900$ mm³. Elle est maintenue à une basse température régulée à l'aide d'un bain thermostaté permettant de faire circuler un liquide froid dans un serpentín en cuivre collé sur les parois intérieures de la boîte. A l'aide des thermocouples de type K, la température est suivie durant l'essai. Pour l'humidité relative, des récipients contenant une seconde solution saline sont préalablement placés au fond, vu le grand volume de la boîte, permettant d'obtenir une deuxième humidité relative régnant dans l'atmosphère en contact avec la surface supérieure de l'échantillon. De même, l'humidité est contrôlée en temps réel à l'aide des capteurs hygrométriques de type AVIOSYS (**Figure IV. 2**) .

En outre, des capteurs hygrothermiques sont utilisés pour suivre l'évolution de la température et de l'humidité à l'intérieur de l'échantillon. Etant données les petites dimensions des échantillons de laboratoire et afin de ne pas perturber leurs comportements hygrothermiques, il est indispensable d'utiliser des capteurs de petites tailles peu intrusifs. Pour cela, des capteurs miniatures Sensirion de type SHT ont été utilisés [Belarbi et al., 2008 ; Qin et al., 2009]. Leurs caractéristiques sont présentées dans le **Tableau IV. 1**. L'acquisition des données se fait via une centrale d'acquisition de type Sensirion et permet d'avoir l'enregistrement instantané des profils d'humidité et de température (**Figure IV. 3**).

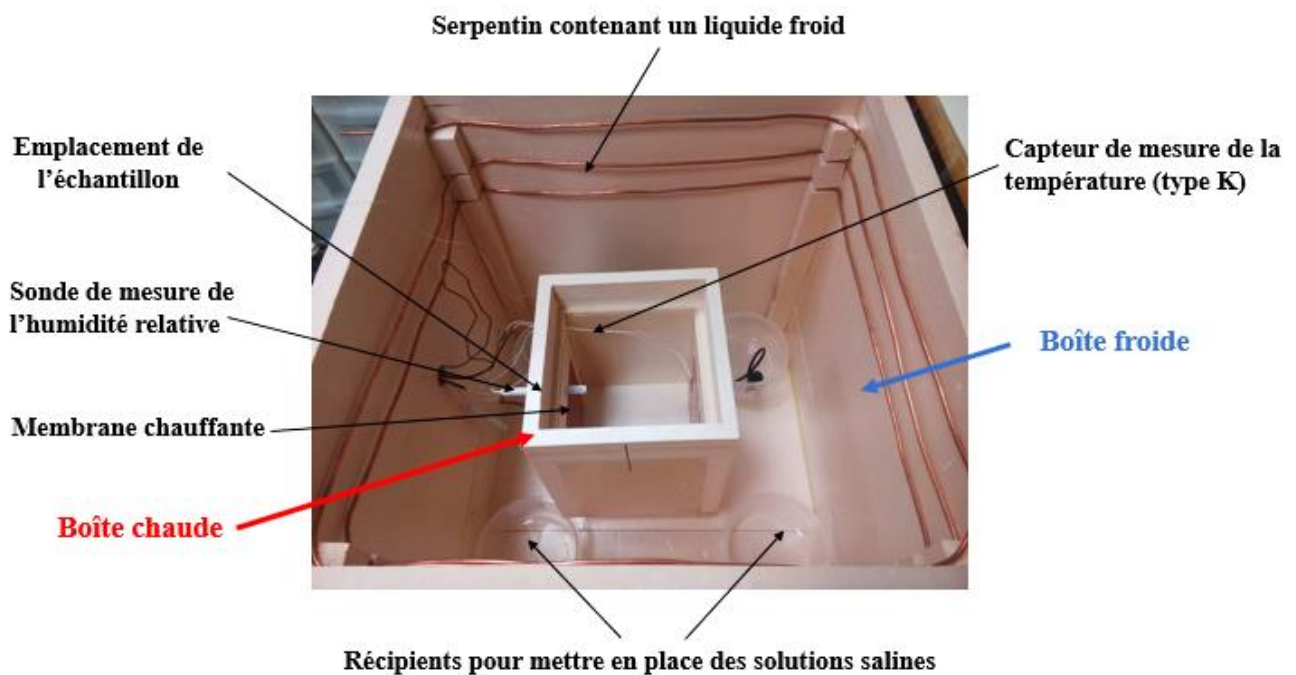
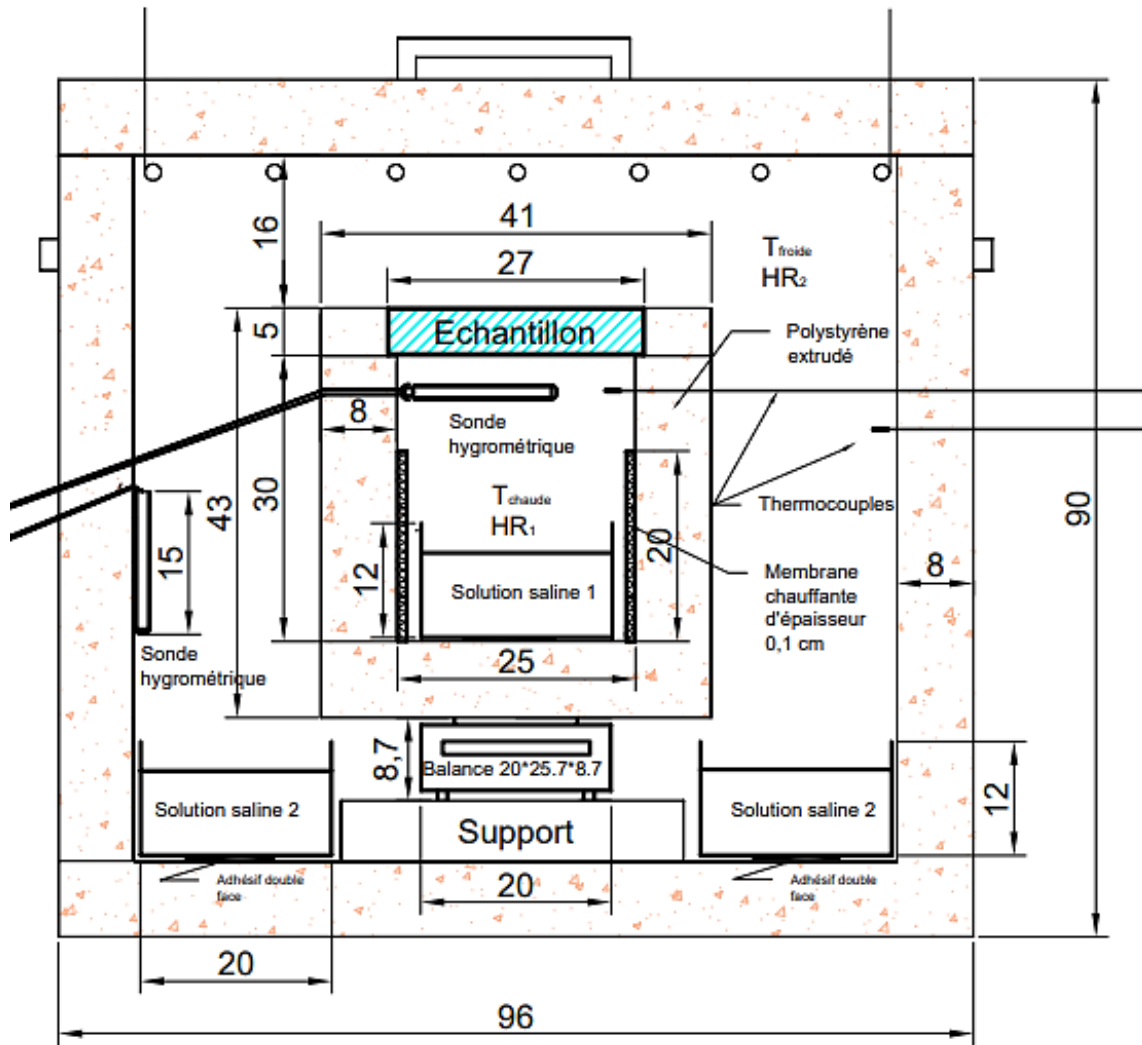


Figure IV. 1 : (a) et (b) sont respectivement un schéma descriptif et une photo réelle du dispositif de couplage hygrothermique



Figure IV. 2 : Sonde de mesure de l'humidité relative des type "AVIOSYS"

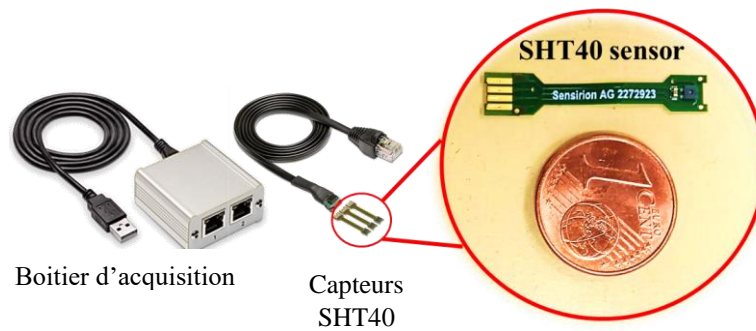


Figure IV. 3 : Capteur hygrothermique SHT40 et son boîtier d'acquisition de type « Sensirion »

Tableau IV. 1 : Caractéristiques techniques du capteur SHT40

Caractéristiques techniques de fonctionnement	
Précision d'humidité relative	1.8%
Précision de température	0.3°C
Résolution maximale	8 s
Plage de mesure d'humidité relative	0 to 100%
Plage de mesure de température	-40 to 125°
Dimensions	4×25×1 mm ³

Dans le cas des fortes humidités relatives, des protecteurs pour les capteurs SHT40, confectionné au laboratoire à l'aide d'un tube en rilsan, ont été utilisés pour protéger le composant électronique de la condensation d'eau liquide, ce qui peut altérer son fonctionnement.

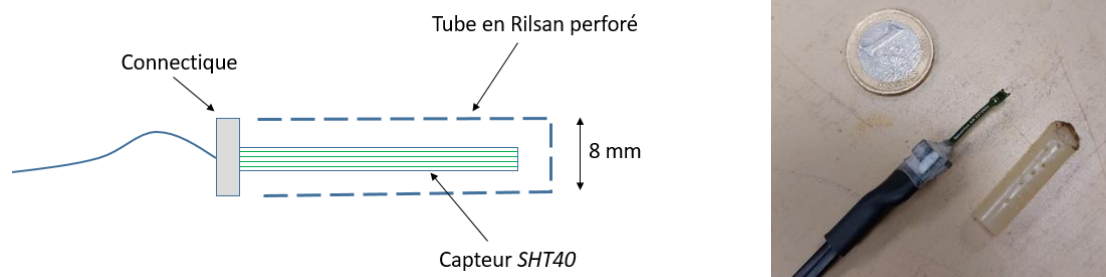


Figure IV. 4 : Capteur SHT40 et son protecteur contre la condensation d'eau liquide

IV. 2. 2 Principe de mesure

Le but de l'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité est résumé dans les points suivants :

- ✓ Imposer des conditions aux limites en température et en humidité relative différentes : mise en évidence de la sensibilité du matériau à ces conditions aux limites.
- ✓ Mesure des variations de température et d'humidité relative à l'intérieur et au niveau des surfaces supérieure et inférieure de l'échantillon à l'aide des capteurs SHT40 : l'insertion du capteur au milieu de l'échantillon nécessite une création d'un trou de mêmes dimensions que celles du capteur pour ne pas perturber les flux. Les capteurs SHT40 sont aussi placés à l'intérieur des boîtes chaude et froide afin de vérifier les conditions aux limites imposées. L'acquisition des données en temps réel se fait via une centrale d'acquisition connectée à un ordinateur.
- ✓ Mesure des variations de température et d'humidité relative en temps réel aux surfaces supérieure et inférieure de l'échantillon et à l'intérieur des boîtes chaude et froides à l'aide de thermocouples de types K et de sondes AVIOSYS respectivement (**Figure IV. 2**).
- ✓ Mesure de la masse de vapeur échangée à travers l'échantillon au cours de l'essai ce qui permet de déterminer la perméabilité à la vapeur : une balance de précision est placée au-dessous de la boîte chaude, connectée à un ordinateur permettant la mesure de la variation de masse de vapeur en continu (**Figure IV. 1 (b)**)
- ✓ Analyser le comportement de la terre crue vis-à-vis des transferts couplés hygrothermiques et son rôle dans le confort hygrothermique.

Pour atteindre ces objectifs, des gradients de température et d'humidité relative doivent être appliqués de part et d'autre de l'échantillon à l'aide de la résistance chauffante, du bain thermostaté et des solutions salines saturées en sel.

Dans la littérature, comme cela a été mentionné au premier chapitre, les dispositifs expérimentaux de couplage ont été conçus généralement pour deux types d'échelles : échantillons de laboratoire et parois en modèles réduits. Dans cette étude, le dispositif développé est adapté pour des échantillons de terre crue de laboratoire.

IV. 3 Essais préliminaires

Afin de vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble des composants du dispositif de couplage hygrothermique, des essais de transferts hygrométrique et thermique d'étalonnage et de calibration ont été réalisés.

IV. 3. 1 Transfert thermique

Le but de cette partie consiste à utiliser le dispositif de couplage pour imposer un gradient de température constant et unidirectionnel à travers un matériau étalon dont on connaît sa conductivité thermique λ (W/ (m. °C)). En se basant sur la loi de Fourier (décrite dans le chapitre II) et en connaissant le flux de chaleur traversant l'échantillon, on peut déterminer sa conductivité thermique. La conductivité du matériau obtenue à l'aide de cet essai va être comparée par la suite à celle de référence de l'échantillon donnée par sa fiche technique ou bien par celle obtenue par des essais expérimentaux dans les travaux de la littérature.

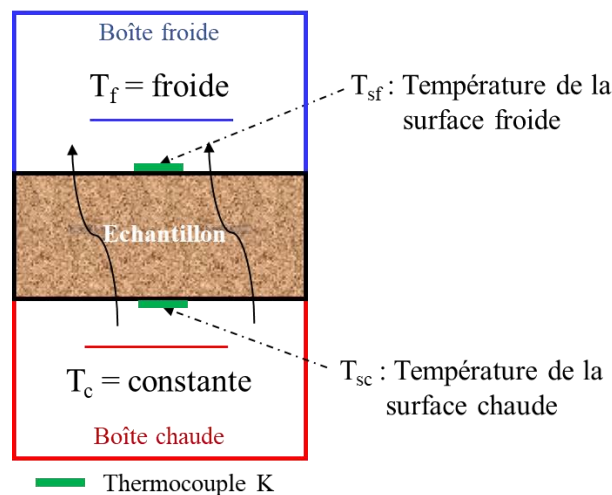


Figure IV. 5 : Principe de l'essai d'étalonnage thermique en régime permanent

IV. 3. 1. 1 Hypothèses

- On suppose que le transfert de chaleur se fait par conduction thermique essentiellement (on applique la loi de Fourier pour déterminer la conductivité thermique λ en régime permanent).
- Le transfert de chaleur est unidirectionnel (on isole la surface latérale de l'échantillon à l'aide d'un film isolant).

Rappelons la formule de la loi de Fourier qui permet de déterminer la conductivité thermique

$$\lambda \text{ [W/ (m. °C)]} : \quad \lambda = \frac{e}{S \Delta T} (P - P_0) = \frac{e}{S \Delta T} \left(\frac{V^2}{R} - C \Delta T' \right)$$

- e : épaisseur du matériau étudié [m]
- S : surface du matériau, exposée au flux thermique [m²]
- ΔT : écart de températures entre la surface chaude et la surface froide (mesurée) [K]
- P : puissance électrique mesurée aux bornes de la résistance chauffante = V^2/R [W]
- V et R : tension et résistance mesurées aux bornes de la résistance chauffante en V et Ω respectivement
- P_0 : puissance échangée entre l'extérieur et l'intérieur de la partie chaude (pertes) = $C \cdot \Delta T'$ en [W]

IV. 3. 1. 2 Evaluation du coefficient de déperdition thermique du dispositif de couplage

Afin d'estimer les pertes thermiques à travers les parois du dispositif hygrothermique, un essai de transfert thermique a été réalisé sur un matériau de référence de caractéristiques connues. Il s'agit du polystyrène extrudé de conductivité $\lambda_{\text{fiche technique}} = 0.029 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$. Le coefficient de déperdition thermique est défini comme suit : $C = \frac{1}{\Delta T'} \left(\frac{V^2}{R} - \frac{\lambda S \Delta T}{e} \right)$

Les valeurs des différents paramètres sont présentées dans le **Tableau IV. 6**.

Tableau IV. 2 : Tableau des températures en régime permanent

Paramètres	Valeurs
Température chaude T_c	36.39°C
Température froide T_f	23.09 °C
Température de la surface chaude T_{sc}	36.14 °C
Température de la surface froide T_{sf}	25 °C
Tension V	4 V

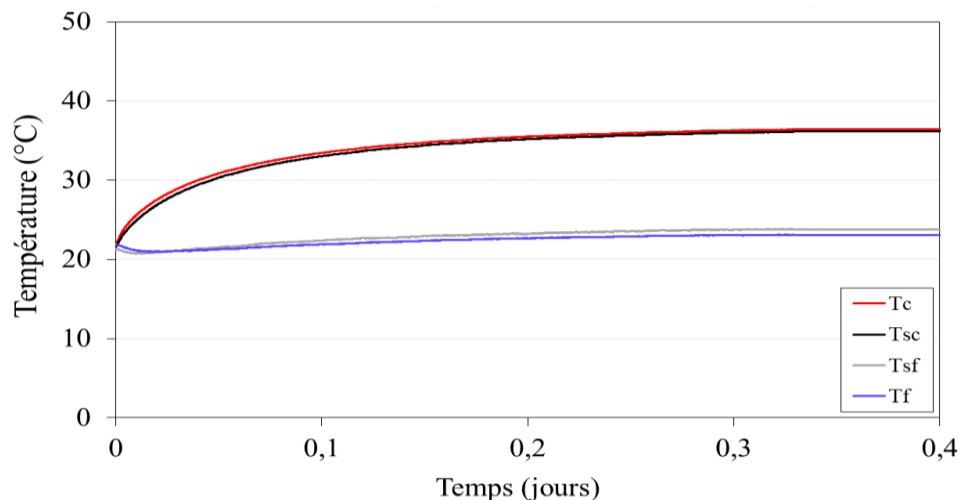


Figure IV. 6 : Profils de températures mesurés pour l'évaluation du coefficient de déperdition thermique

D'après les résultats illustrés dans la **Figure IV.6**, on trouve que le coefficient de déperdition est de l'ordre de $0.195 \text{ W/}^\circ\text{C}$.

IV. 3. 1. 3 Essais sur un matériau de référence : béton de terre « Cématerre »

Le matériau utilisé est un béton de terre nommé « Cématerre ». L'échantillon utilisé est de dimensions $270 \times 270 \times 60 \text{ mm}^3$ (**Figure IV.7**). Ses caractéristiques sont données dans le **Tableau IV. 3**. La résistance chauffante est réglée à une tension et intensité égales à 5.95 V et 1.12 A respectivement afin d'imposer une température chaude $T_c = 35 \text{ }^\circ\text{C}$. La température froide était égale à $T_f = 17 \text{ }^\circ\text{C}$. Le **Tableau IV. 4** liste les différentes températures de l'essai une fois le régime permanent atteint après environ 1200 minutes du début de l'essai de chauffe.

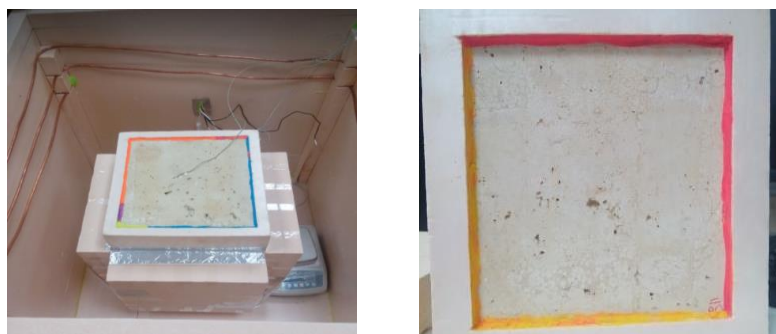


Figure IV. 7 : Essai de transfert de chaleur en régime permanent à travers le béton de terre « Cématerre » de dimensions $270 \times 270 \times 60 \text{ mm}^3$

Tableau IV. 3 : Caractéristiques physiques et thermique du béton de terre « Cématerre » [Hibouche, 2013]

Masse volumique (kg/m^3)	Teneur en eau (%)	Porosité (%)	Conductivité thermique ($\text{W/ (m. }^\circ\text{C)}$)
1562.4	2	45	0.628

Tableau IV. 4 : Tableau des températures en régime permanent

Température	Valeur ($^\circ\text{C}$)
Température chaude T_c	35.38
Température froide T_f	20.25
Température de la surface chaude T_{sc}	32.35
Température de la surface froide T_{sf}	26.53

Les résultats de l'essai sont présentés dans la **Figure IV. 8**. Le critère pour justifier l'atteinte du régime permanent, est de s'assurer que la température reste constante pendant au moins 1 heure. On dit qu'une température reste constante si l'erreur absolue sur sa valeur ne dépasse

pas 0.1 °C. Dès que le régime permanent est atteint, on commence à relever cinq à six mesures de (T_f , T_c , T_{sc} , T_{sf} et V) par intervalle de dix minutes et on prend par la suite la valeur moyenne de chaque paramètre afin de calculer la conductivité thermique (NF EN ISO 8990).

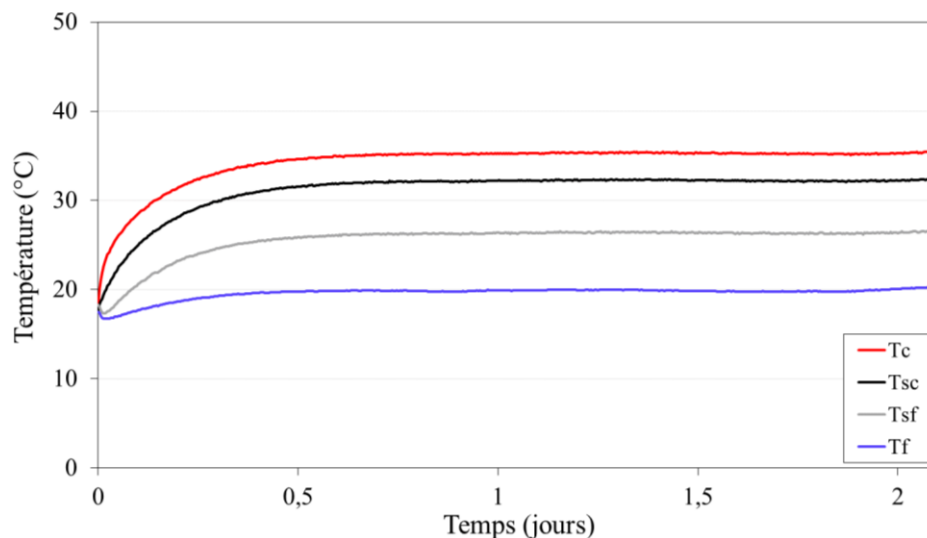


Figure IV. 8 : Profils des températures en fonction du temps pour une température chaude fixée à $T_c = 35 \text{ °C}$ et $T_f = 17 \text{ °C}$

Ainsi, la conductivité thermique mesurée pour le matériau Cématerre est : $\lambda = 0.61 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$. Un second essai a été réalisé sur le même matériau, mais cette fois-ci en imposant une tension et une intensité plus élevées, de l'ordre de 8 V et 1.5 A respectivement afin d'avoir une température chaude plus élevée $T_c = 53 \text{ °C}$. La température froide correspond à la température ambiante de la salle expérimentale : $T_f = 19 \text{ °C}$. La Figures IV. 9 montre la variation des températures en fonction du temps et l'obtention du régime permanent.

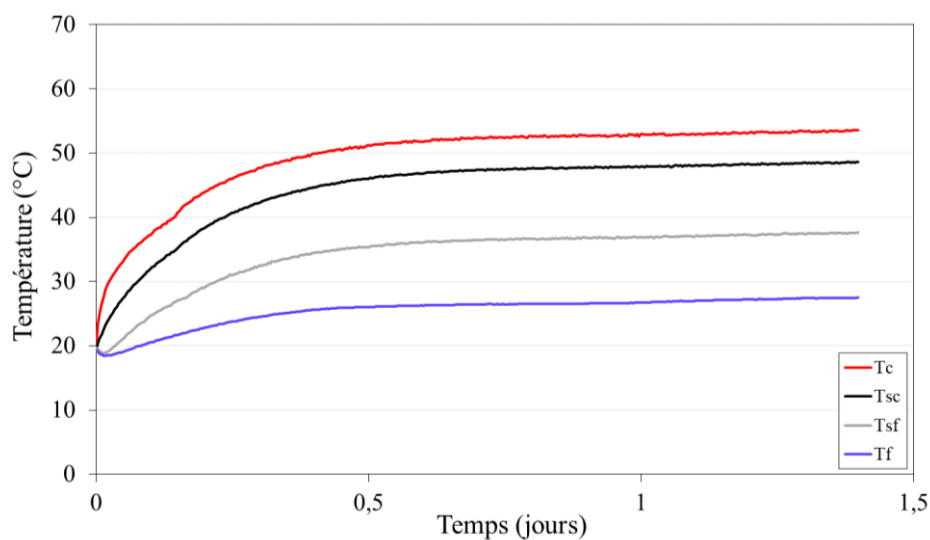


Figure IV. 9 : Evolution des températures en fonction du temps pour une température chaude fixée à $T_c = 53 \text{ °C}$ et $T_f = 19 \text{ °C}$

La conductivité thermique mesurée à l'aide de ce second essai pour le matériau Cématerre est : $\lambda = 0.59 \text{ W/ (m. } ^\circ\text{C)}$. Le **Tableau IV. 5** récapitule les résultats obtenus pour le matériau « Cématerre ». Les rapports entre les conductivités thermiques que nous avons mesurées et celles obtenues par **Hibouche (2013)** étaient de l'ordre de 1. Rappelons ici que nos dispositifs étaient différents.

Tableau IV. 5 : Tableau récapitulatif des résultats des essais préliminaires sur le « Cématerre »

Béton de terre « Cématerre »		
Conductivité thermique de « Cématerre » : littérature [Hibouche, 2013]	$\lambda_{\text{littérature}} = 0.628 \text{ W/ (m. } ^\circ\text{C)}$	
Mesure de la conductivité thermique de « Cématerre » à l'aide du dispositif de couplage	$T_c = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $T_f = 17 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\lambda = 0.61 \text{ W/ (m. } ^\circ\text{C)}$	$T = 53 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $T_f = 19 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\lambda = 0.59 \text{ W/ (m. } ^\circ\text{C)}$
Ratio	1.03	1.06

IV. 3. 1. 4 Essais d'étalonnage avec le Plâtre plein

Le même protocole de mesure a été suivi pour la détermination de la conductivité thermique d'un échantillon de plâtre plein de dimensions $270 \times 270 \times 70 \text{ mm}^3$. D'après sa fiche technique, la conductivité thermique de ce matériau est $\lambda_{\text{fiche technique}} = 0.25 \text{ W/ (m. } ^\circ\text{C)}$.

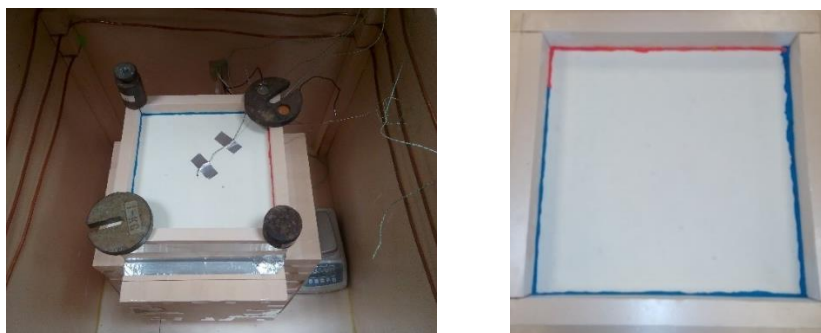


Figure IV. 10 : Essai de transfert thermique à travers le plâtre plein à l'aide du dispositif de couplage
Les résultats obtenus sont résumés dans le **Tableau IV. 6**. Les ratios entre la valeur de la fiche technique et celles de cette étude sont entre 0.83 et 0.93.

Tableau IV. 6 : Tableau récapitulatif des résultats des essais de transfert thermique pour le plâtre plein

Plâtre plein		
Conductivité thermique du « plâtre plein » : fiche technique	$\lambda_{\text{fiche technique}} = 0.25 \text{ W/ (m. } ^\circ\text{C)}$	
	$T_c = 33 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $T_f = 23 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_c = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $T_f = 23 \text{ } ^\circ\text{C}$

Mesure de la conductivité thermique du « plâtre plein » à l'aide du dispositif de couplage	$\lambda = 0.27 \text{ W}/(\text{m. } ^\circ\text{C})$	$\lambda = 0.3 \text{ W}/(\text{m. } ^\circ\text{C})$
Ratio	0.93	0.83

IV. 3. 2 Transfert hygrométrique

Dans cette partie, un essai préliminaire utilisant la méthode de coupelle, de transfert hygrométrique, a été réalisé sur « Cématerre » (**Figure IV. 11**) pour déterminer la perméabilité à la vapeur (Travaux de thèse de Hibouche (2013)). Les échantillons utilisés sont de dimensions identiques, de 100 mm de diamètre et de 13 mm d'épaisseur. Il est initialement sec enrobé d'un film étanche sur sa circonférence et ensuite scellé dans le dispositif pour garantir un flux de vapeur unidirectionnel. Deux solutions salines saturées en K_2SO_4 et le CaCl_2 sont utilisées pour imposer des humidités relatives de l'ordre de 90% et 30% respectivement. A l'aide des sondes AVIOSYS, on pouvait contrôler l'humidité relative en continu. A l'aide de la balance de précision on déterminait l'évolution de la masse de vapeur échangée durant l'essai en fonction du temps.

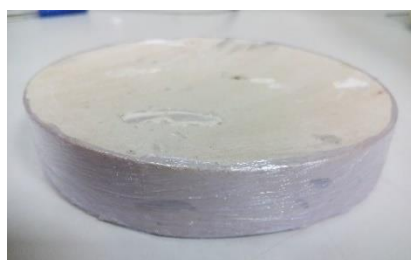


Figure IV. 11 : Echantillon de « Cématerre » pour l'essai de transfert de vapeur d'eau

La **Figure IV. 12** montre l'évolution de la masse de vapeur d'eau échangée durant l'essai. On observe bien la présence des deux régimes de transfert : transitoire et permanent. En exploitant la pente de la partie linéaire représentant le régime permanent, et en appliquant la loi de Fick, on a déduit que la perméabilité à la vapeur de « Cématerre » est égale à $2 \times 10^{-11} \text{ kg}/(\text{m. s. Pa})$. En comparant ce résultat avec ceux réalisés dans les travaux de thèse de Hibouche (2013), on trouve que les ratios sont respectivement de 2.6 et 1.89 (**Tableau IV. 7**).

Tableau IV. 7 : Perméabilité à la vapeur d'eau du « Cématerre »

Perméabilité à la vapeur de « Cématerre » [$\text{kg}/(\text{m. s. Pa})$]	
Hamrouni, 2023 (Dispositif de couplage)	2×10^{-11}

Hibouche, 2013 (Méthode des dessiccateurs)	7.64×10^{-12}
Hamrouni 2023 (Annexe A2)	1.06×10^{-11}

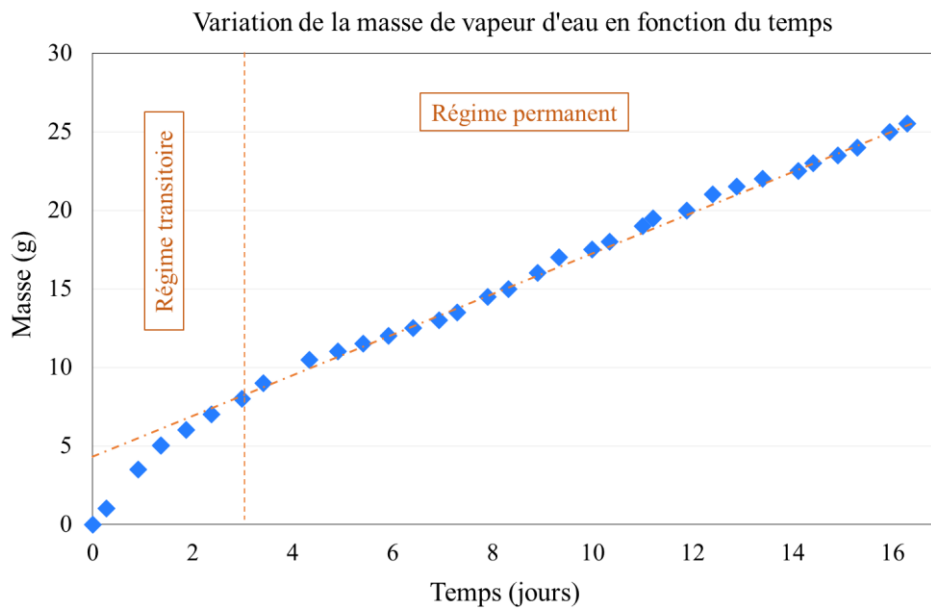


Figure IV. 12 : Evolution de la masse de vapeur d'eau échangée en fonction du temps

IV. 3. 3 Transferts couplés hygrothermiques

IV. 3. 3. 1 Calibration des capteurs SHT40

Afin de vérifier la fiabilité des résultats de température et d'humidité, un essai de calibration de capteurs SHT40 a été réalisé. Il consiste à insérer deux capteurs SHT40 à l'intérieur d'un échantillon de limon GO partiellement saturé ($S_r = 70\%$) (**Figure IV. 13**). Ensuite, un des deux capteurs est retiré et laissé en contact avec l'air libre de la salle expérimentale. Finalement, on retire l'autre capteur de l'échantillon et on le met aussi en contact avec l'air libre pour voir s'il suit les mêmes profils de température et d'humidité enregistrés par le premier capteur retiré.

La **Figure IV. 14**, montre les résultats de ces mesures. On note que :

- La première zone (zone I) correspond à la période où les deux capteurs SHT40 sont insérés à l'intérieur de l'échantillon de terre crue à mi-épaisseur. La température et l'humidité sont constantes et elles sont respectivement de l'ordre de 27.5°C et 100% .
- Dans la zone II, un des deux capteurs reste à l'intérieur de l'échantillon et l'autre est retiré et mis en contact avec l'atmosphère. On voit bien que l'humidité relative pour ce capteur baisse de 100% à 45% qui est l'humidité de la salle expérimentale. Par contre, la température reste constante à 27.5°C .

- La zone III correspond au retrait du second capteur de l'échantillon qui est mis en contact avec l'air libre. On voit bien la baisse en humidité aussi pour ce capteur de 100% à 45%. La température baisse aussi à 26°C qui est la température de la salle expérimentale. Les résultats permettent d'une part d'évaluer les temps de réponse de ces capteurs SHT40 et d'autre part leur bon fonctionnement.



Figure IV. 13 : Capteur SHT40 insérés dans l'échantillon de terre

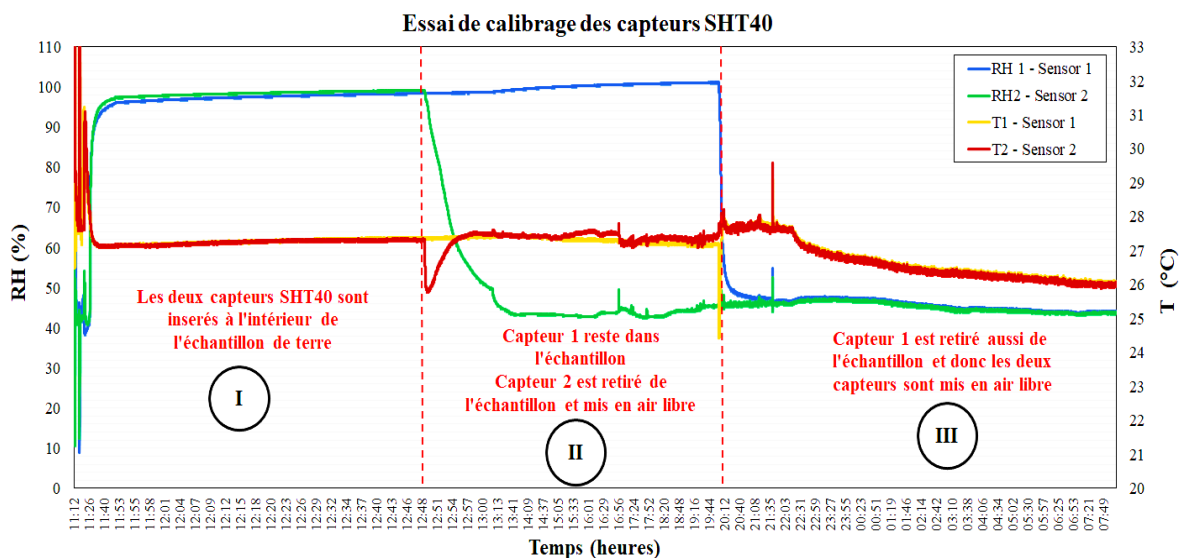


Figure IV. 14 : Profils de température et humidité relative en fonction du temps à l'aide des capteurs SHT40

IV. 3. 3. 2 Essai préliminaire de transferts couplés hygrothermiques

L'essai consiste à imposer un gradient de température et un gradient d'humidité relative constants simultanément à travers un échantillon cylindrique de limon GO de 100 mm de diamètre et 50 mm de hauteur (Figure IV. 15). La surface latérale de l'échantillon est isolée à l'aide d'un film plastique étanche et d'une couche de cire puis serti dans du polystyrène permettant d'avoir des flux de chaleur et de vapeur unidirectionnels. Dans le but de suivre les profils de température et d'humidité, cinq capteurs SHT40 sont utilisés : un capteur est inséré à l'intérieur de l'échantillon (point C), deux sur les deux surfaces de l'échantillon (positions B

et D), un dans la boîte chaude (position A) et un autre dans la boîte froide (position E) (**Figure IV. 16**).

L'échantillon de limon GO de 100 mm de diamètre et de 50 mm d'épaisseur utilisé pour cet essai est initialement quasi-sec, d'humidité relative initiale $HR_0=12.5\%$ et de température initiale $T_0 = 35.5\text{ }^\circ\text{C}$. Ses propriétés physiques sont présentées dans le **Tableau IV. 8**. La configuration expérimentale utilisée est montrée dans la **Figure IV. 16**. En effet, dans la boîte chaude, une solution saline saturée en K_2SO_4 est utilisée pour imposer une humidité relative $HR = 94\%$. A l'aide de la résistance chauffante, une température chaude T_c de l'ordre de $45\text{ }^\circ\text{C}$ est imposée. La boîte froide est laissée ouverte pour que l'échantillon soit en contact avec l'atmosphère de la salle expérimentale dont la température et l'humidité relative sont de l'ordre de $27\text{ }^\circ\text{C}$ et 45% respectivement. L'humidité est donc contrôlée dans la chambre chaude, mais fluctue légèrement dans la boîte froide en fonction du climat ambiant dans la salle. Il s'agit d'un essai de sorption de vapeur d'eau puisque les humidités relatives imposées sont plus importantes que celle de l'échantillon.

Tableau IV. 8 : Propriétés physiques de l'échantillon du limon GO

γ_h (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	HR (%)	Sr (%)
17.70	17.63	12.5	2.03

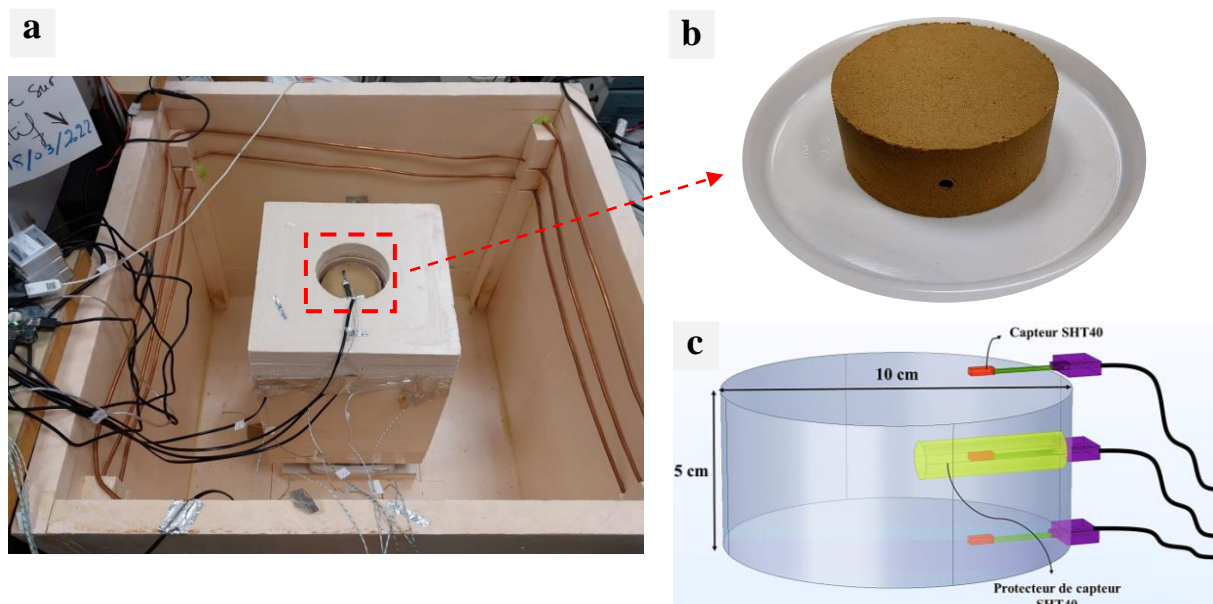


Figure IV. 15 : (a) Essai de couplage hydrothermique en cours, (b) échantillon de terre utilisé pour l'essai et (c) dispositions des capteurs SHT40 dans l'échantillon

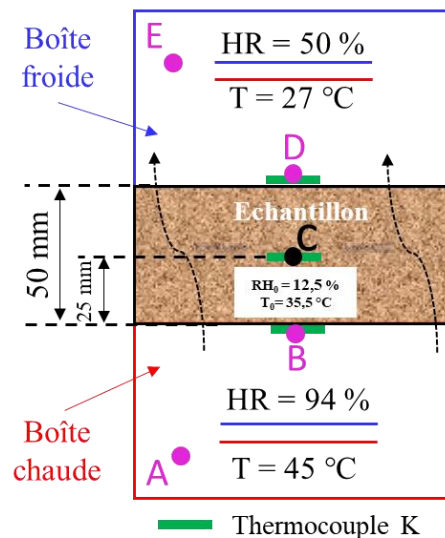


Figure IV. 16 : Configuration expérimentale utilisée pour l'essai d'étalonnage

IV. 3. 3. 3 Résultats et discussions

Les résultats de l'essai sont illustrés dans les **Figures IV. 17** et **IV. 18**, qui montrent l'évolution de l'humidité relative HR et de la température T au niveau des positions des capteurs SHT40. L'essai a duré six jours. D'après une analyse globale des figures, on remarque qu'au niveau de la boîte chaude (point A) et la surface chaude de l'échantillon (point B), les profils de T et HR sont stables et sont sans fluctuations. HR aux points A et B, augmente de 70% à l'état initial pour se stabiliser au bout d'un jour à 94% et 86% respectivement. Concernant les températures (T), elles augmentent de 39°C et 41°C pour se stabiliser au bout de deux jours à 41.5°C et 44 °C respectivement. Par contre, au niveau de la boîte froide (point E), T et HR fluctuent beaucoup pendant toute la durée de l'essai. Ceci est dû au fait que la boîte froide est laissée ouverte au contact de l'atmosphère de la salle expérimentale, elle-même fluctuante. De même, T et HR mesurées au niveau de la surface froide de l'échantillon (point D), sont également influencées par celles de la boîte froide et cela explique leurs fluctuations.

A l'intérieur de l'échantillon, au point C, on constate une augmentation progressive et importante de HR en fonction du temps de 12.5% à 100% au bout du six jours. Après quatre jours d'essai, HR dépasse l'humidité relative imposée dans la boîte chaude et qui est égale à 94%. Ceci pose la question du bon fonctionnement de ces capteurs noyés dans l'échantillon aux très fortes humidités. En effet, aux fortes humidités, il se peut qu'il y ait de la condensation de la vapeur d'eau à l'intérieur du protecteur de capteur SHT40, ce qui entraîne une hausse d'humidité. Par contre, on observe une légère augmentation de la température au point C de

35.5 °C à l'état initial pour se stabiliser à 37% au bout de deux jours. A la fin de l'essai, nous avons rencontré un problème avec la résistance chauffante où T au point A, a baissé à 32°C. Cette baisse a affecté l'évolution de T et HR dans les autres points de mesure.

Bien que ces essais étaient préliminaires, différents problèmes ont été rencontrés. Ils ont permis d'améliorer les protocoles expérimentaux pour les essais suivants. Cependant, malgré ces problèmes on a pu constater que le dispositif de couplage développé fonctionne et répond bien aux objectifs attendus.

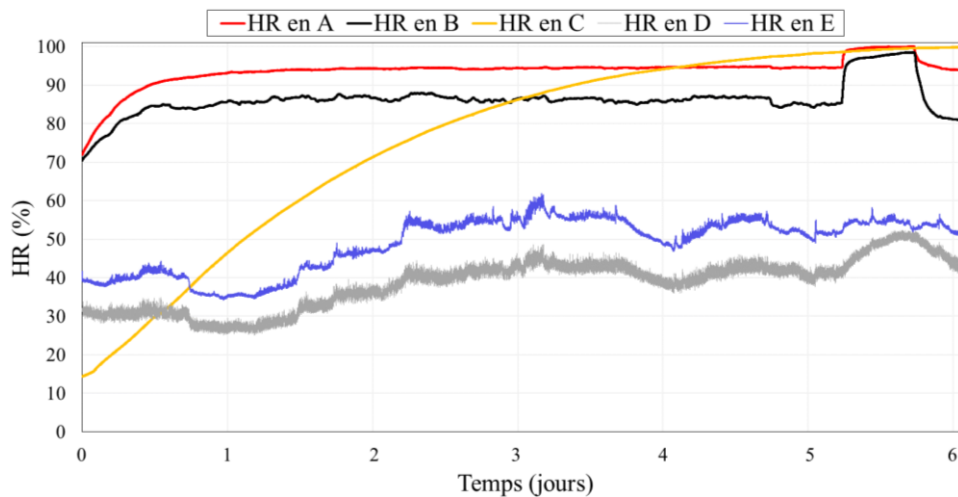


Figure IV. 17 : Profils des humidités relatives en différentes positions en fonction du temps (Essai préliminaire de transferts couplés hygrothermiques)

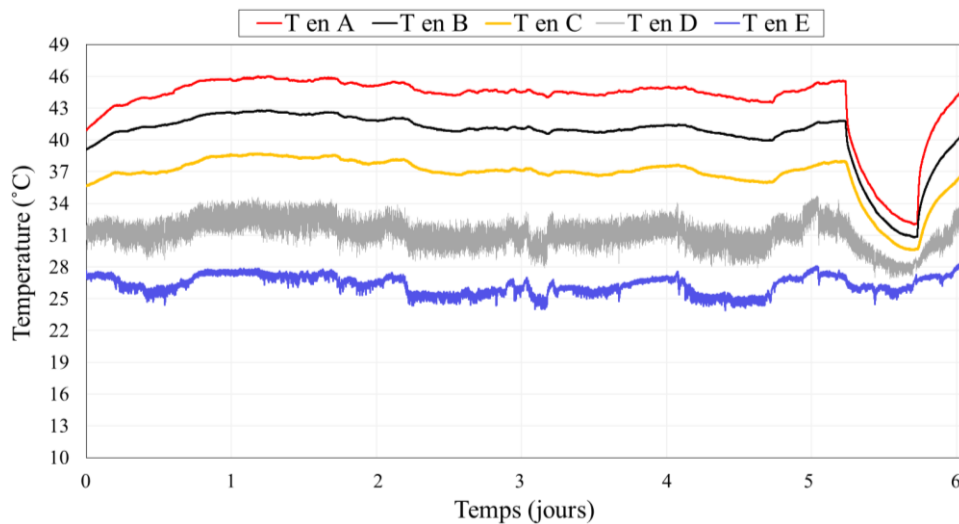


Figure IV. 18 : Profils des températures en différentes positions en fonction du temps (Essai préliminaire de transferts couplés hygrothermiques)

En plus des résultats de capteurs SHT40, les résultats de l'acquisition des données de la balance sont présentés dans la Figure IV. 19. Les résultats présentent une perte de masse de vapeur en

fonction du temps puisque le transfert de vapeur d'eau se fait de la boîte chaude (94%), qui est posée sur la balance, vers la boîte froide (50%). D'après la loi de Fick, la perméabilité à la vapeur d'eau déduite de cette courbe est $\delta_v = 1 \times 10^{-10}$ kg/ (m. s. Pa).

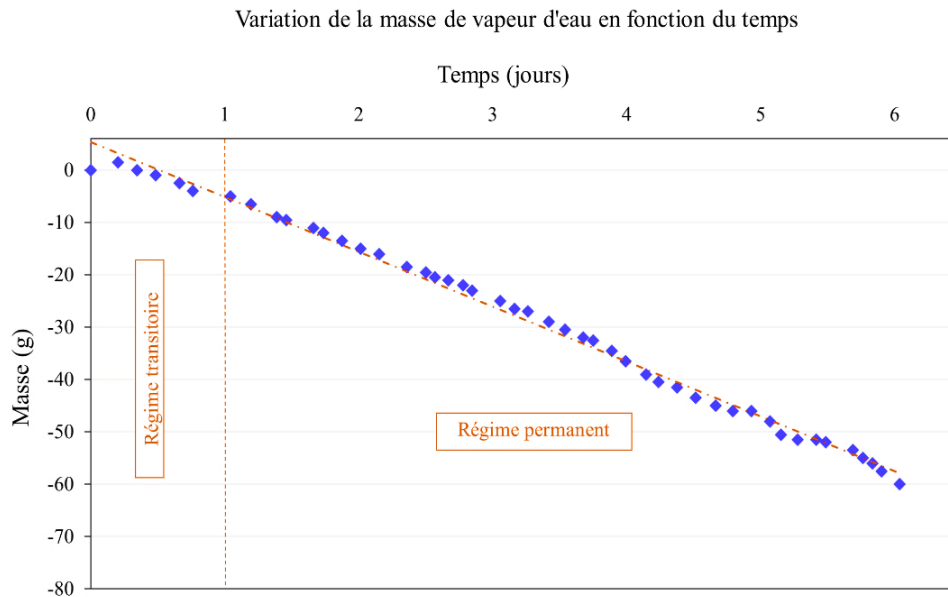


Figure IV. 19 : Evolution de la masse de vapeur en fonction du temps

IV. 4 Transferts couplés hygrothermiques dans la terre crue

Deux essais de couplage hygrothermique ont été réalisés dans cette partie sur le limon GO. Durant ces essais, les sollicitations en humidité HR et température T sont statiques, autrement dit constantes durant tout l'essai. Les mesures de T et HR ont été effectuées à l'aide du capteur SHT40 en cinq positions différentes : A, B, C, D et E qui représentent respectivement, l'intérieur de la boîte chaude, la surface chaude de l'échantillon, le milieu de l'échantillon, la surface froide de l'échantillon et l'intérieur de la boîte froide.

IV. 4. 1 Essai n°1

L'échantillon de limon utilisé pour l'essai préliminaire précédent et qui était à 100% d'humidité relative à la fin de l'essai, a été utilisé pour cet essai. Il est soumis à deux gradients de T et HR simultanément. Les conditions aux limites imposées dans la boîte froide sont toujours les conditions ambiantes de la salle expérimentale. Une solution saline saturée en LiCl permettant d'avoir une humidité HR = 14% en contact avec la surface inférieure de l'échantillon a été placée dans la boîte chaude. La température chaude imposée est de l'ordre de 46°C. Il s'agit donc d'un essai de désorption de vapeur d'eau contrairement au premier essai puisque le

gradient d'humidité imposé est plus faible que l'humidité initiale de l'échantillon. La configuration expérimentale représentative pour cet essai est présentée dans la **Figure IV. 20**.

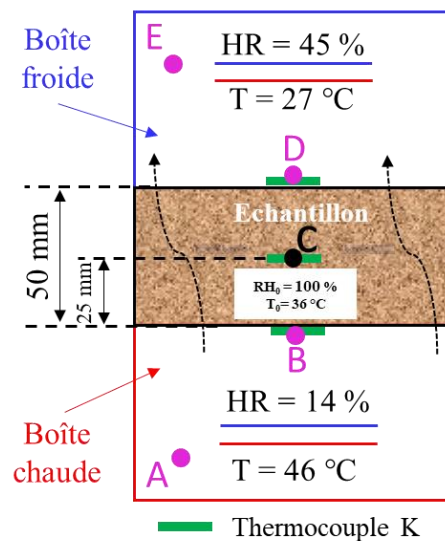


Figure IV. 20 : Configuration expérimentale utilisée pour l'essai n°1 de couplage hygrothermique

IV. 4. 2 Résultats et discussions (Essai n°1)

Les résultats obtenus sont illustrés dans les **Figures IV. 21 et IV. 22**. L'essai a duré 11 jours environ. A cause des conditions fluctuantes de la salle expérimentale (HR et T), on observe toujours des fluctuations des profils de HR et T mesurées dans la boîte froide. Ces fluctuations affectent les profils de T et HR mesurés aux autres positions. Les températures sur la surface chaude de l'échantillon et dans la boîte chaude, augmentent de 37°C et 38.5°C à l'état initial respectivement, puis elles oscillent autour de 43°C et 46°C respectivement. En ce qui concerne l'humidité relative, on observe une baisse de 60% à 14% à l'intérieur de la boîte chaude et de 83% à 16% sur la surface chaude de l'échantillon. Ces valeurs ont nécessité 6 jours pour se stabiliser à 14% et 16%. A l'intérieur de l'échantillon (point C), HR décroît en fonction du temps de 100% à 25%. Elle se stabilise après six jours du début de l'essai à 25%, ce qui correspond au régime transitoire où l'échantillon est en train de se drainer afin de s'équilibrer avec son environnement. Par la suite, le régime permanent s'établit. On remarque que durant ce régime, le profil de HR mesuré au point C reste toujours compris entre ceux mesurés aux points A, B, D et E.

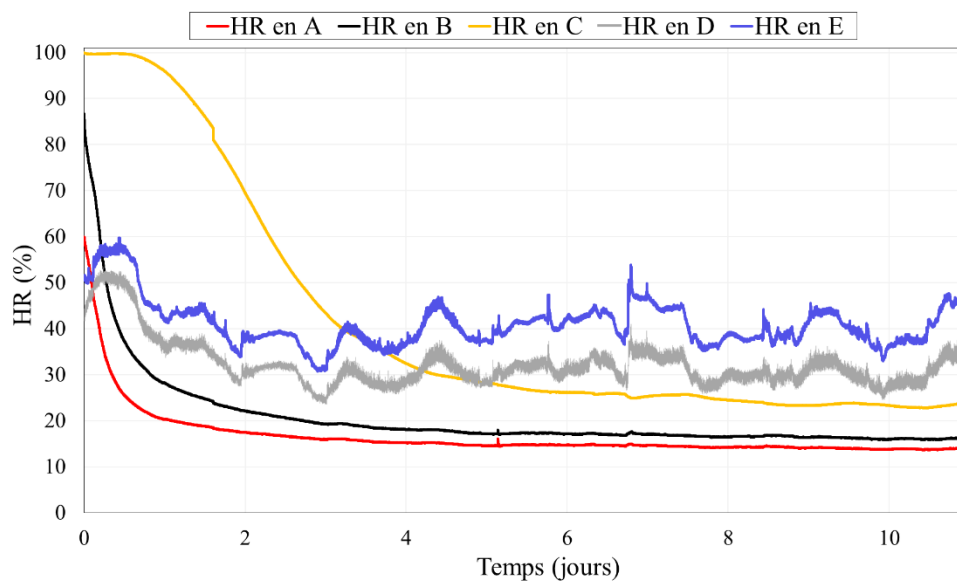


Figure IV. 21 : Evolution de l'humidité relative en différentes positions en fonction du temps (Essai n°1)

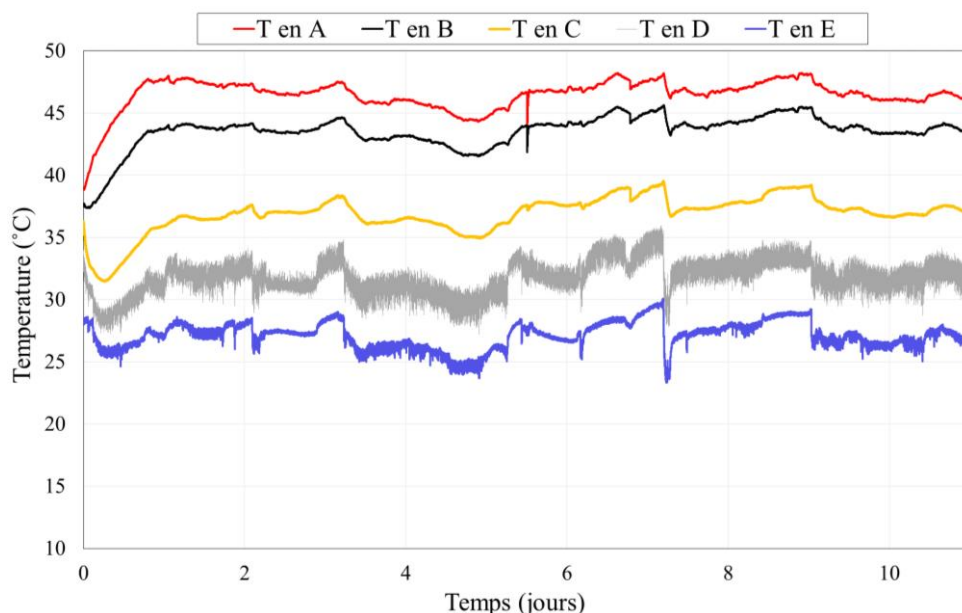


Figure IV. 22 : Evolution de la température en différentes positions en fonction du temps (Essai n°1)

Les **Figures IV. 23** et **IV. 24** présentent les profils spatio-temporels de l'humidité relative HR et de la température T respectivement le long de l'épaisseur de l'échantillon de limon GO. Elles décrivent comment les profils instantanés d'humidité et de température passent d'un régime instationnaire et perturbé à un régime stationnaire et d'équilibre hygrothermique. En analysant la **Figure IV. 23**, on trouve qu'à $t = 0$ jour, l'humidité relative initiale mesurée à l'intérieur de l'échantillon (au point C) et égale à 100% est plus importante que celles mesurées aux surfaces (points B et D). En fonction du temps, on observe une baisse progressive de l'humidité à l'intérieur de l'échantillon pour atteindre l'équilibre avec les humidités de surfaces B et D. Ceci

entraîne que durant le régime transitoire, le flux de vapeur d'eau s'écoule vers les deux extrémités à partir de cœur de l'échantillon : du milieu de l'échantillon vers la surface B et vers la surface D simultanément jusqu'à atteindre l'équilibre hygrométrique. Une fois cet équilibre est atteint, le régime permanent s'installe et le flux de vapeur s'écoule dans le sens imposé par le gradient d'humidité aux extrémités, autrement dit, de E vers A. Les mêmes phénomènes sont observés sur la **Figure IV. 24**. A $t = 0$ jour, la température initiale de l'échantillon est égale 36°C , et elle est plus importante que la température mesurée au point D et plus faible que celle mesurée au point B. Donc, durant le régime transitoire, l'échantillon cherche l'équilibre thermique avec les conditions aux limites imposées. Contrairement à la **Figure IV. 23**, sur la **Figure IV. 24** on observe une augmentation de la température à l'intérieur de l'échantillon, ce qui veut dire qu'il emmagasine de la chaleur durant l'essai puisque la température imposée dans le boîte chaude (égale à 46°C) est plus importante à sa température initiale.

Par ailleurs, on peut déduire les quantités de vapeur et de chaleur emmagasinées dans l'échantillon durant l'essai. En effet, en calculant les aires sous ces courbes d'évolution de T et HR en fonction du temps et en les multipliant par la capacité thermique « c » et la dérivée de l'isotherme d'adsorption « ξ » respectivement, on trouve les quantités emmagasinées de chaleur et d'humidité relative. Les résultats sont illustrés dans les **Figures IV. 25** et **IV. 26**. On remarque une diminution de la quantité de vapeur emmagasinée dans l'échantillon en fonction du temps de 1.64 à 0.45 kg/m^3 en passant de 0 à 10 jours respectivement. Par contre, la quantité de chaleur emmagasinée dans l'échantillon durant l'essai augmente légèrement en passant de 20×10^3 à $20.2 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$.

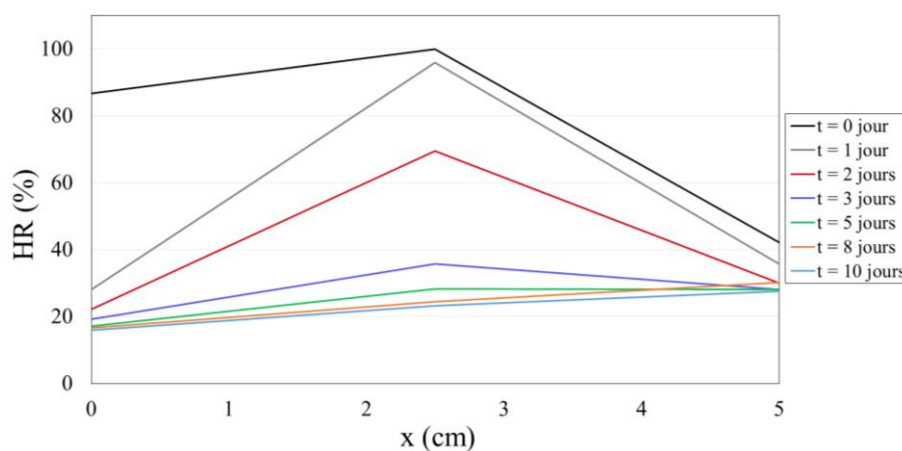


Figure IV. 23 : Evolution de l'humidité relative à travers l'épaisseur de l'échantillon pour différents jours (Essai n°1)

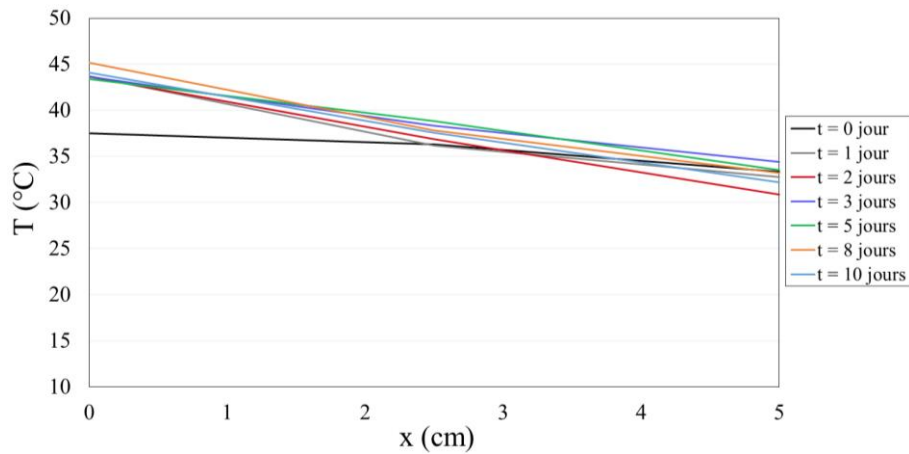


Figure IV. 24 : Evolution de la température à travers l'épaisseur de l'échantillon pour différents jours (Essai n°1)

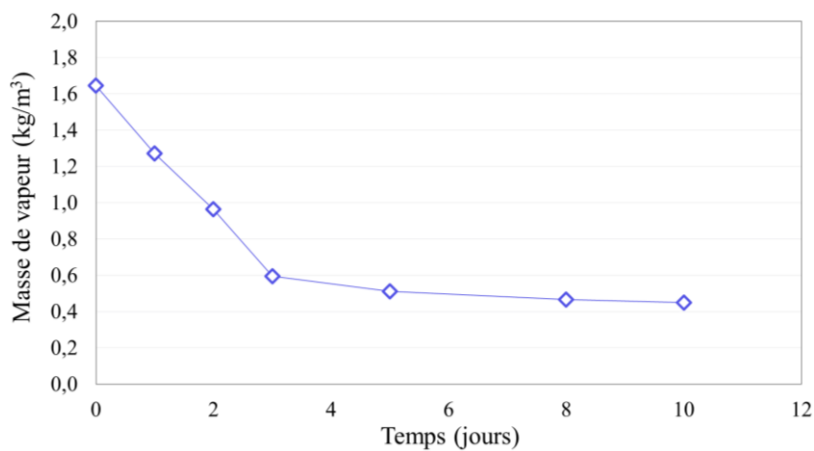


Figure IV. 25 : Evolution de la masse de vapeur d'eau emmagasinée dans l'échantillon en fonction du temps (Essai n°1)

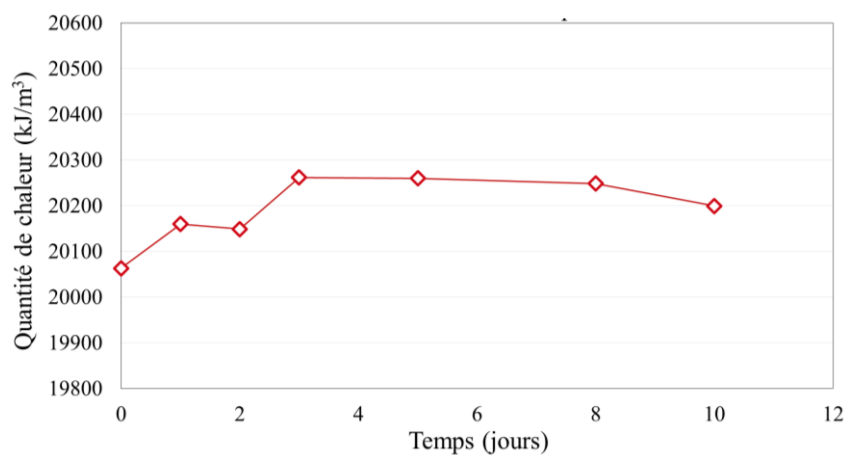


Figure IV. 26 : Evolution de la quantité de chaleur emmagasinée dans l'échantillon en fonction du temps (Essai n°1)

IV. 4. 3 Essai n°2

En utilisant toujours le même échantillon de limon, un nouvel essai de couplage hygrothermique a été réalisé. L'échantillon est initialement à 18% d'humidité relative et 37.5°C

de température. Dans la boîte chaude, une solution saline saturée en NaCl est utilisée pour imposer une $HR = 73\%$. La température est maintenue constante à 45°C à l'aide de la membrane chauffante. Dans la boîte froide, l'humidité relative est de l'ordre de 46% imposée à l'aide des solutions saturées en CaCl_2 . La température est égale à 29°C . Dans cet essai, la boîte froide est isolée cette fois des conditions fluctuantes de la salle expérimentale à l'aide d'un couvercle en polystyrène. La configuration expérimentale de l'essai est schématisée par la **Figure IV. 27**.

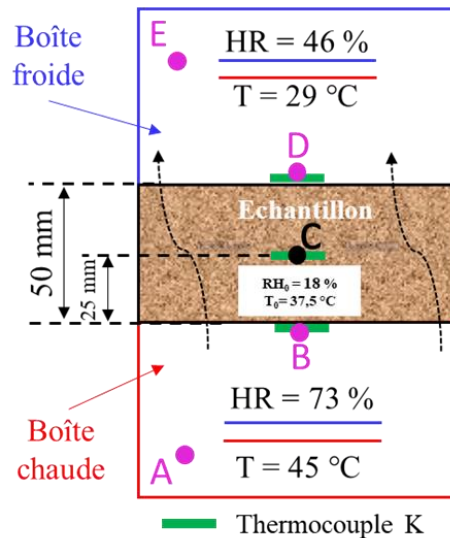


Figure IV. 27 : Configuration expérimentale utilisée pour l'essai n°2 de couplage hygrothermique

IV. 4. 3 Résultats et discussions (Essai n°2)

Les résultats de cet essai sont présentés dans les **Figures IV. 28** et **IV. 29**. L'essai a duré neuf jours et demi environ. Après une analyse des résultats des profils de températures et humidités relatives en différentes positions A, B, C, D et E, on peut observer que les profils sont stables durant l'essai, sans fluctuations au niveau des points D et E. Dans la boîte chaude, au point A, HR et T sont constantes égales à 73% et 45°C respectivement durant l'essai. Dans la boîte froide, au point E, HR et T sont constantes de l'ordre de 46% et 29°C respectivement. Sur la surface chaude de l'échantillon, au point B, HR augmente progressivement de 52% pour se stabiliser à 72% et T augmente légèrement de 42°C à 45°C puis elle reste constante à $42,5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à la fin de l'essai. Sur la surface froide de l'échantillon, au point D, HR est constante égale à 49% et T augmente légèrement de $37,5^{\circ}\text{C}$ à 38°C puis elle diminue et reste constante à 37°C . De plus, on remarque aussi une évolution progressive de HR au point C en fonction du temps, passant de 18% à 64% au bout de neuf jours et demi. Elle reste comprise entre les HR mesurées aux points A, B, D et E. L'équilibre hygrométrique à l'intérieur de l'échantillon s'est

stabilisé à 64% après trois jours et demi environ. En ce qui concerne les profils des T présentés dans la **Figure IV. 29**, on observe une légère augmentation de la température par rapport à l'état initial, de 37.5°C à 41°C au bout de quelques heures. Puis elle diminue progressivement pour se stabiliser à 39°C et reste toujours comprise entre les températures mesurées aux points A, B, D et E.

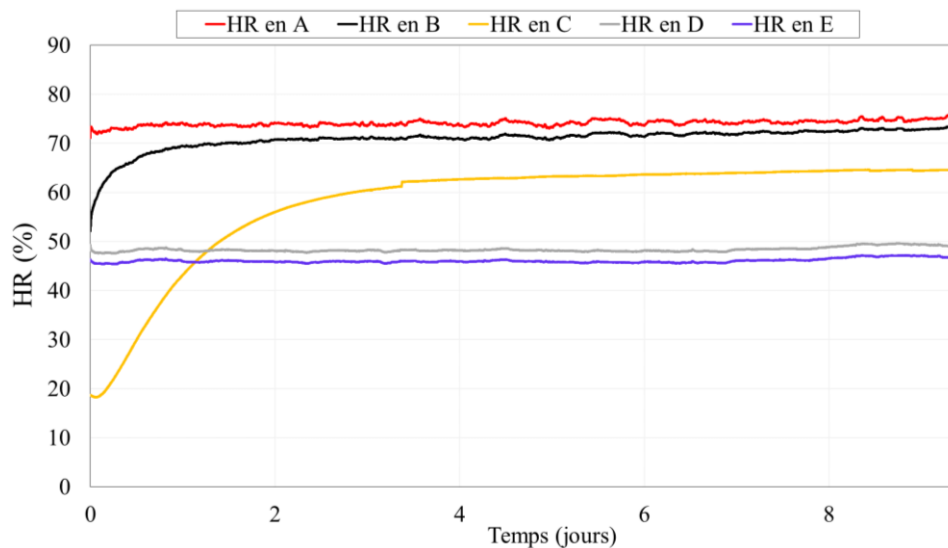


Figure IV. 28 : Evolution de l'humidité relative en différentes positions en fonction du temps (Essai n°2)

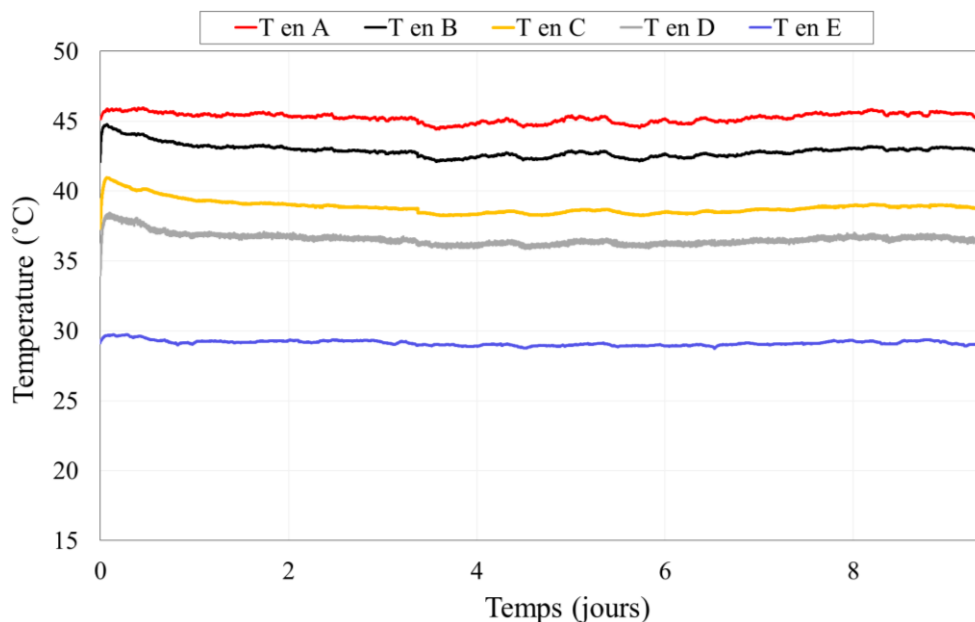


Figure IV. 29 : Evolution de la température en différentes positions en fonction du temps (Essai n°2)

Les **Figures IV. 30** et **IV. 31** présentent les profils instantanés de T et HR le long de l'épaisseur de l'échantillon. On observe des profils instationnaires entre 0 et 3 jours environ et des profils permanents de 3 à 9 jours. A $t=0$ jour, l'humidité relative initiale de l'échantillon (mesurée au

point C) est plus faible que celles mesurées aux surfaces (points B et D). Pour cela, en fonction du temps, on observe une augmentation progressive de l'humidité relative à l'intérieur de l'échantillon jusqu'à atteindre l'équilibre hygrométrique. Cela veut dire que durant le régime transitoire, l'échantillon emmagasine la vapeur d'eau et par conséquent le flux de vapeur converge vers l'échantillon à partir de ces deux extrémités. : de la surface B et D vers l'intérieur de l'échantillon. Une fois l'équilibre atteint et le régime permanent établi, l'écoulement se fait dans un seul sens, de la boîte chaude (HR = 73%) vers la boîte froide (HR = 46%). La **Figure IV. 31**, montre comment les profils instantanés de température évoluent du régime transitoire au régime permanent. A $t = 0$ jour, la température initiale de l'échantillon est égale 37°C , plus importante que la température mesurée au point D et plus faible que celle mesurée au point B (égales à 29°C et 45°C respectivement). Autrement dit, durant le régime transitoire, l'échantillon s'oriente vers l'équilibre thermique résultant des conditions aux limites imposées.

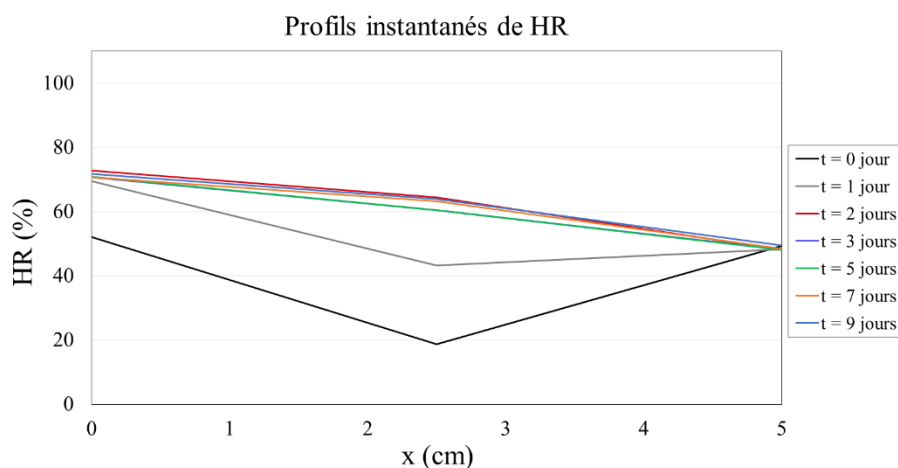


Figure IV. 30 : Evolution de l'humidité relative à travers l'épaisseur de l'échantillon pour différents jours (Essai n°2)

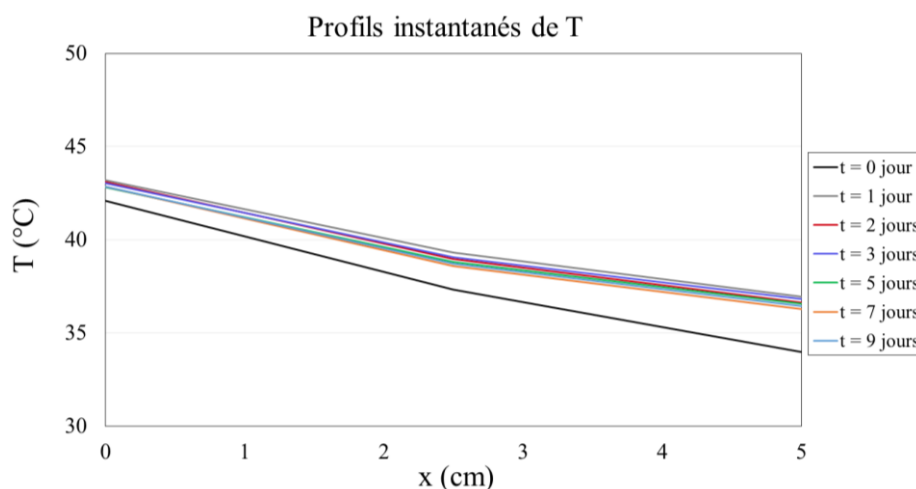


Figure IV. 31 : Evolution de la température à travers l'épaisseur de l'échantillon pour différents jours (Essai n°2)

Les **Figures IV. 32** et **IV. 33**, présentent l'évolution des quantités de chaleur et de vapeur respectivement emmagasinées dans l'échantillon durant l'essai. On observe une augmentation progressive de la quantité de vapeur emmagasinée entre 0 et 3 jours, passant de 0.45 à 1.2 kg/m³. Par la suite, elle se stabilise à 1.2 kg/m³. Une augmentation progressive également est observée pour la quantité de chaleur emmagasinée dans l'échantillon en fonction du temps de 0 à 3 jours puis elle baisse légèrement de 21.88×10³ à 21.86 ×10³ kJ/m³ de 3 à 9 jours respectivement.

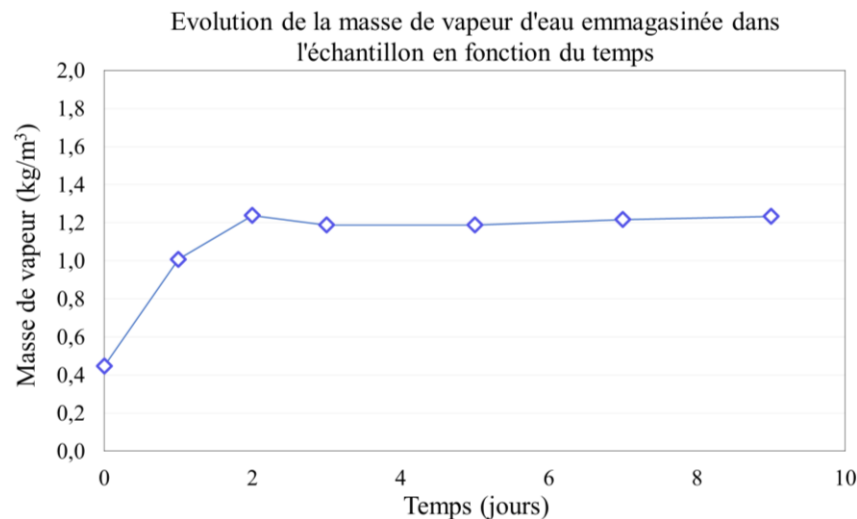


Figure IV. 32 : Evolution de la masse de vapeur d'eau emmagasinée dans l'échantillon en fonction du temps (Essai n°2)

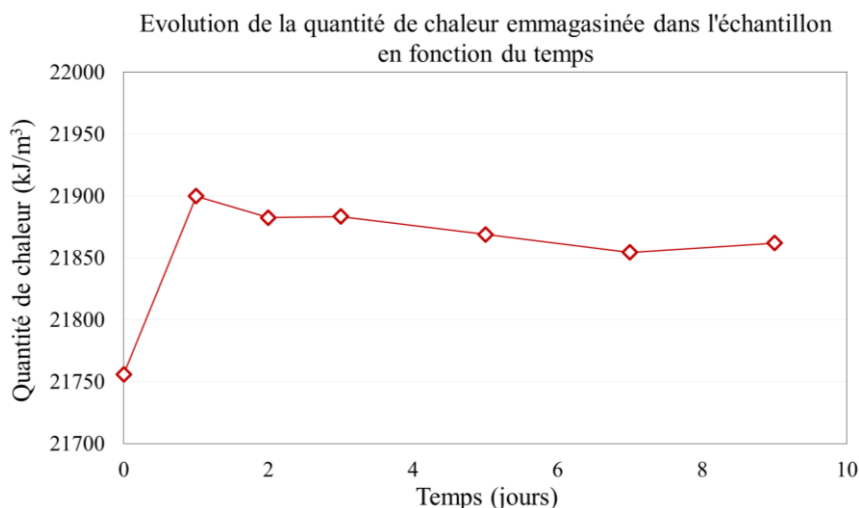


Figure IV. 33 : Evolution de la quantité de chaleur emmagasinée dans l'échantillon en fonction du temps (Essai n°2)

La **Figure IV. 34** montre les résultats d'acquisition des données de la balance. On observe une perte de masse de vapeur d'eau en fonction du temps sur la figure parce que le flux de vapeur est de la boîte chaude (73%) vers la boîte froide (46%). Le régime transitoire a duré 1 jour. Il

est suivi d'un régime permanent où la variation de masse de vapeur est linéaire en fonction du temps. En exploitant la pente de la partie linéaire de la courbe et en se basant sur la loi de Fick, on trouve que la perméabilité à la vapeur du limon en régime permanent pour cet essai est égale à 4.45×10^{-11} kg/ (m. s. Pa).

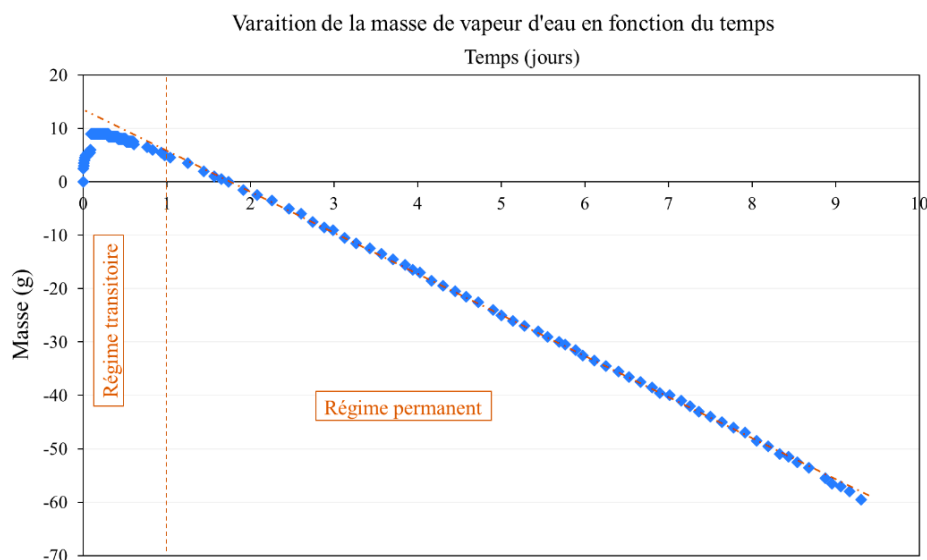


Figure IV. 34 : Variation de la masse de vapeur d'eau échangée en fonction du temps (Essai n°2)

IV. 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le nouveau dispositif dans le cadre de cette étude, permettant d'étudier les transferts couplés hygrothermiques dans les matériaux de construction, en particulier les matériaux bio-sourcés. Ce dispositif original est composé de deux boîtes, une dite chaude et autre dite froide, permettant d'imposer des gradients simultanés de température et d'humidité à travers les matériaux de construction en échantillons cylindriques ou bien parallélépipédiques. Les profils de température et d'humidité relative en différentes positions le long de l'épaisseur du matériau représentent les résultats des essais expérimentaux réalisés à l'aide de ce dispositif de couplage développé. Ces profils peuvent être analysés et comparés à ceux des matériaux de construction classiques afin de mettre en évidence la contribution des matériaux bio-sourcés au confort hygrothermique.

Des essais sur des matériaux de référence tels que le pâtre, le polystyrène et le béton de terre « Cématerre » ont permis de vérifier le bon fonctionnement du dispositif développé, d'abord pour les transferts thermiques seuls, les transferts hygrométriques seuls, et enfin les transferts couplés hygrothermiques. Pour les essais de transferts de chaleur et d'humidité à travers des

matériaux de références mentionnés ci-dessus, les résultats expérimentaux obtenus sont la conductivité thermique et la perméabilité à la vapeur d'eau. Pour chaque matériau de référence, ces résultats expérimentaux ont été comparés à des conductivités thermiques et perméabilités à la vapeur de la littérature sur les mêmes matériaux. Cette comparaison a montré la cohérence des paramètres des différents types de transfert avec ceux de la littérature.

Il s'en est suivi deux essais de transferts hygrothermiques sur le limon GO, le premier sur un échantillon très humide (HR=100%) et le second sur un échantillon partiellement humide initialement (HR=18%). Le but de ces deux essais est d'étudier la réponse du limon GO vis-à-vis des transferts couplés de chaleur et d'humidité et permettront de valider le modèle numérique des transferts couplés qui sera présenté dans le chapitre suivant.

Faute de temps, seulement deux essais de couplage à travers le limon ont été réalisés dans ce chapitre. Ces essais seront complétés, d'une part, par d'autres sous conditions aux limites cycliques en humidité et température afin d'analyser la sensibilité du matériau vis-à-vis des conditions aux limites de ce type et d'autre part par des essais de transferts couplés hygrothermiques à travers le matériau composite limon-fibres de lin permettant de l'effet du pourcentage de fibres.

Chapitre V

Modélisation phénoménologique des transferts couplés hygrothermiques

V. 1 Introduction

Les transferts couplés de chaleur et d'humidité ont fait l'objet de nombreux modèles connus dans la littérature sous le nom « Modèles HAM (Heat, Air and Moisture) ». La différence entre ces modèles HAM réside dans le choix des hypothèses adoptées et surtout dans les moteurs de transferts considérés. Parmi les modèles HAM de référence, on cite les modèles de [Phillip et de Vries \(1957\)](#), [Luikov \(1966\)](#) et [Künzel \(1995\)](#) qui ont été détaillés dans le chapitre I.

Une bonne connaissance des propriétés des matériaux telles que la conductivité thermique, la perméabilité à la vapeur d'eau et les isothermes de sorption/désorption sont nécessaires pour une prédiction réaliste des phénomènes couplés hygrothermiques.

Ce chapitre traite de la modélisation numérique des transferts couplés hygrothermiques dans des matériaux à base de terre crue, plus précisément à l'aide du modèle de [Künzel \(1995\)](#). L'objectif est de valider les résultats expérimentaux obtenus dans le chapitre précédent. Ce chapitre est constitué de trois parties principales : On justifie le choix particulier du modèle de Künzel. Par la suite, on rappelle les équations de Künzel qui ont été implémentées dans le logiciel Comsol Multiphysics, tout en présentant la démarche de leur validation en comparaison avec des résultats de la littérature. La dernière partie de ce chapitre présente les résultats de l'étude numérique des transferts couplés hygrothermiques dans des matériaux à base de terre crue et leur validation à l'aide des résultats expérimentaux.

V.2 Choix du modèle de Künzel

La différence entre les modèles de transferts couplés hygrothermiques réside généralement dans le choix des types de sources de transferts considérés ainsi que les hypothèses adoptées. Les modèles de [Luikov \(1966\)](#) et de [Phillip et de Vries \(1957\)](#), utilisent la température et la teneur en eau massique ou bien volumique comme potentiels sources de transfert. Alors que, le modèle de Künzel utilise la température et l'humidité relative comme potentiels moteurs dans ses équations. Pour les deux premiers modèles, il est bien connu qu'il existe trois problèmes associés à leurs applications : (i) le profil de la teneur en eau est discontinu à l'interface entre les différents composants du matériau, (ii) les coefficients de diffusion de chaleur et d'humidité dépendent de ces sources de transfert (température et teneur en eau), ce qui fait que leur détermination expérimentale soit compliquée, et il est ainsi pratiquement impossible de déterminer cette double dépendance, même avec un effort expérimental majeur,

comme expliqué par Da Cunha et Daian (1991), (iii) du point de vue mathématique, ces équations sont fortement couplées ce qui rend leur résolution difficile [Qin et al., 2007]. En outre, Alioua et al. (2019) a utilisé dans son étude numérique des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans un matériau composite (chapitre I), le modèle de Künzel (1995) et le modèle de Philip et De Vries (1957). Les résultats ont révélé que les deux modèles fournissent des résultats similaires. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi le modèle de Künzel qui est plus simple et qui pose bien entendu une série d'hypothèses simplificatrices telle que la négligence de l'effet de la température dans l'équation de transfert de masse (négligence de l'effet de la thermo-diffusion lors des transferts de masse) [Chabriac, 2014]. Les équations du modèle de Künzel sont rappelées dans les formules (V. 1) et (V. 2) :

$$\rho_0 \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\text{HR} \cdot p_{\text{sat}}) \right) \quad (\text{V. 1})$$

$$\xi \cdot \frac{\partial \text{HR}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\varphi \cdot \frac{\partial \text{HR}}{\partial x} \right) + \delta_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\text{HR} \cdot p_{\text{sat}}) \quad (\text{V. 2})$$

- ρ_0 : masse volumique apparente sèche [kg/m^3]
- c_p : chaleur spécifique du matériau [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
- T : température en [K]
- HR : humidité relative
- $\xi = \frac{\partial w}{\partial \text{HR}}$: dérivée de l'isotherme de sorption/désorption
- w : teneur en eau du matériau [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
- p_{sat} : pression de vapeur saturante [Pa]
- λ : conductivité thermique du matériau [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
- D_φ : coefficient de diffusion d'eau liquide [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]
- δ_v : perméabilité à la vapeur du matériau [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]
- L_v : chaleur latente de vaporisation [J/kg].

Le modèle de Künzel, présenté ci-dessus, contient des termes de stockage et des termes de transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux. L'équation de transfert thermique (équation V. 1) est composée d'un premier terme de transfert de chaleur par conduction thermique ($\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right)$) et d'un deuxième terme résultant du phénomène physique d'évaporation-condensation ($L_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\text{HR} \cdot p_{\text{sat}}) \right)$). Ce terme source traduit les effets de changement de phases à l'intérieur du matériau (condensation de l'humidité relative ou évaporation de l'eau

liquide dont la source est la pression partielle de vapeur d'eau : $p_v = HR \cdot p_{sat}$). La deuxième équation (équation V. 2) représente l'équation de transport de masse sous forme d'eau liquide et de vapeur d'eau. Elle est composée de deux termes, le premier terme traduit la diffusion d'eau sous forme liquide et le deuxième présente le transfert de vapeur d'eau. La diffusion de vapeur d'eau est gouvernée par la pression partielle de vapeur p_v , qui est le produit de l'humidité relative HR et de la pression de la vapeur saturante p_{sat} , laquelle dépend de la température. La résolution numérique de ces équations aux dérivées partielles est faite à l'aide de COMSOL Multiphysics. Cette résolution est basée sur la méthode des éléments finis qui consiste à discrétiser les équations sur une grille spatiale afin de les ramener à un système d'équations algébriques et différentielles non-linéaires. Pour implémenter les équations de Künzel, nous avons choisi le modèle EDP (Equations aux Dérivées Partielles), comme forme générale dans la bibliothèque du logiciel Comsol où on trouve le système d'équations suivant :

$$e_a \times \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = d_a \times \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \Gamma = f \quad (V. 3)$$

$$- n \times \Gamma = g - q \times u \quad (V. 4)$$

L'analogie entre les équations de Künzel et celles présentées ci-dessus (V.3 et V.4) conduit à :

- $e_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
- $d_a = \begin{pmatrix} \rho_0 \times c_p & 0 \\ 0 & \xi \end{pmatrix}$
- $u = \begin{pmatrix} T \\ HR \end{pmatrix}$
- $\Gamma = \begin{pmatrix} \lambda \times \frac{\partial T}{\partial x} + L_v \times \delta_v \times \frac{\partial}{\partial x} (HR \times p_{sat}) \\ D_\phi \times \frac{\partial HR}{\partial x} + \delta_v \times \frac{\partial}{\partial x} (HR \times p_{sat}) \end{pmatrix}$
- $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}$
- $f = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

V.3 Validation du modèle de Künzel

Une première étape de validation de la procédure d'implémentation du modèle de Künzel dans le logiciel COMSOL est nécessaire. Ainsi, deux validations numériques ont été réalisées.

V. 3. 1 Benchmark de simulations mathématiques de transferts hygrothermiques

Dans le cadre d'un projet lancé par l'Union Européenne, une plate-forme pour l'évaluation de la modélisation numérique des mécanismes de transfert de chaleur, humidité et air (HAM) en physique du bâtiment a été développée. Il s'agit de cinq benchmarks de simulations mathématiques des transferts hygrothermiques à travers des murs monocouches ou multicouches. Il faut mentionner que ces benchmarks ne couvrent que les cas unidimensionnels. L'originalité des cinq cas de benchmark réside dans la démarche "pas à pas" de complexité croissante, partant des caractérisations d'un matériau monocouche en conditions stationnaires, jusqu'aux mesures sur une paroi multicouches en climat réel.

Considérons le cas benchmark n°2 où un mur monocouche d'épaisseur 20 cm est soumis à un gradient d'humidité relative en conditions isothermes [Dong et al., 2020] (voir Figure V. 1). Les conditions initiales de température et d'humidité sont respectivement 20°C et 95% et les conditions aux limites extérieure et intérieure en température et en humidité sont respectivement $T_e = 20^\circ\text{C}$ et $HR_e = 45\%$ et $T_i = 20^\circ\text{C}$ et $HR_i = 65\%$. Les coefficients de transfert de chaleur et de masse sont respectivement $h_e = h_i = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ et $\beta_e = \beta_i = 1.10^{-3} \text{ s}/\text{m}$. Les propriétés du matériau sont présentées dans le **Tableau V. 1**.

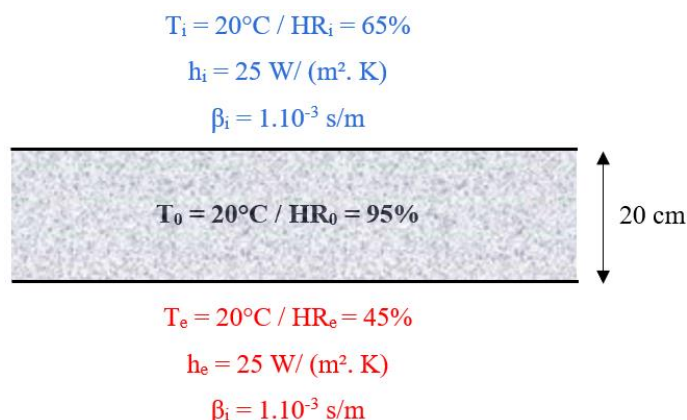


Figure V. 1 : Schéma représentatif du cas n°2 de Benchmark

Tableau V. 1 : Propriétés du matériau de benchmark cas n°2 [Dong et al., 2020]

Propriété du matériau	Valeur / Formule
Isotherme de sorption	$w = \frac{116}{(1 - \frac{1}{0.118} \cdot \ln(HR))^{0.869}}$
Perméabilité à la vapeur d'eau (kg/ (m. s. Pa))	$\delta_v = 1.10^{-15}$
Coefficient de diffusion hydrique (m²/s)	$D_w = 6.10^{-10}$
Conductivité thermique (W/ (m. K))	$\lambda = 0.15$
Capacité de chaleur massique (J/ (kg. K))	$c_p = 800$
Masse volumique sèche (kg/m³)	$\rho_0 = 525$

Les conditions aux limites appliquées sont :

- Conditions aux limites intérieures

$$-n \times \Gamma = g - q \times u \quad \text{avec } g = \begin{pmatrix} h_i \times T_i + L_v \times \beta_i \times (HR_i \times p_{\text{sat } i}(T_i) - HR \times p_{\text{sat}}(T)) \\ \beta_i \times (HR_i \times p_{\text{sat } i}(T_i) - HR \times p_{\text{sat}}(T)) \end{pmatrix}$$

$$\text{et } q = \begin{pmatrix} h_i & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- Conditions aux limites extérieures

$$-n \times \Gamma = g - q \times u \quad \text{avec } g = \begin{pmatrix} h_e \times T_e + L_v \times \beta_e \times (HR_e \times p_{\text{sat } e}(T_e) - HR \times p_{\text{sat}}(T)) \\ \beta_e \times (HR_e \times p_{\text{sat } e}(T_e) - HR \times p_{\text{sat}}(T)) \end{pmatrix}$$

$$\text{et } q = \begin{pmatrix} h_e & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

La **Figure V. 2** montre une comparaison entre les profils de la teneur en eau du cas n°2 de Benchmark obtenus analytiquement et ceux de notre modélisation numérique à 100, 300 et 1000 heures de simulation. On remarque une très bonne concordance entre les résultats numériques et analytiques puisque les trois courbes qui correspondent à 100, 300 et 1000 heures de simulation sont confondues. Ceci montre que la résolution numérique du modèle de Künzel implémenté dans COMSOL fonctionne correctement.

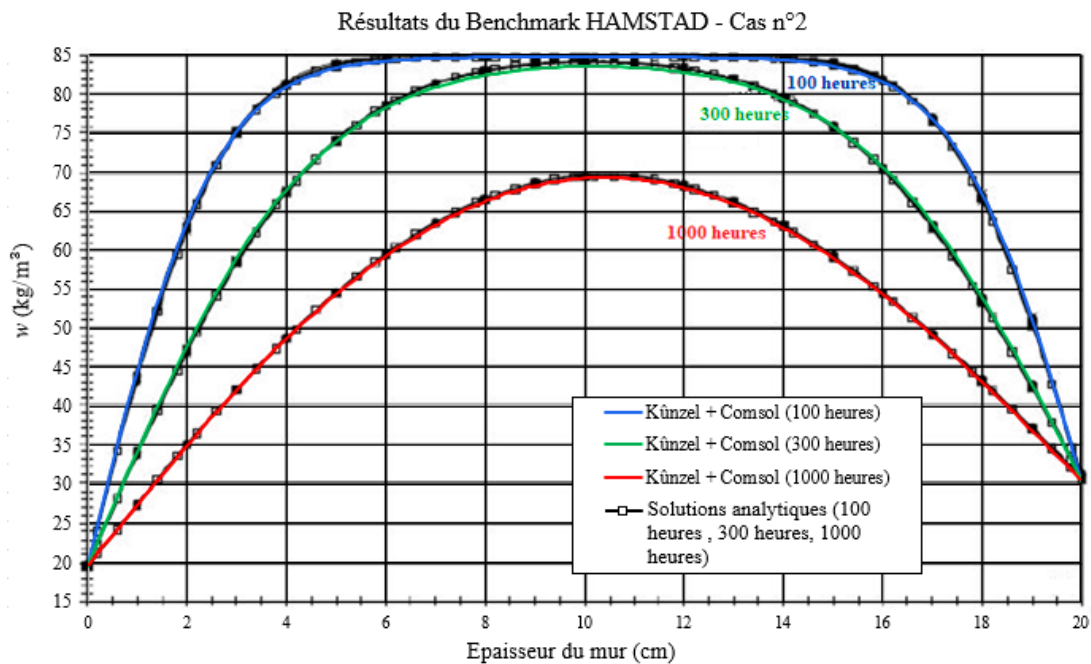


Figure V. 2 : Profils de la teneur en eau massique à différentes périodes de transfert hygrothermique (100h, 300h et 1000h)

V. 3. 2 Transferts couplés hygrothermiques dans des matériaux de construction [Driss, 2008]

Dans les travaux de thèse de [Driss \(2008\)](#), des essais expérimentaux sur des transferts couplés de chaleur et d'humidité à travers des parois de différentes épaisseurs (15 et 30 cm) de trois matériaux différents (béton cellulaire AAC, brique à perforations verticales VPB et béton de chanvre HLC), ainsi que des simulations numériques à l'aide du modèle de Künzel sous le logiciel COMSOL ont été réalisés. Ces murs sont soumis à deux types de sollicitation : statiques et cycliques. Pour valider notre modèle de Künzel, nous avons choisi l'exemple de transfert couplé hygrothermique à travers une paroi en béton de chanvre (HLC) de 30 cm d'épaisseur et soumise à des sollicitations statiques. Pour cet exemple, [Driss \(2008\)](#) a réalisé des essais de couplages expérimentaux ainsi qu'une modélisation numérique. Comme résultats, il a déterminé l'évolution de l'humidité relative et la température en fonction du temps en différentes positions (le long de l'épaisseur de la paroi). Le but de cette partie est de partir des données de [Driss \(2008\)](#) sur son matériau (HLC) et de refaire sa modélisation numérique à l'aide du logiciel Comsol afin de mettre en évidence le bon fonctionnement de notre modèle numérique.

La **Figure V. 3** montre la configuration expérimentale utilisée pour l'étude du couplage hygrothermique dans la paroi de chanvre HLC30, dont les propriétés sont présentées dans le **Tableau V. 2**.

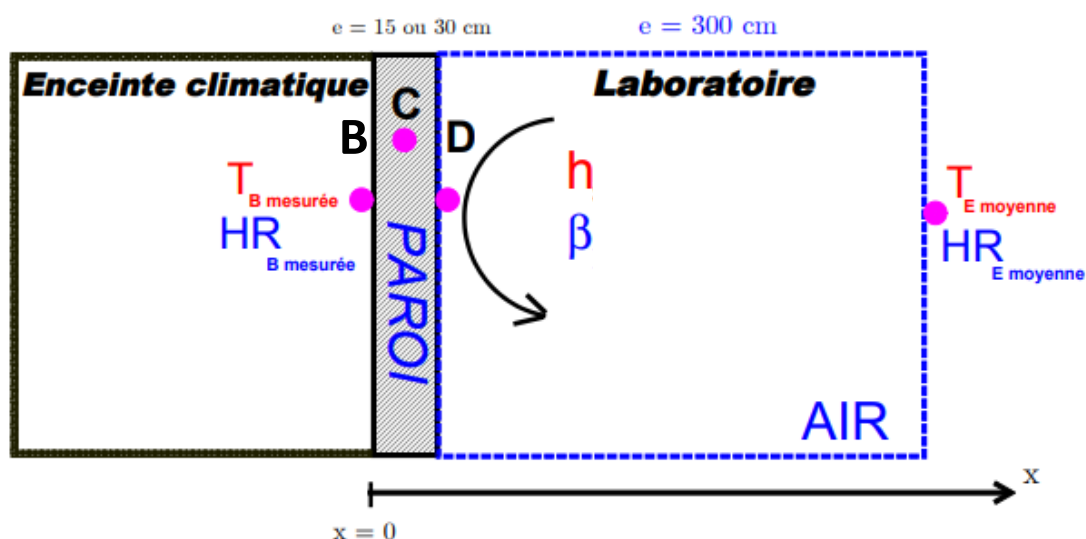


Figure V. 3 : Essai expérimental de transferts couplés hygrothermiques à travers une paroi en béton de chanvre HLC 30 cm [Driss, 2008]

Tableau V. 2 : Propriétés du béton de chanvre [Driss, 2008]

Propriétés	λ (W/m.K)	ρ_0 (kg/m ³)	c (J/(kg.K))	a (m ² /s)
	0.088	329.7	1122.3	2.38×10^{-7}
HLC (30 cm)	δ_v (kg/(m.s.Pa))	D_w (m ² /s)	h (W/(m ² .K))	β (s/m)
	5×10^{-10}	4×10^{-7}	15	5×10^{-8}

Sous Comsol Multiphysics, la paroi a été représentée par un segment [BD] de 30 cm de longueur (modèle 1D). En position B, on a appliqué des conditions hygrothermiques de type Dirichlet qui sont T_B mesurée et HR_B mesurée mesurées expérimentalement. En position D, on a appliqué deux flux convectifs de chaleur et de masse qui sont respectivement $\phi = h \times (T_D - T)$ et $g = \beta \times (P_{sat}(T_D) \times HR_D - P_{sat}(T) \times HR)$. Les Figures V. 4 et V. 5 présentent les profils de température et d'humidité relative aux points B et D qui sont mesurés à l'aide de sondes hygrothermiques.

Comme résultats, Driss (2008) a déterminé la variation de la température (T) et de l'humidité relative (HR) à l'intérieur du mur (au point C) numériquement et expérimentalement.

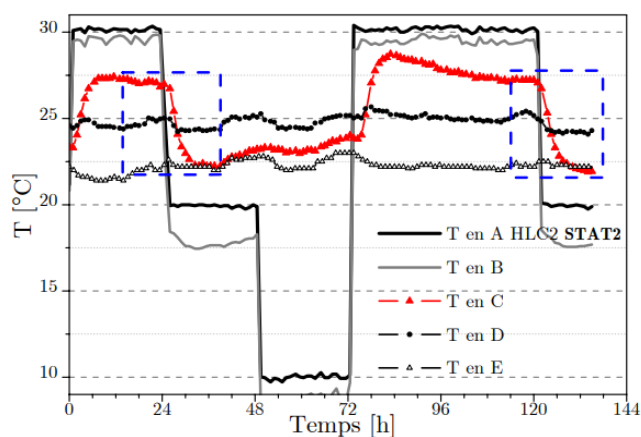


Figure V. 4 : Températures aux points B et D mesurées expérimentalement pendant 144 heures [Driss, 2008]

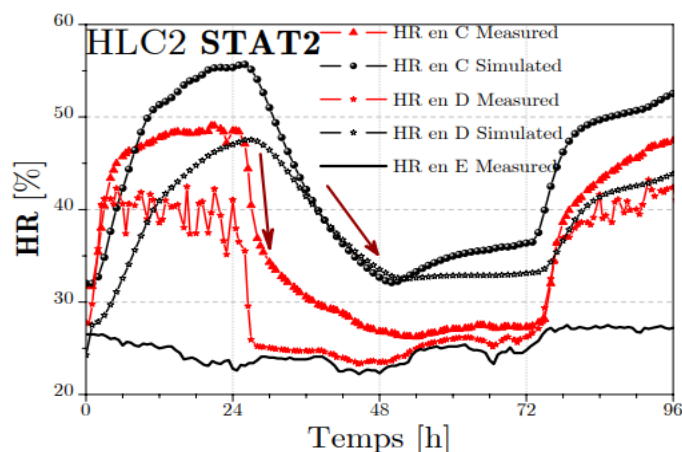


Figure V. 5 : Humidité relative mesurée expérimentalement au point D pendant 96 heures [Driss, 2008]

Dans notre cas, nous avons comparé les résultats obtenus à l'aide du modèle de Künzel aux résultats numériques de Driss (2008). Les Figures V. 6 et V. 7 présentent une superposition des profils de température et d'humidité de cette étude, superposés à ceux de Driss (2008). On observe une tendance similaire des courbes de T et HR durant 48h et 96h respectivement. Les courbes sont généralement confondues sauf sur quelques zones où un écart maximal de 10%

est observé. La comparaison est satisfaisante et confirme de nouveau la bonne réponse hygrothermique du modèle et la résolution numérique fiable à l'aide du logiciel COMSOL.

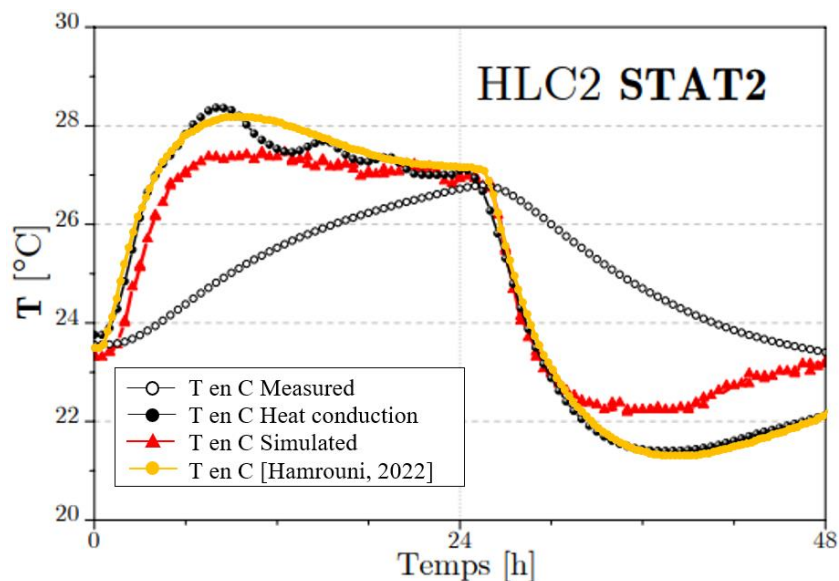


Figure V. 6 : Comparaison des profils numériques de variation de la température au point C pendant 48 heures

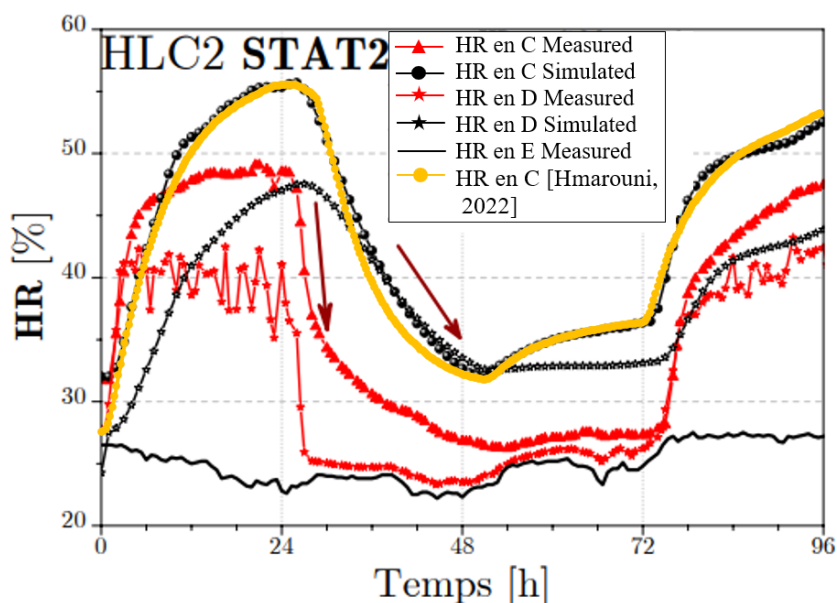


Figure V. 7 : Comparaison des profils numériques de variation d'humidité relative au point C pendant 96 heures

V.4 Prédiction des transferts hygrothermiques à travers des échantillons à base de terre crue

Ce paragraphe est consacré à la modélisation numérique des résultats expérimentaux des transferts couplés de chaleur et d'humidité à travers des échantillons de limon GO, présentés

dans le chapitre IV. Comme les échantillons de limon utilisés dans les essais expérimentaux ont 50 mm d'épaisseur, on les a considérés dans les simulations dans Comsol Multiphysics par un segment [BD] de 50 mm de longueur (modèle 1D). On suppose que le matériau est homogène et les conditions aux limites imposées sur les surfaces inférieure et supérieure vont être imposées sur les deux extrémités du segment [BD] (**Figure V. 8**).

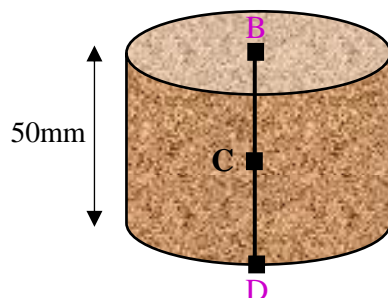


Figure V. 8 : Modèle 1D équivalent

Les différents paramètres du modèle de Kunzel représentant les propriétés hygrothermiques du limon GO déterminées expérimentalement dans le chapitre III, sont résumées dans le **Tableau V. 3**.

Tableau V. 3 : Propriétés du limon GO pour le modèle de Künzel

Paramètres	λ	c	δ_v	D_ϕ	L_v
	W/(m. °C)	J/(m ³ . °C)	kg/(m. s. Pa)	kg/ (m. s)	J/kg
Valeurs	0.76	1.4×10^6	2.7×10^{-11}	$P_{\text{sat}}(T) \times \delta_v$	2.5×10^6

- Coefficient de diffusion d'eau liquide $D_\phi = P_{\text{sat}}(T) \times \delta_v$
avec $P_{\text{sat}} = e^{(23.5771 - \frac{4042.5}{T-37.58})}$

- La dérivée de l'isotherme d'adsorption $\xi = \frac{\partial w}{\partial HR}$ [kg/m³] a été déterminée comme suit : La courbe isotherme d'adsorption expérimentale présentée dans le chapitre III, **Figure III. 15**, a été modélisée à l'aide de la fonction mathématique $w = f(HR)$ ci-dessous, dont les paramètres sont résumés dans le **Tableau V. 4** :

$$w = a \times e^{(b \times HR + c)} + d \times e^{(e \times HR + f)}$$

Tableau V. 4 : Constantes de l'équation d'isotherme d'adsorption

Constantes	a	B	c	d	e	f
Valeurs	200	3.3	-3.9	47.6	200.51	-198.42

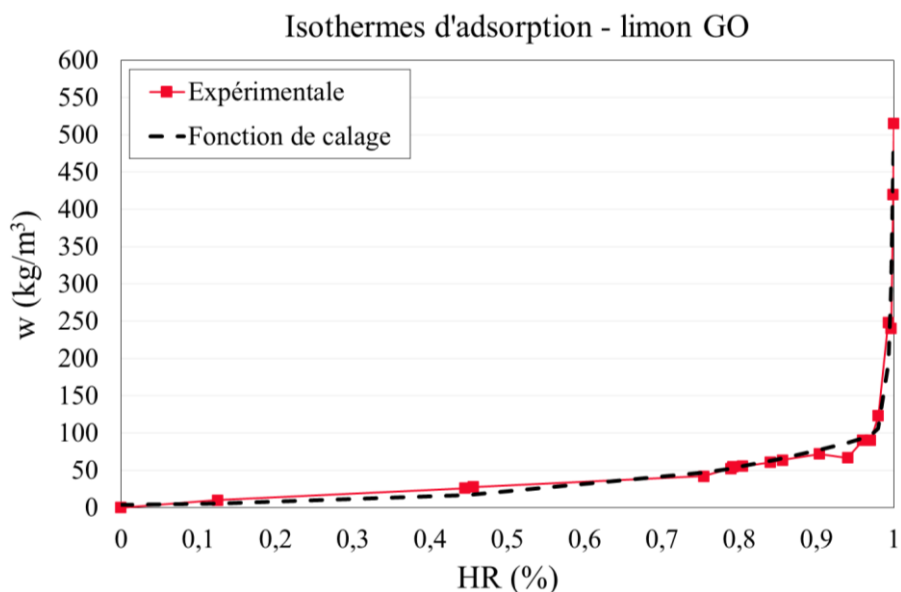


Figure V. 9 : Calage de la fonction mathématique sur la courbe d’isotherme d’adsorption expérimentale

- Conditions aux limites de T et HR aux deux interfaces de l’échantillon

Afin d’évaluer l’effet du type de conditions aux limites sur les résultats des transferts couplés hygrothermiques, deux configurations pour la modélisation numérique ont été envisagées : la première avec des conditions en température et humidité relative de type Dirichlet appliquées aux surfaces supérieure et inférieure de l’échantillon, et la deuxième avec des conditions de type Dirichlet au niveau de la surface inférieure et de type Flux/source (flux convectif) au niveau de la surface supérieure. En effet, vu le grand volume de la boîte froide ainsi que l’existence d’un gradient de température entre la surface supérieure de l’échantillon (surface froide, T_D) et l’intérieur de la boîte froide, on suppose que des courants de convection naturelle peuvent avoir lieu durant les essais de transferts couplés hygrothermiques. Les deux configurations se présentent comme suit :

Configuration n°1 : On applique comme conditions aux limites au modèle numérique, les cinétiques de température T et d’humidité HR mesurées à l’aide des capteurs SHT40 aux points B et D c’est-à-dire aux surfaces chaude et froide de l’échantillon respectivement.

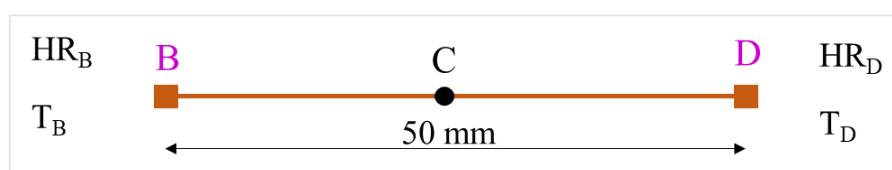


Figure V. 10 : Configuration numérique n°1

Configuration n°2 : On applique en position B des conditions hygrothermiques de type Dirichlet qui sont T_B mesurée et HR_B mesurée mesurées expérimentalement et en position D, on applique deux flux convectifs de chaleur et d'humidité qui sont respectivement $\phi = h \times (T_D - T)$ et $g = \beta \times (P_{sat}(T_D) \times HR_D - P_{sat}(T) \times HR)$. Les coefficients d'échange thermique et hygrométrique h et β utilisés pour cette partie sont considérés les mêmes que ceux utilisés par Driss (2008) (**Tableau V. 7**). En effet, les conditions ambiantes contrôlées en HR et T d'une salle expérimentale de laboratoire sont similaires.

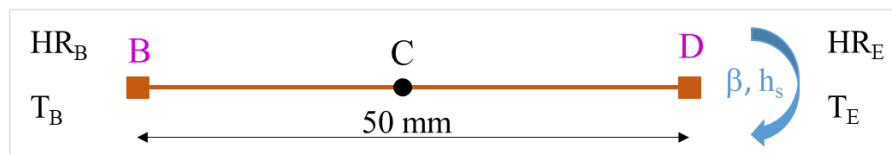


Figure V. 11 : Configuration numérique n°2

V. 4. 1 Modélisation de l'essai expérimental N°1

Dans ce paragraphe nous présentons la modélisation de l'essai n°1 détaillé dans le chapitre IV, paragraphe IV. 4, en considérant des conditions aux limites selon les deux configurations détaillées ci-dessus.

V. 4. 1. 1 Configuration n°1

La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques va porter sur les profils de T et HR à l'intérieur de l'échantillon (c'est-à-dire au point C) puisque ceux mesurés aux surfaces de l'échantillon de limon GO sont imposés comme conditions aux limites pour cette configuration. Les deux **Figures V. 12** et **V. 13** présentent la superposition des résultats en HR et T respectivement mesurées et simulées. D'après la **Figure V. 12**, on remarque que l'écart d'humidité entre $HR_{mesurée}$ et $HR_{simulée}$ est plus important sur la période du régime transitoire (de 0 à 4 jours) que sur celle du régime permanent (de 4 à 9 jours). L'écart maximal est de l'ordre de 18% entre les deux valeurs d'humidité pendant le régime transitoire. Par contre, l'écart au début du régime permanent est de l'ordre 10% et il diminue en fonction du temps pour atteindre 4% environ. Sur la **Figure V. 13**, un bon accord entre $T_{mesurée}$ et $T_{simulée}$ est observé, dont l'écart maximal durant toute la durée de l'essai est de l'ordre de 2°C. On peut conclure que la comparaison des résultats expérimentaux et numériques des cinétiques de HR et T est satisfaisante, en particulier en régime permanent.

Ceci met en évidence la capacité du modèle numérique à simuler des transferts hygrothermiques couplés en comparaison avec des propriétés physiques et hygrothermiques déterminées expérimentalement.

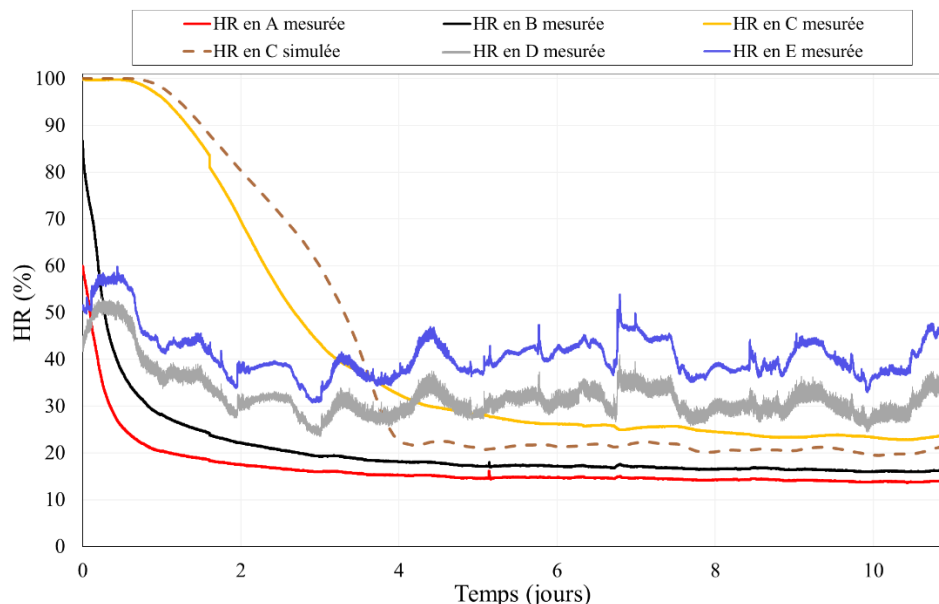


Figure V. 12 : Comparaison de l'humidité relative à l'intérieur de l'échantillon (point C) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°1 – Essai n°1)

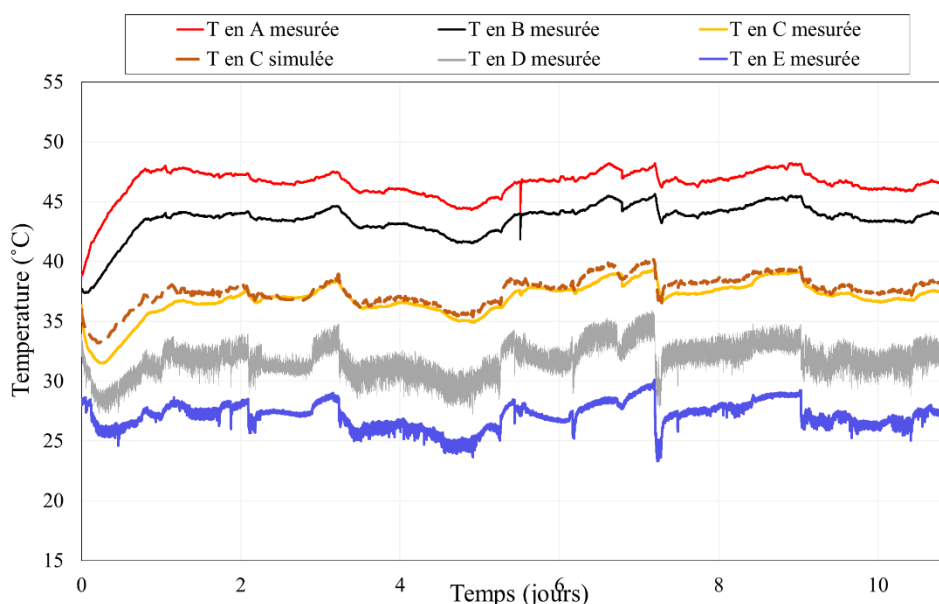


Figure V. 13 : Comparaison de la température à l'intérieur de l'échantillon (point C) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°1 – Essai n°1)

Les **Figures V. 14** et **V. 15** montrent les profils instantanés de T et HR le long de l'épaisseur de l'échantillon. Concernant HR, on observe que les profils sont non linéaires entre 0 et 3 jours. Entre 5 et 10 jours on observe des profils linéaires non perturbés et donc c'est l'équilibre hygrométrique qui est atteint à l'intérieur du matériau. Concernant la température, on remarque

un profil instationnaire au premier jour de l'essai (jour 0) et à partir de laquelle, l'évolution de T est linéaire et l'équilibre thermique est établi.

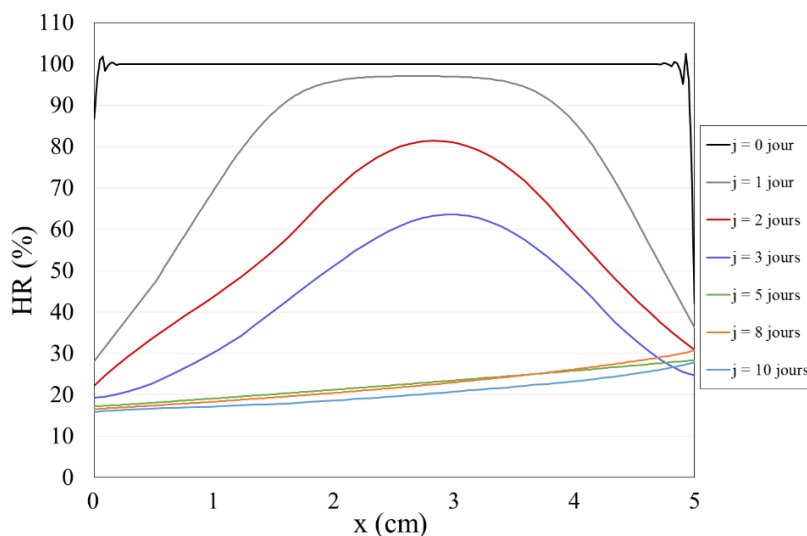


Figure V. 14 : Profils instantanés de HR le long de l'épaisseur de l'échantillon (Configuration n°1 – Essai n°1)

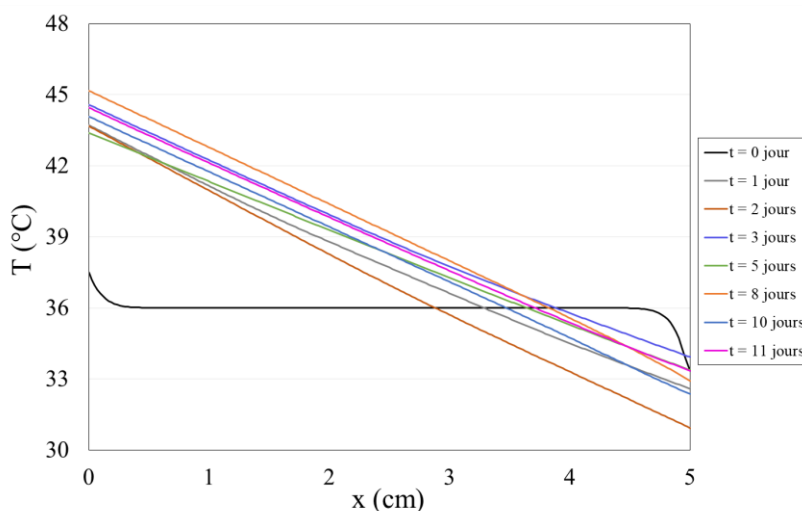


Figure V. 15 : Profils instantanés de T le long de l'épaisseur de l'échantillon (Configuration n°1 – Essai n°1)

V. 4. 1. 2 Configuration n°2

Dans cette configuration, et comme nous avons appliqué les profils de T et HR au point B et des flux convectifs de chaleur et d'humidité au point D, la comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques va être porter sur les profils de T et HR aux points C et D. Les résultats sont illustrés dans les **Figures V. 16** et **V. 17**. On remarque qu'après l'application des flux convectifs au point D au lieu des cinétiques de T et HR, l'écart entre $HR_{\text{mesurée}}$ et $HR_{\text{simulée}}$ pendant le régime instationnaire diminue de 18% à 12% par rapport à celui de la configuration n°1. Par contre, durant le régime permanent, on n'observe pas de changement au niveau du

profil. Au point D, le profil de $HR_{simulée}$ est confondu avec celui de $HR_{mesurée}$. En analysant la **Figure V. 17** qui concerne les profils de T, on ne remarque pas de changement au niveau du point C par rapport à la configuration n°1. De plus, les profils de $T_{mesurée}$ et $T_{simulée}$ au point D sont confondus. Pour conclure, l'application des flux convectifs de chaleur et d'humidité au point D a conduit à la diminution de l'écart entre les résultats simulés à l'aide du modèle de Künzel et ceux mesurés expérimentalement. Ceci peut être dû au fait que les conditions aux limites en flux décrivant mieux les conditions de l'expérience pour des mesures locales de HR et T en D.

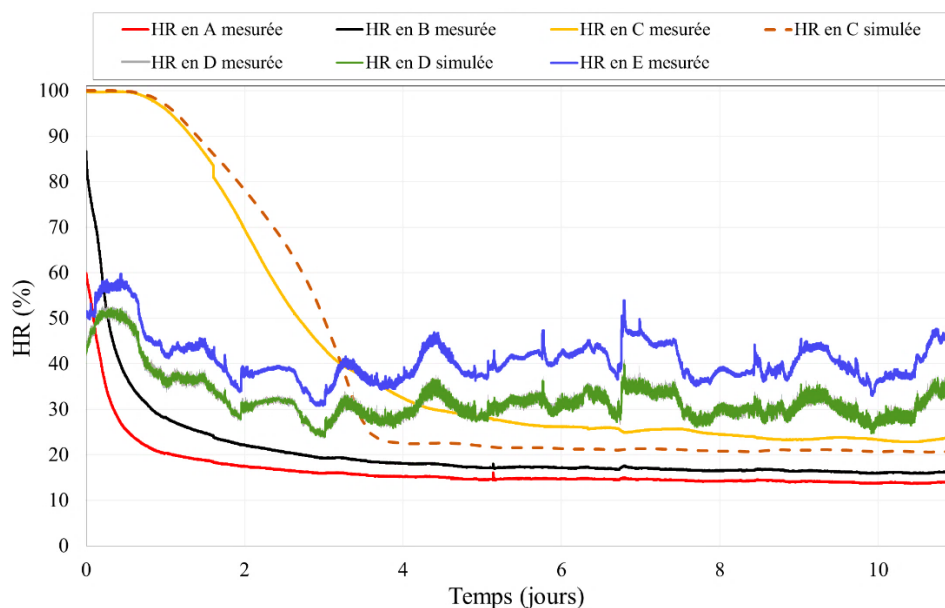


Figure V. 16 : Comparaison de l'humidité relative (aux points C et D) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°2 – Modèle n°1)

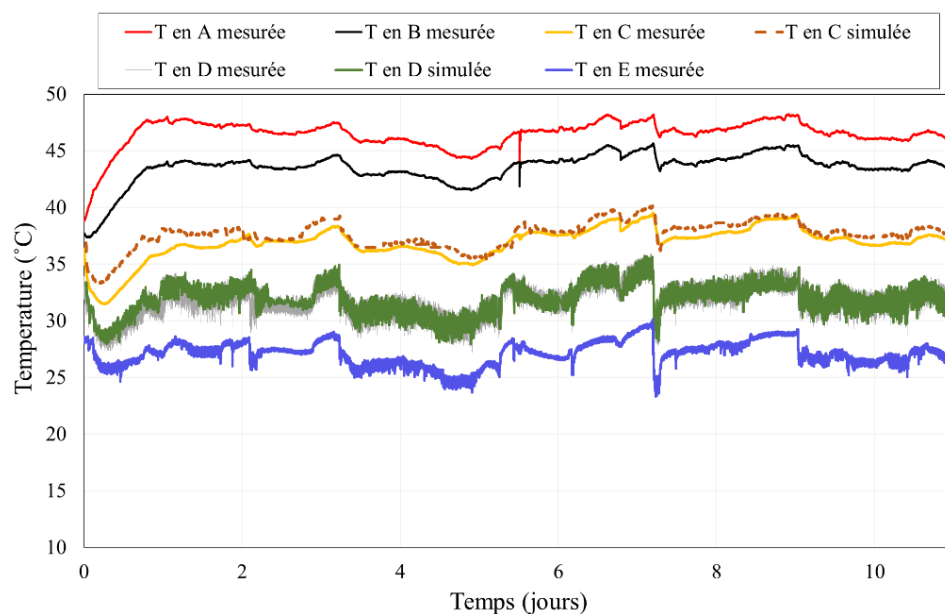


Figure V. 17 : Comparaison de la température (aux points C et D) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°2 – Modèle n°1)

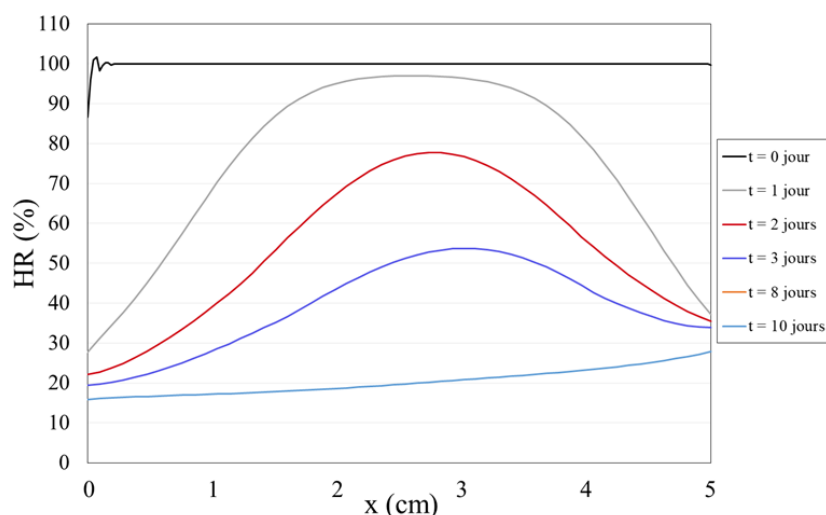


Figure V. 18 : Profils instantanés de HR le long de l'épaisseur de l'échantillon (Configuration n°2 – Modèle n°1)

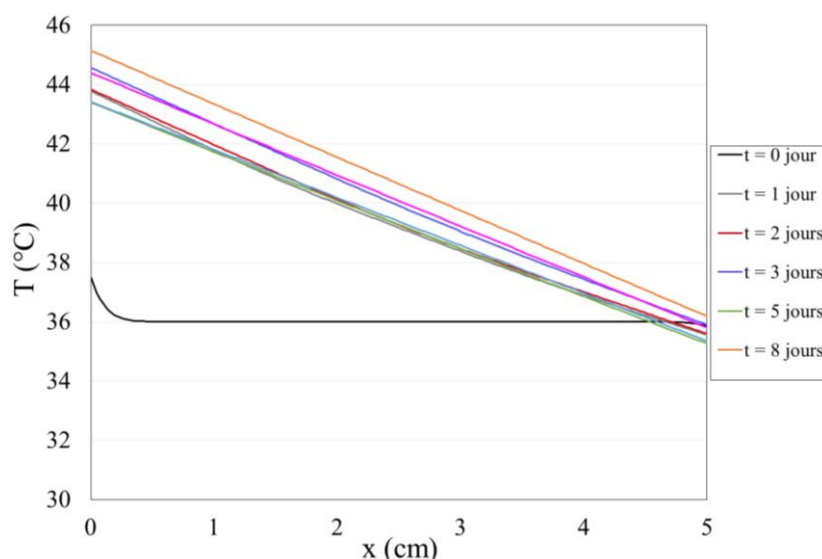


Figure V. 19 : Profils instantanés de T le long de l'épaisseur de l'échantillon (Configuration n°2 – Modèle n°1)

V. 4. 2 Modélisation de l'essai expérimental N°2

Cette partie fait l'objet de la modélisation numérique de l'essai de couplage hygrothermique n°2 détaillé dans le chapitre IV, paragraphe IV. 4. Seule la configuration N°1 de conditions aux limites est modélisée.

V. 4. 2. 1 Configuration n°1

Après une analyse des résultats de la modélisation numérique de l'essai n°2 de couplage hygrothermique et leur comparaison avec les résultats expérimentaux (voir **Figures V. 20** et **V. 21**), on observe des profils de T et HR au point C ayant des allures similaires. Pour les

profils de HR, on trouve un écart remarquable entre 0 et 3 jours et demi dont l'erreur maximale est de l'ordre de 20%. Au-delà de ce domaine, ce dernier est de l'ordre de 5%. En comparant les profils de T expérimentaux et numériques au point C, on observe un écart qui ne dépasse pas 2°C sur toute la période de l'essai ce qui correspond à une erreur maximale de l'ordre de 2%.

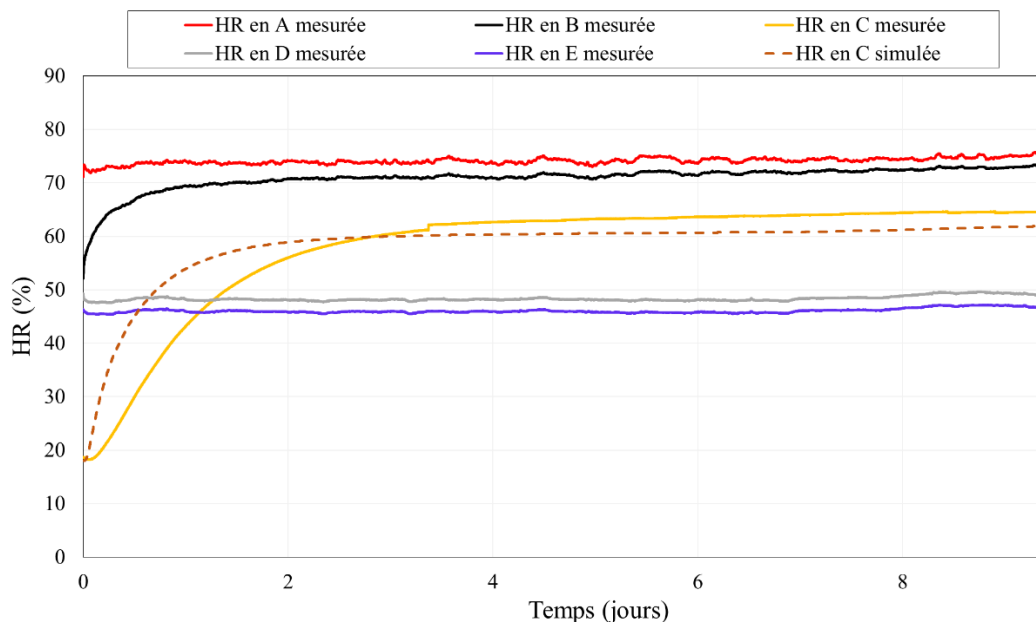


Figure V. 20 : Comparaison de l'humidité relative à l'intérieur de l'échantillon (point C) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°1 - Modèle n°2)

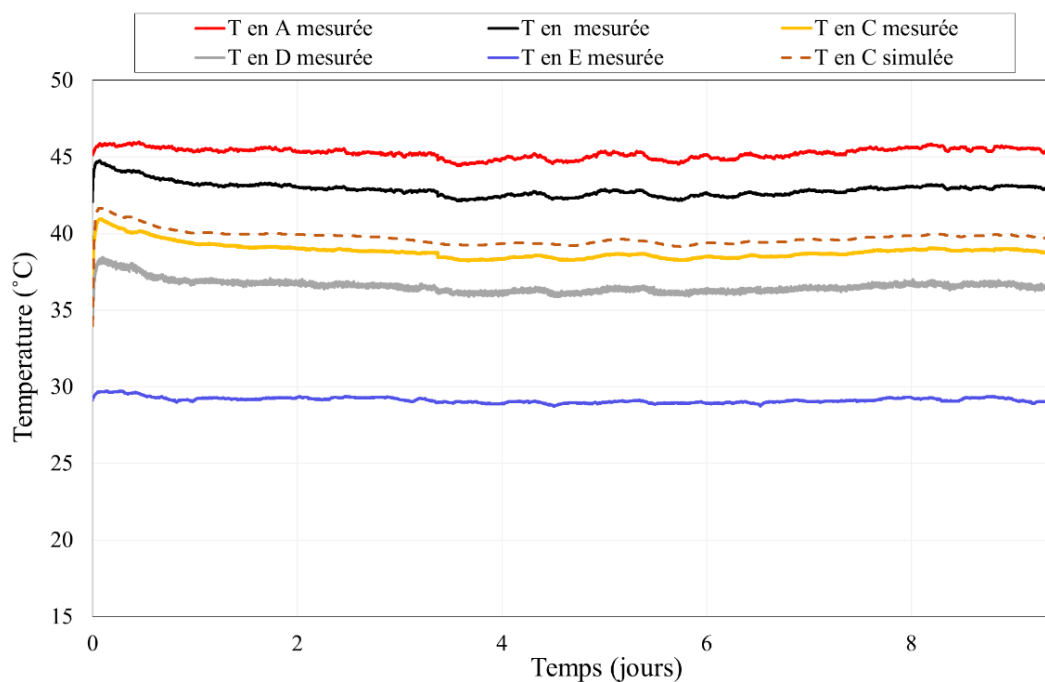


Figure V. 21 : Comparaison de température à l'intérieur de l'échantillon (point C) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°1 - Modèle n°2)

V. 4. 1. 2 Configuration n°2

Pour cette configuration, les cinétiques de HR et T en fonction du temps mesurées expérimentalement sont implémentées dans le modèle et appliquées au point B. En revanche, de l'autre côté de l'échantillon (au point D), il s'agit d'un flux convectif fonction de T et HR mesurées expérimentalement dans la boîte froide. Les **Figures V. 22** et **V. 23** montrent une comparaison entre les profils de T et HR mesurés et simulés aux points C et D. Au point C, on remarque que l'écart entre l'humidité relative expérimentale et numérique à partir de 4 jours est de l'ordre de 2,6%. Par contre, entre 0 et 4 jours il est plus important et est de l'ordre de 40%. En outre, pour les profils de T mesuré et simulé, on remarque un écart de 1°C sur toute la durée de l'essai qui correspond à 4%. Au point D, pour HR, un écart maximal de 2% sur toute la durée de l'essai a été observée et pour T l'écart ne dépasse pas 1,5%. La même conclusion que celle du modèle n°1 peut être tirée ; l'application des flux convectifs de chaleur et d'humidité au point D a permis de minimiser l'écart entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux. Ceci justifie encore une fois le fait que ces flux représentent mieux les conditions aux limites.

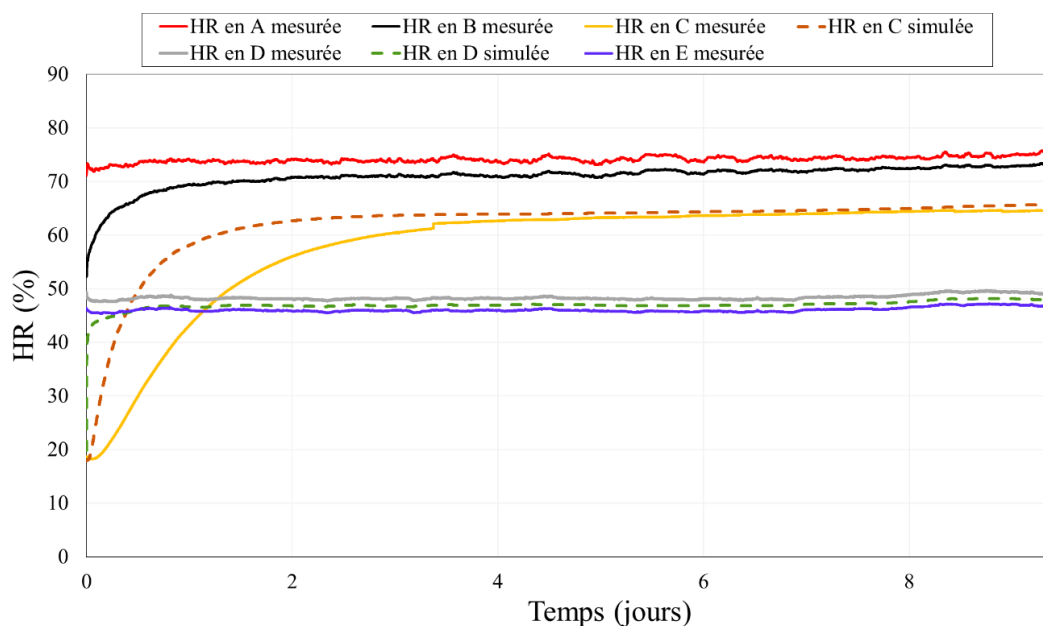


Figure V. 22 : Comparaison de l'humidité relative (aux points C et D) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°2 – Modèle n°2)

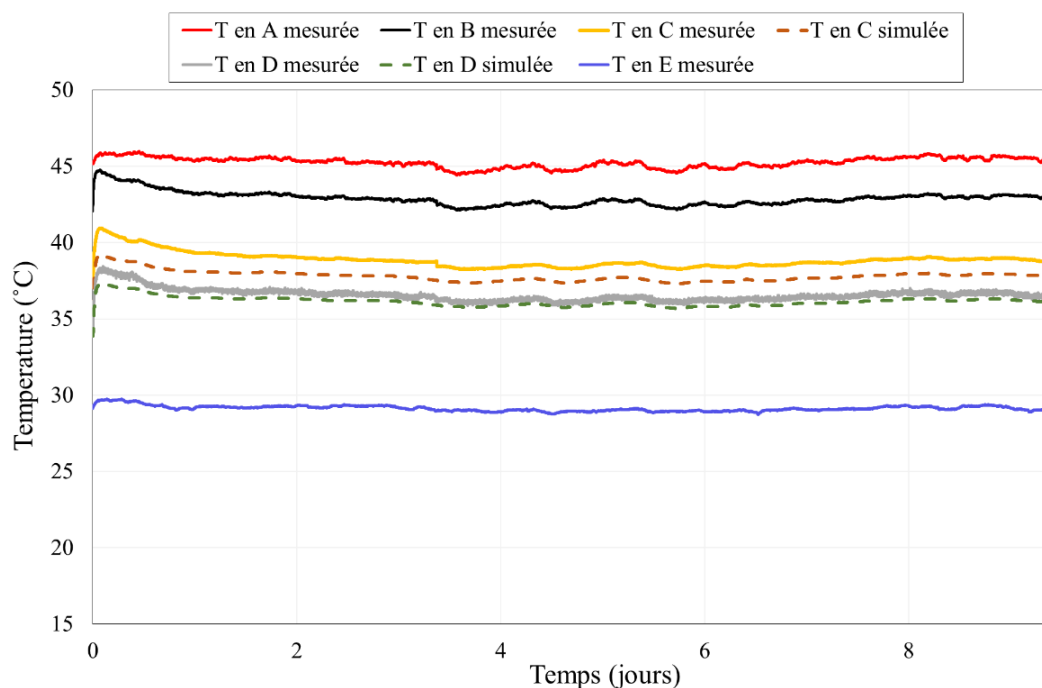


Figure V. 23 : Comparaison de la température (aux points C et D) simulée et mesurée expérimentalement (Configuration n°2 – Modèle n°2)

V.5 Etude comparative du comportement hygrothermique du limon GO compacté et du béton de ciment

Le but de cette partie est de modéliser le comportement couplé hygrothermique du béton de ciment afin de le comparer à celui du limon GO. Les caractéristiques du béton de ciment sont résumées dans le **Tableau V. 5** et la **Figure V. 24**. Le comportement du limon GO correspond à celui de l'essai N°1, avec les conditions aux limites correspondant à la configuration 1, décrite dans le paragraphe V.4.1.

Tableau V. 5 : Caractéristiques du béton de ciment [Hibouche, 2013]

Matériau	λ W/(m. °C)	C J/(kg. K)	δ_v kg/(m. s. Pa)	ρ kg/ m3	D_w m ² /s
E/C = 05	1.6	850	1.11×10^{-12}	2300	6×10^{-10}

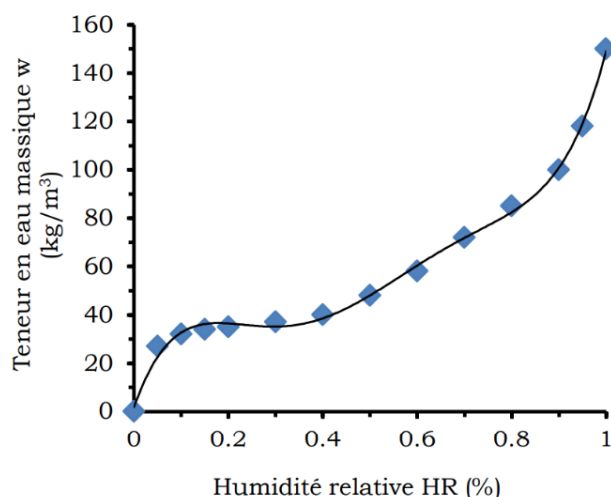


Figure V. 24 : Isotherme d’adsorption du béton de ciment (base de données du code WUFI) [Hibouche, 2013]

Les résultats de cette modélisation sont illustrés dans les deux **Figures V. 25** et **V. 26**. Concernant le transfert de vapeur (**Figure V. 25**), on remarque que dans le béton de ciment le régime permanent n’est toujours pas atteint après 11 jours, alors que pour le limon, il s’est établi en 4 jours. Ceci peut être expliqué par la faible perméabilité à la vapeur d’eau du béton de ciment. Par conséquent, dans le cas du béton, le temps exigé pour atteindre le régime permanent est beaucoup plus important. De même, on observe sur la **Figure V. 26** un déphasage net entre les profils de T des deux matériaux. En effet, l’évolution de la température dans le béton est en avance de phase par rapport au limon. Ceci est dû au fait que la conductivité thermique du béton est plus importante (ici, deux fois plus importante) que celle du limon.

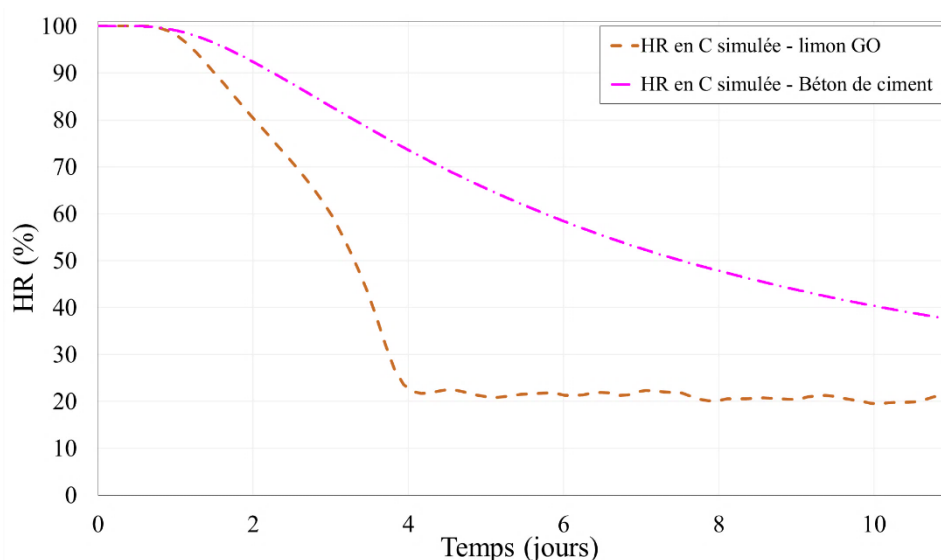


Figure V. 25 : Comparaison des profils de HR du limon GO et du béton de ciment

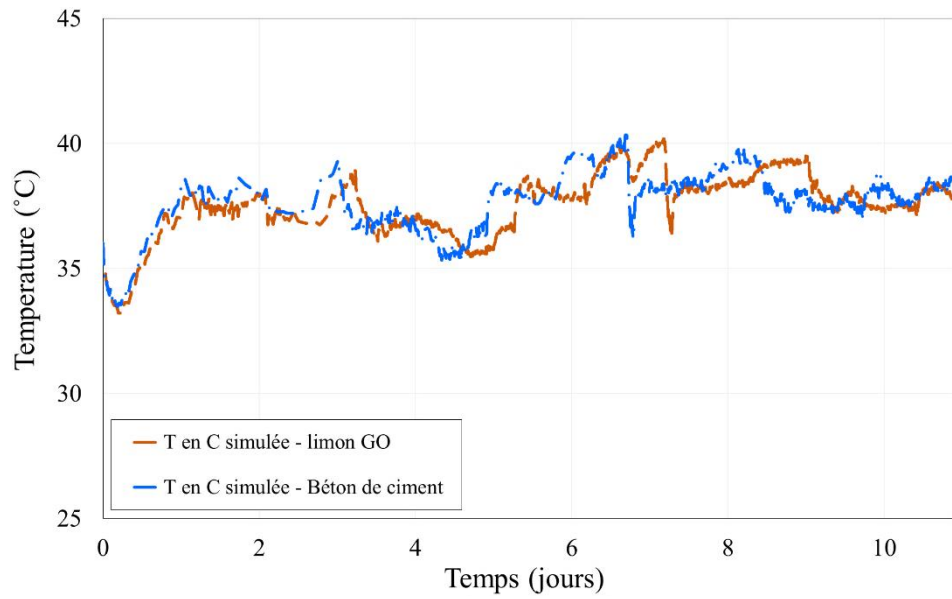


Figure V. 26 : Comparaison des profils de T du limon GO et du béton de ciment

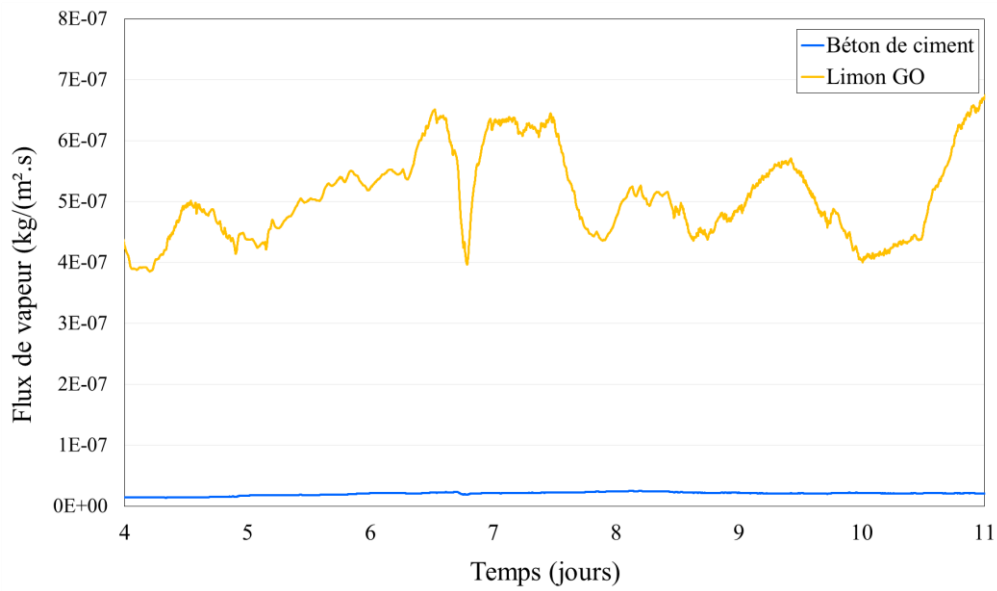


Figure V. 27 : Comparaison de l'évolution des flux de vapeur d'eau du limon GO et du béton de ciment en fonction du temps

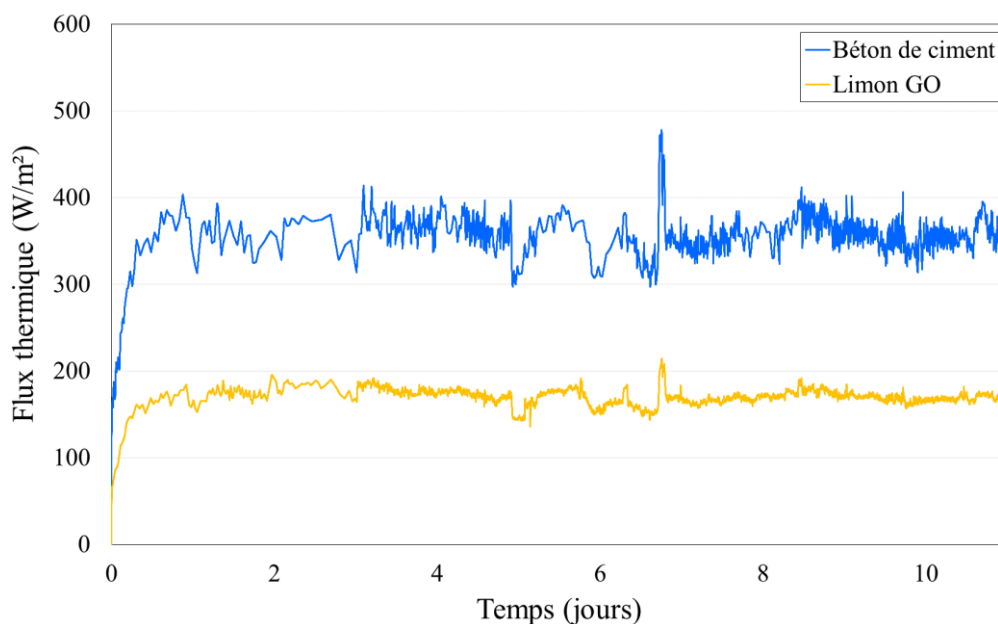


Figure V. 28 : Comparaison de l'évolution des flux de chaleur du limon GO et du béton de ciment en fonction du temps

V.6 Conclusion

Ce chapitre a porté sur la modélisation numérique des transferts couplés hygrothermiques à travers le limon GO et leur comparaison aux résultats expérimentaux. Les premières simulations numériques ont permis de vérifier la bonne réponse du modèle de Künzel. Par la suite, et en partant des propriétés physiques et hygrothermiques du limon GO, le modèle de Künzel a permis de reproduire de manière satisfaisante les résultats expérimentaux de couplage hygrothermique présentés dans le chapitre IV, surtout quand le régime stationnaire est atteint. Ceci a mis en évidence la capacité du modèle numérique à simuler ces transferts hygrothermiques couplés à partir des propriétés physiques et hygrothermiques déterminées expérimentalement.

En outre, une comparaison du comportement hygrothermique du limon avec le béton de ciment a mis en évidence son caractère plus isolant vis-à-vis des transferts thermiques, et plus respirant vis-à-vis des transferts hygrométriques. Ce constat fait de la construction en terre crue une alternative avantageuse aux matériaux de construction classiques en termes de confort hygrothermique. Certes le côté performance mécanique est aussi important. Nous renvoyons le lecteur à quelques références supplémentaires pour avoir plus de détails sur les performances de la terre crue de point de vue mécanique [Hibouche, 2013 ; Bruno, 2016 ; Champiré, 2017 ;

Piattoni, 2011]. Parmi ces performances, on peut citer le module d'Young, la résistance à la compression, la résistance à la traction simple et la résistance à la traction par flexion trois points. Ce sont des performances encourageantes d'après leurs résultats pour choisir la terre crue comme matériau de construction.

Pour conclure, ce chapitre a permis de valider les résultats expérimentaux obtenus dans le chapitre IV, mais aussi de mettre en valeur un modèle numérique qui répond bien aux transferts hygrothermiques et qui donne des résultats proches de ceux expérimentaux. Quatre modélisations avec différentes conditions aux limites ont été effectuées et leurs résultats sont tous satisfaisants. Ce qui signifie que le modèle numérique peut servir pour obtenir des résultats de couplage hygrothermique en cas de manque d'essais expérimentaux.

Chapitre VI

*Propriétés hygrothermiques effectives :
Approche micro-macro*

VI. 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'application de la théorie de l'homogénéisation périodique aux transferts hygrothermiques dans la terre crue renforcée avec des fibres de lin. Cette théorie, comme cela a été expliqué par [Auriault \(1991\)](#), est l'une des méthodes qui s'applique aux problèmes physiques régis par des équations aux dérivées partielles. Cette méthode est basée sur une approche de séparation d'échelles, le développement asymptotique et l'analyse des nombres sans dimensions qui gouvernent le processus physique. L'objectif de cette méthode est de dériver un modèle macroscopique homogène, les paramètres effectifs et les équations macroscopiques à partir d'une description microscopique des phénomènes de transfert. Le modèle traité dans ce chapitre concerne la terre crue renforcée avec des fagots de fibres de lin. Ce modèle a été choisi suite aux résultats expérimentaux de transfert de vapeur d'eau présentés dans le chapitre III et qui ont montré que la disposition des fibres en fagots longitudinaux est la disposition la plus favorable pour la diffusion de vapeur d'eau. Ceci est dû au fait que le transfert de vapeur se fait dans le même sens que celui de la disposition des fagots de fibres, contrairement aux dispositions aléatoire et transversale.

On procède à une homogénéisation des équations de transferts hygrothermiques écrites à l'échelle microscopique (à l'échelle du fagot de fibres et de la matrice sol), afin d'obtenir des modèles homogénéisés valables à l'échelle du matériau composite terre-fibres de lin. En effet, les étapes de cette approche peuvent être résumées comme suit :

- Ecriture des équations de transport à l'échelle microscopique (au niveau de la matrice solide ainsi que les fagots de fibres).
- Adimensionnalisation des variables du problème et développement asymptotique des différentes variables en puissances du paramètre de séparation d'échelles ε . La méthode d'homogénéisation ne peut être applicable que lorsqu'on connaît bien les propriétés microscopiques hygrothermiques des deux composants du matériau renforcé (terre compactée comme matrice solide et fagots de fibres) ainsi que l'existence d'une séparation d'échelles ε qui est le rapport entre deux grandeurs microscopique et macroscopique.
- Passage micro-macro en cherchant à moyenniser les quantités à intégrer sur le volume élémentaire représentatif **VER**.

Le chapitre est structuré en trois parties. Chaque partie est consacrée à l'un des trois phénomènes physiques considérés séparément, c'est-à-dire sans couplage : transfert de vapeur d'eau, transfert d'eau liquide et transfert de chaleur.

VI. 2 Transfert de vapeur d'eau

Nous nous focalisons sur l'obtention d'un modèle de transfert de vapeur homogénéisé macroscopique à partir des équations de transport écrites à l'échelle microscopique. La première étape consiste à appliquer l'homogénéisation dans le volume élémentaire représentatif (VER, à l'échelle microscopique) en utilisant les équations de transport de la vapeur d'eau, et la deuxième étape permet de généraliser ce concept à l'échelle macroscopique. Les hétérogénéités sont imbriquées et continues dans la matrice de terre crue, ce sont des fagots de fibres de lin longitudinaux insérés dans la terre crue.

VI. 2. 1 Hypothèses du problème

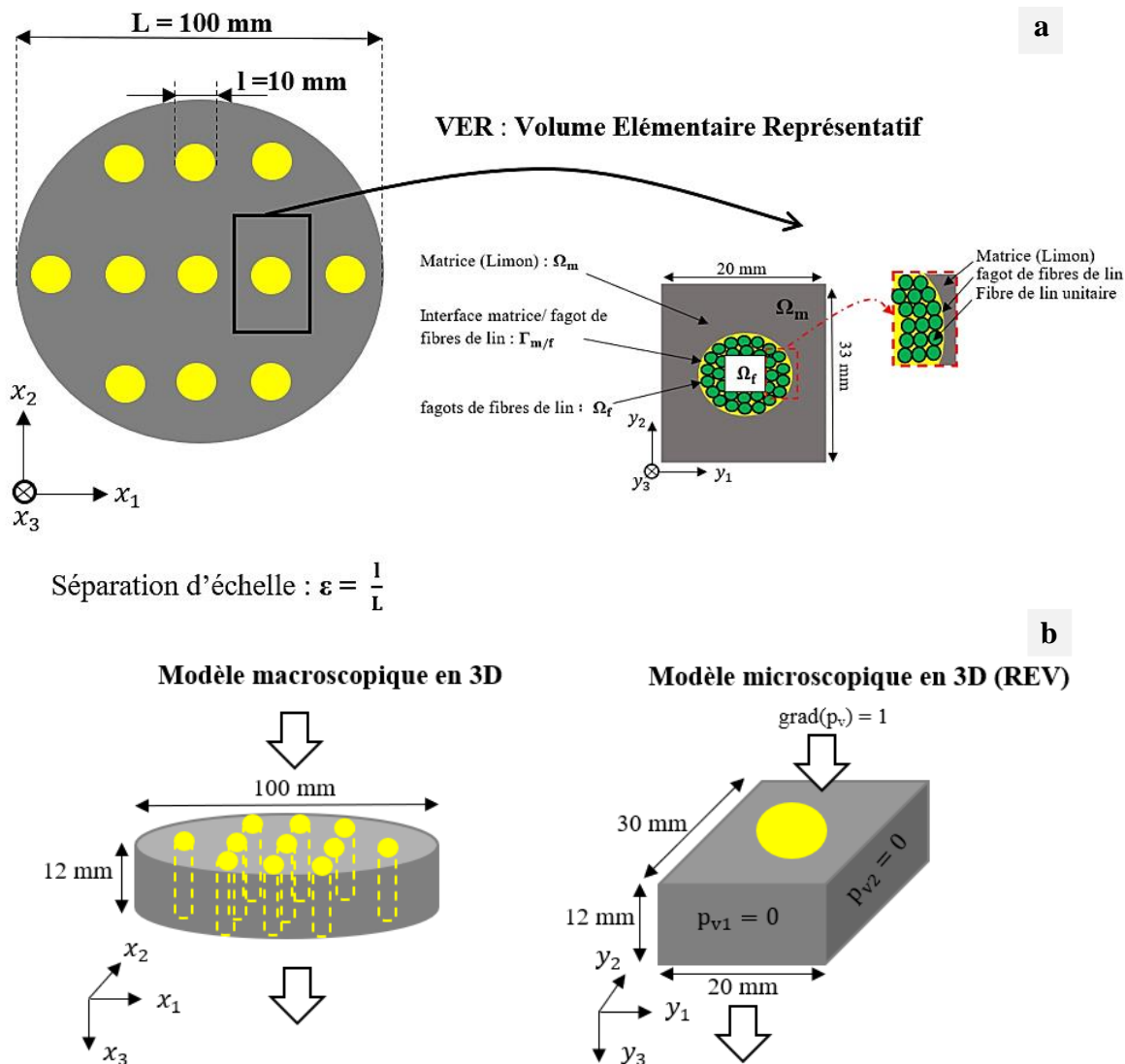
Le modèle représente un milieu poreux composé de deux matériaux imbriqués et continus (la terre crue comme matrice solide, et des fagots de fibres de lin comme inclusions) (**Figure VI. 1**). La théorie d'homogénéisation a été développée sur la base des hypothèses suivantes :

- (1) ce matériau composite (hétérogène) a un volume élémentaire représentatif (VER) périodique noté Ω ,
- (2) il est composé de deux sous-domaines : les fagots de fibres (Ω_f) qui sont plus conducteurs à la vapeur d'eau que la matrice terre (Ω_m). On note $\Gamma_{m/f}$ l'interface entre la matrice et les fagots de fibres ;
- (3) il y a une séparation d'échelles $\varepsilon = \frac{l}{L} \ll 1$ entre les deux sous-domaines, où l et L sont respectivement les diamètres du fagot de fibres de lin et de l'échantillon cylindrique,
- (4) la longueur caractéristique correspond au diamètre de l'échantillon et le temps caractéristique correspond au temps de transfert de la vapeur d'eau dans le milieu plus conducteur Ω_f ,
- (5) la matrice terre crue est indéformable,
- (6) le transfert de vapeur d'eau a lieu dans des conditions isothermes,
- (7) les effets de la gravité sont négligeables devant le mode de transfert de vapeur d'eau,

(8) le transfert de la vapeur d'eau dans les milieux poreux partiellement saturés est régi par l'équation de continuité qui est définie par l'équation (VI.1) et est supposée être valable à l'échelle microscopique et l'équation de transport de la vapeur d'eau, supposée de même forme aussi bien à l'échelle micro qu'à l'échelle macro :

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \text{div}(\rho_v V_v) = 0 \quad (\text{VI.1})$$

- ρ_v : densité volumique de vapeur et V_v sa vitesse.



Echelle macroscopique : Echantillon de terre crue renforcé par des fagots de fibres de lin (x₁, x₂, x₃).
 Echelle microscopique : Volume élémentaire représentatif (VER) caractérisé par les axes unidirectionnelles et caractérisé par les axes (y₁, y₂, y₃).

Figure VI. 1 : (a) et (b) sont respectivement le modèle 2D et 3D de la terre renforcée avec des fagots longitudinaux de fibres de lin

La séparation d'échelle ε est le rapport entre la dimension caractéristique macroscopique et le diamètre microscopique de l'hétérogénéité : $\varepsilon = \frac{l}{L} = 0.1$

VI. 2. 2 Equation de transfert de vapeur d'eau

Le transfert de vapeur d'eau dans les milieux poreux partiellement saturés est régi par l'équation de continuité définie comme suit :

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \text{div}(\rho_v V_v) = 0$$

En considérant que le mouvement de vapeur d'eau est le résultat d'une agitation thermique des molécules d'eau et donc d'un processus de diffusion de vapeur, le terme « $\rho_v V_v$ » peut être écrit d'une autre manière :

$$\rho_v V_v = - D_v \text{grad}(\rho_v) \quad (\text{VI.2})$$

D_v : coefficient de diffusion de vapeur d'eau [m^2/s]

D'après la loi des gaz parfaits

$$P V = n R T \quad (\text{VI.3})$$

- P : Pression [Pa]
- $V = \frac{m_v}{\rho_v}$: Volume occupé par La vapeur [m^3]
- m_v : masse de vapeur d'eau [kg]
- $n = \frac{m_v}{M}$: quantité de matière [mol]
- M : masse molaire de vapeur d'eau [kg/mol]
- R : constante des gaz parfaits $R=8.314 \text{ J/K/mol}$
- T : Température [K].

Dans le cas de transfert de vapeur d'eau : $p_v V = n R T$

$$\Leftrightarrow \rho_v V_v = - D_v \text{grad}(\rho_v) = - \frac{D_v M}{R T} \text{grad}(p_v) = - \delta_v \text{grad}(p_v)$$

avec $\delta_v = \frac{D_v M}{R T}$ [kg/ (m. s. Pa)]

D'où l'équation de continuité devient :

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} - \text{div}(\delta_v \text{grad}(p_v)) = 0 \quad (\text{VI.4})$$

Si on considère toujours que la pression de vapeur p_v comme seul moteur de transfert dans l'équation (VI.4), cette dernière devient finalement :

$$\frac{M}{RT} \frac{\partial p_v}{\partial t} - \text{div}(\delta_v \text{grad}(p_v)) = 0 \quad (\text{VI.5})$$

Avec : $\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \frac{\partial \rho_v}{\partial p_v} \frac{\partial p_v}{\partial t} = \frac{M}{RT} \frac{\partial p_v}{\partial t}$

VI. 2. 3 Formulation du problème

Les équations de transfert de vapeur d'eau à l'échelle microscopique, dans chaque sous-domaine (Ω_m et Ω_f définis dans la **Figure VI. 1**), peuvent être écrites comme suit :

$$\frac{M}{RT} \frac{\partial p_v^m}{\partial t} - \text{div}(\delta_v^m \text{grad}(p_v^m)) = 0 \quad \text{dans } \Omega_m \quad (\text{VI.6})$$

$$\frac{M}{RT} \frac{\partial p_v^f}{\partial t} - \text{div}(\delta_v^f \text{grad}(p_v^f)) = 0 \quad \text{dans } \Omega_f \quad (\text{VI.7})$$

Où δ_v^m et δ_v^f sont respectivement les perméabilités à la vapeur d'eau de la matrice (limon GO) et des fagots de fibres.

L'interface matrice/fagot de fibres est considérée comme une surface d'échange. Les conditions à l'interface sont comme suit :

$$p_v^f = p_v^m \quad \text{sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.8})$$

$$(\delta_v^f \text{grad}(p_v^f)) \vec{N} = (\delta_v^m \text{grad}(p_v^m)) \vec{N} \quad \text{sur } \Gamma_{m/f}$$

Avec \vec{N} est un vecteur normal à l'interface $\Gamma_{m/f}$. (VI.9)

VI. 2. 4 Analyse adimensionnelle

Dans cette partie, on s'intéressera à l'adimensionnalisation des paramètres du problème. Les paramètres adimensionnels sont définis comme suit :

$$p_v^* = \frac{p_v}{p_v^c}, t^* = \frac{t}{t^c}, \delta_v^* = \frac{\delta_v}{\delta_v^c}, y^* = \frac{y}{l_c}, x^* = \frac{x}{L_c} \quad (\text{VI.10})$$

t^c est le temps caractéristique, choisi pour être le temps de transfert de la vapeur d'eau dans les fagots de fibres de lin à l'échelle macroscopique, et défini comme suit :

$$t^c = \frac{M L^2}{R T \delta_v^c} [\text{s}] \quad (\text{VI.11})$$

Les résultats expérimentaux des essais de transfert de vapeur d'eau à travers des fagots de fibres de lin longitudinales et de terre crue compactée indiquent que :

$$\frac{\delta_v^m}{\delta_v^f} = \mathcal{O}(\varepsilon^2) \quad (\text{VI.12})$$

\mathcal{O} notation désigne l'ordre de grandeur qui permet de comparer les paramètres sans dimensions à l'échelle de séparation ε ou ε^n ($n \in \mathbb{Z}$).

En remplaçant ces paramètres dans les équations de transfert (VI.6) et (VI.7), on trouve :

$$\varepsilon^0 \frac{\partial p_v^{m*}}{\partial t^*} - \text{div}^*(\delta_v^{m*} \text{grad}^*(p_v^{m*})) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (\text{VI.13})$$

$$\varepsilon^2 \frac{\partial p_v^{f*}}{\partial t^*} - \text{div}^*(\delta_v^{f*} \text{grad}^*(p_v^{f*})) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (\text{VI.14})$$

Les conditions aux limites sur l'interface matrice solide/fagot $\Gamma_{m/f}$ sont données par :

$$p_v^{f*} = p_v^{m*} \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.15})$$

$$(\delta_v^{f*} \text{grad}(p_v^{f*})) \vec{N} = \varepsilon^2 (\delta_v^{m*} \text{grad}(p_v^{m*})) \vec{N} \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.16})$$

VI. 2. .5 Développement asymptotique

La méthode d'homogénéisation est basée sur l'analyse adimensionnelle et le développement asymptotique en puissances du petit paramètre ε qui permet de ramener le problème de l'échelle locale à l'échelle macroscopique.

$$p_v^{\gamma*}(x, y, t^*) = \varepsilon^0 p_v^{\gamma 0*}(x, y, t^*) + \varepsilon^1 p_v^{\gamma 1*}(x, y, t^*) + \varepsilon^2 p_v^{\gamma 2*}(x, y, t^*) + \dots \quad (\text{VI.17})$$

$$\delta_v^{\gamma*}(x, y, t^*) = \varepsilon^0 \delta_v^{\gamma 0*}(x, y, t^*) + \varepsilon^1 \delta_v^{\gamma 1*}(x, y, t^*) + \varepsilon^2 \delta_v^{\gamma 2*}(x, y, t^*) + \dots \quad (\text{VI.18})$$

où γ signifie « m » ou « f »

$$\text{grad}^* = \frac{\partial}{\partial y} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \quad (\text{VI.19})$$

$$\text{div}^* = \text{div}_y^* + \varepsilon \text{div}_x^* \quad (\text{VI.20})$$

Dans la suite de ce chapitre, grad_x^* et grad_y^* seront noté respectivement $\frac{\partial}{\partial x}$ et $\frac{\partial}{\partial y}$.

Problème P_0 à l'ordre de ε^0

En ne gardant que les termes d'ordre ε^0 , on obtient le problème P_0 défini comme suit :

$$\frac{\partial p_v^{m0*}}{\partial t^*} - \text{div}_y^* (\delta_v^{m0*} \frac{\partial p_v^{m0*}}{\partial y}) = 0 \quad \text{dans } \Omega_m \quad (\text{VI.21})$$

$$\text{div}_y^* (\delta_v^{f0*} \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial y}) = 0 \quad \text{dans } \Omega_f \quad (\text{VI.22})$$

$$(\delta_v^{f0*} \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial y}) \vec{N} = \vec{0} \quad \text{sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.23})$$

Avec \vec{N} et $\vec{0}$ sont respectivement un vecteur normal à l'interface $\Gamma_{m/f}$ et un vecteur nul qui seront notés dans la suite N est 0.

La solution du problème P_0 a été présentée dans les travaux de [Auriault \(1991\)](#) ; [Lewandowaska et al. \(2004\)](#) ; [Szymkiewicz et Burzyński \(2005\)](#) ; [Mchirgui et al. \(2010\)](#) ; [Bennai et al. \(2016\)](#). C'est une fonction y-périodique dépendant de la variable macroscopique x mais pas de la variable microscopique y : $p_v^{f0*}(x, y, t) = p_v^{f0*}(x, t)$

Problème P_1 à l'ordre de ε^1

En ne gardant que les termes d'ordre ε^1 , on obtient le problème P_1 qui est défini comme suit :

$$\text{div}_y^* (\delta_v^{f0*} (\frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x})) = 0 \quad \text{dans } \Omega_f \quad (\text{VI.24})$$

$$\delta_v^{f0*} (\frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x}) N = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.25})$$

Il a été montré par des travaux précédents [[Auriault, 1991](#) ; [Lewandowaska et al., 2004](#) ; [Szymkiewicz Burzyński, 2005](#) ; [Mchirgui et al., 2010](#) ; [Bennai et al., 2016](#)] que la solution de ce problème est une fonction linéaire du gradient de vapeur macroscopique :

$$p_v^{f1*}(x, y, t^*) = \overline{p_v^{f1*}(x, t^*)} + \chi(y) \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x} \quad (\text{VI.26})$$

$\overline{p_v^{f1*}(x, t^*)}$ est une fonction arbitraire qui ne dépend pas de la variable locale y et χ (χ_1, χ_2, χ_3) est un vecteur y-périodique défini par la moyenne nulle sur le domaine du VER (Ω).

$$\langle \chi(y) \rangle = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \chi \, d\Omega = 0 \quad (\text{VI.27})$$

et solution du système d'équations suivant :

$$\text{div}_y^* (\delta_v^{f0*} (\mathbf{I} + \frac{\partial \chi}{\partial y}) \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x}) = \mathbf{0} \quad \text{dans } \Omega_f \quad (\text{VI.28})$$

$$\delta_v^{f0*} ((\mathbf{I} + \frac{\partial \chi}{\partial y}) \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x}) N = \mathbf{0} \quad \text{sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.29})$$

Avec I est le tenseur identité.

Problème P₂ à l'ordre de ε²

En ne gardant que les termes d'ordre ε², on obtient le problème P₂ qui est défini comme suit :

$$\frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial t^*} - \text{div}_y^* (\delta_v^{f0*} (\frac{\partial p_v^{f2*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial x}) + \delta_v^{f1*} (\frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x})) - \text{div}_x^* (\delta_v^{f0*} (\frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x})) = 0 \quad \text{dans } \Omega_f \quad (\text{VI.30})$$

$$(\delta_v^{f0*} (\frac{\partial p_v^{f2*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial x}) + \delta_v^{f1*} (\frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x})) N = (\delta_v^{m0*} \frac{\partial p_v^{m0*}}{\partial y}) N \quad \text{sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.31})$$

L'équation macroscopique de transfert de vapeur d'eau dans la terre crue renforcée par des fagots de fibres de lin est obtenue en moyennant l'équation (VI.30) sur Ω_f :

$$\langle \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial t^*} \rangle - \langle \text{div}_y (\delta_v^{f0*} (\frac{\partial p_v^{f2*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial x}) + \delta_v^{f1*} (\frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x})) \rangle - \langle \text{div}_x (\delta_v^{f0*} (\frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x})) \rangle = 0 \quad \text{dans } \Omega_f \quad (\text{VI.32})$$

Où

$$\langle \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial t^*} \rangle = \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial t} \quad (\text{car } p_v^{f0*} \text{ est une fonction macroscopique ne dépend que de } x \text{ et } t^*) \quad (\text{VI.33})$$

En appliquant le théorème de la divergence sur le deuxième terme de l'équation précédente, on trouve :

$$\begin{aligned} & \langle \text{div}_y (\delta_v^{f0*} (\frac{\partial p_v^{f2*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial x}) + \delta_v^{f1*} (\frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x})) \rangle \\ &= \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{m/f}} (\delta_v^{m0*} \frac{\partial p_v^{m0*}}{\partial y}) N \, d\Gamma \\ &= \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_m} \frac{\partial p_v^{m0*}}{\partial t^*} \, d\Omega \\ &= \langle \frac{\partial p_v^{m0*}}{\partial t^*} \rangle \end{aligned} \quad (\text{VI.34})$$

Pour le troisième terme :

$$\langle \text{div}_x (\delta_v^{f0*} (\frac{\partial p_v^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x})) \rangle = \langle \text{div}_x (\delta_v^{f0*} (\frac{\partial \chi}{\partial y} + I) \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x}) \rangle = \text{div}_x (\delta_v^{eq} \frac{\partial p_v^{f0*}}{\partial x}) \quad (\text{VI.35})$$

Avec $\delta_v^{eq} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_f} \delta_v^{f0*} (\frac{\partial \chi}{\partial y} + I) \, d\Omega$: tenseur de perméabilité à la vapeur d'eau homogénéisé macroscopique.

Enfin, si on substitue les termes (VI. 33), (VI. 34) et (VI. 35) dans l'équation macroscopique (VI. 32), On obtient l'équation macroscopique de transfert de vapeur d'eau dans la terre renforcée par des fibres de lin :

$$\frac{\partial p_v^{f0}}{\partial t} - \text{div}_x(\delta_v^{\text{eq}} \frac{\partial p_v^{f0}}{\partial x}) - \langle \frac{\partial p_v^{m0}}{\partial t^*} \rangle = 0 \quad (\text{VI.36})$$

Nous pouvons observer que l'équation macroscopique (VI. 36) contient un terme source ($\langle \frac{\partial p_v^{m0}}{\partial t^*} \rangle$) qui est dû à l'interaction du sous-domaine Ω_f avec le sous-domaine Ω_m . Pour déterminer ce terme source, nous devons résoudre l'équation (VI. 21) en Ω_m , qui est défini comme la quantité de vapeur d'eau stockée par la matrice poreuse Ω_m et transférée aux fagots de fibres de lin Ω_f .

VI. 2. 6 Résolution du problème local

Dans cette partie, nous nous concentrons sur la résolution numérique du problème local (équations (VI.27), (VI.28) et (VI.29)) où le vecteur χ est un vecteur y-périodique [Auriault, 1991 ; Lewandowaska et al., 2004 ; Szymkiewicz Burzyński, 2005 ; Mchirgui et al., 2010 ; Bennai et al., 2016]. Les équations (VI. 27), (VI. 28) et (VI. 29) sont des équations aux dérivées partielles qui peuvent être résolues à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics dans le modèle physique "PDE, coefficient de forme (c)" basé sur la méthode des éléments finis.

Dans l'interface de COMSOL et plus précisément dans le modèle physique « PDE - coefficient de forme (c) », on trouve le système d'équation suivant :

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(-c\nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \nabla u + au = f \text{ sur } \Omega_f \quad (\text{VI.37})$$

$$-n \nabla(-c\nabla u - \alpha u + \gamma) = 0 \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.38})$$

L'analogie entre les équations en χ et celles dans le système ci-dessus conçu dans le code de calcul de COMSOL Multiphysics, conduit à :

$$e_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ en s}^2/\text{m}^2$$

$$d_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ en s/m}^2$$

$$u = \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \chi_3 \end{pmatrix} \text{ en m}$$

$$c = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ en 1/m}$$

$$\gamma = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ en } 1/\text{m}$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2}, \frac{\partial}{\partial y_3} \right)$$

$$f = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ en } 1/\text{m}^2$$

➤ Résolution du problème local en χ à l'aide de COMSOL Multiphysics :

Le VER présenté dans le logiciel COMSOL est illustré dans la **Figure VI. 2** suivante :

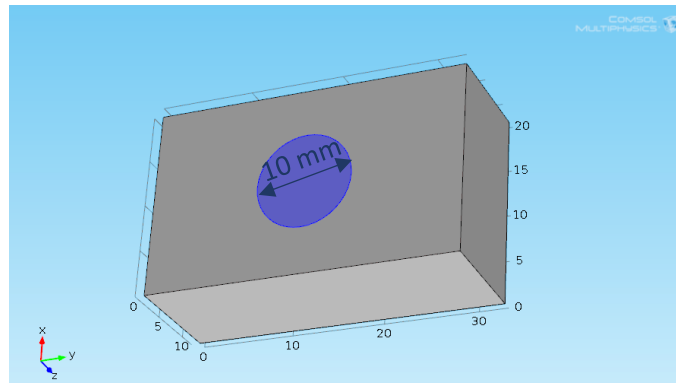


Figure VI. 2 : VER limon-fagot de fibres de lin de dimensions $20 \times 30 \times 12 \text{ mm}^3$

L'analogie entre les équations en χ et celles de COMSOL conduit à :

- $e_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ en s^2/m^2
- $d_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ en s/m^2
- $u = \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \chi_3 \end{pmatrix}$
- $c = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$
- $\alpha = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ en $1/\text{m}$
- $\gamma = \begin{pmatrix} 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} \end{pmatrix}$ en $1/\text{m}$
- $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2}, \frac{\partial}{\partial y_3} \right)$
- $f = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ en $1/\text{m}^2$

La résolution du problème local en χ à l'aide du logiciel COMSOL, a montré que $\int_{\Omega_f} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + 1 \right) d\Omega = 1$ et d'où la perméabilité équivalente à la vapeur d'eau est :

$$\delta_v^{eq} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_f} \delta_v^{f0*} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + 1 \right) d\Omega = 1 \times \frac{|\Omega_f|}{|\Omega|} \times \delta_v^{f0} = v_f \delta_v^{f0} \quad (VI.39)$$

Où v_f est la fraction volumique des fibres de lin dans la matrice qui varie entre 9% et 17% dans ce cas.

On peut conclure, que la disposition des fibres en fagots longitudinaux favorise une perméabilité équivalente à la vapeur dominée par la perméabilité longitudinale des fagots de fibres.

VI. 3 Transfert d'eau liquide

Cette partie est consacrée à l'étude des transferts d'eau liquide dans la terre crue renforcée par des fagots de fibres de lin (**Figure VI. 1**). Le but de cette partie est d'obtenir un modèle de transfert d'eau homogénéisé au niveau du volume élémentaire représentatif (VER) à partir des équations de transport écrites à l'échelle microscopique.

La même démarche que celle présentée en détails dans la section VI.2 (transfert de vapeur d'eau) est suivie afin d'obtenir l'équation de transfert d'eau liquide homogénéisée ainsi que la perméabilité du matériau composite homogène équivalente.

VI. 3. 1 Hypothèses

Les hypothèses principales du problème sont les suivantes :

- la matrice solide est indéformable et non réactive (c'est à dire que les propriétés hydriques et chimiques de la matrice-sol compactée, la rendent non gonflante et de potentiel de retrait très faible). En d'autres termes, les surpressions capillaires dues à la déformation du squelette solide ainsi que les modifications structurales et les termes sources dues aux réactions chimiques sont négligeables.
- les différentes phases en présence sont supposées en équilibre thermique et les transferts de masse se font dans des conditions isothermes,
- l'air est considéré comme un composant inerte, dans le sens où il n'est pas susceptible de se condenser sur la matrice poreuse ou d'interagir avec la phase condensée,
- les effets de gravité sont négligeables devant le mode de transfert liquide.

VI. 3. 2 Formulation du problème

Le transfert d'eau liquide dans les milieux poreux partiellement saturés est supposé régi par l'équation de Richards qui est définie comme suit :

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} - \text{div} \left(\frac{k_w}{\mu} \text{grad} (p_w + \rho_w g x_3) \right) = 0 \quad (\text{VI.40})$$

Avec

- $\theta_w = n \cdot S_w$
- n : porosité
- S_w : degré de saturation
- t : temps (s)
- k_w : perméabilité à l'eau liquide (m^2)
- μ : viscosité dynamique (Pa. s)
- p_w : pression à l'eau liquide (Pa)
- ρ_w : masse volumique de l'eau liquide (kg/m^3)
- g : accélération de pesanteur (m/s^2)

En effectuant l'adimensionnalisation des paramètres du problème (voir les détails dans le paragraphe 2 de l'Annexe A3) et en posant le temps caractéristique $t^c = \frac{\theta_w^f L^2 \mu}{p_w^f k_w^f}$ en [s] qui présente le temps caractéristique de diffusion d'eau liquide dans le fagot de fibres, on obtient :

$$\tau_w^f = \frac{\theta_w^{f*} l_c^2 \mu}{p_w^{f*} k_w^{f*} t^c} = O(\varepsilon^2) \quad (\text{VI.41})$$

$$\tau_w^m = \frac{\theta_w^{m*} l_c^2 \mu}{p_w^{m*} k_w^{m*} t^c} = O(1) \quad (\text{VI.42})$$

$$\zeta = \frac{k_w^{m*} l_c p_w^{m*}}{p_w^{f*} l_c k_w^{f*}} = O(\varepsilon^2) \quad (\text{VI.43})$$

En écrivant les équations de transfert d'eau liquide au niveau des deux composants (matrice solide (m) et fagots de fibres (f)), on trouve :

$$\tau_w^m \frac{\partial \theta_w^{m*}}{\partial p_w^{m*}} \frac{\partial p_w^{m*}}{\partial t^*} - \text{div}^* \left(\frac{k_w^{m*}}{\mu} \text{grad}^* (p_w^{m*} + \varepsilon \rho_w g y_3) \right) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (\text{VI.44})$$

$$\tau_w^f \frac{\partial \theta_w^{f*}}{\partial p_w^{f*}} \frac{\partial p_w^{f*}}{\partial t^*} - \text{div}^* \left(\frac{k_w^{f*}}{\mu} \text{grad}^* (p_w^{f*} + \varepsilon \rho_w g y_3) \right) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (\text{VI.45})$$

Conditions à l'interface $\Gamma_{m/f}$

$$p_w^{f*} = p_w^{m*} \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.46})$$

$$\left(\frac{k_w^{*f}}{\mu} \mathbf{grad}^*(\mathbf{p}_w^{f*} + \varepsilon \rho_w \mathbf{g} y_3)\right) N = \zeta \left(\frac{k_w^{m*}}{\mu} \mathbf{grad}^*(\mathbf{p}_w^{m*} + \varepsilon \rho_w \mathbf{g} y_3)\right) N \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.47})$$

Finalemeht, en effectuant les développements asymptotiques en différents ordres de ε (ε^n avec $n \in \mathbb{Z}$) (voir paragraphe 2 de l'Annexe A3) et en appliquant la moyenne sur les différents termes des équations de transferts, on obtient l'équation macroscopique homogène de transfert d'eau liquide dans la terre renforcée par des fibres de lin qui s'écrit de la manière suivante :

$$C_w^{\text{hom}} \frac{\partial p_w^{f0}}{\partial t^*} - \text{div}_x \left(\frac{k_w^{\text{eq}}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f0}}{\partial x} + \rho_w \mathbf{g} \right) \right) - \langle C_w^{m0*} \frac{\partial p_w^{m0*}}{\partial t^*} \rangle = 0 \quad (\text{VI.48})$$

Avec $k_w^{\text{eq}} = \frac{1}{|\Omega_f|} \int_{\Omega_f} k_w^{f0*} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) d\Omega$: la perméabilité à l'eau liquide homogénéisée macroscopique.

Nous pouvons observer que l'équation macroscopique (VI.48) contient un terme source ($\langle C_w^{m0*} \frac{\partial p_w^{m0*}}{\partial t^*} \rangle$) qui est dû à l'interaction du sous-domaine Ω_f avec le sous-domaine Ω_m . Pour déterminer ce terme source, nous devons résoudre l'équation (A3.24, Annexe A3) et qui est défini comme la quantité d'eau liquide stockée par la matrice poreuse Ω_m et transférée aux faisceaux de fibres de lin Ω_f .

La résolution numérique du problème local à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics a conduit à : $\frac{1}{|\Omega_f|} \int_{\Omega_f} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) d\Omega = 1$ ce qui permet d'écrire la perméabilité équivalente à l'eau liquide comme suit :

$$k_w^{\text{eq}} = \frac{1}{|\Omega_f|} \int_{\Omega_f} k_w^{f0*} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) d\Omega = \frac{|\Omega_f|}{|\Omega|} k_w^{f0} = v_f k_w^{f0} \quad (\text{VI.49})$$

VI. 4 Transfert thermique

VI. 4. 1 Hypothèses du problème

Les hypothèses principales du problème sont les suivantes :

- la matrice solide est indéformable,
- le transfert de chaleur est unidirectionnel,
- le transfert se fait par conduction thermique uniquement,
- la diffusion de chaleur est contenue entre la matrice terre et les fagots de fibres de lin
- l'équation de continuité de chaleur est applicable à l'échelle microscopique

VI. 4. 2 Formulation du problème

Conservant le même modèle de la terre crue renforcée par des fagots de fibres de lin présenté précédemment (voir **Figure VI. 1**), le transfert thermique à travers ce matériau est régi par l'équation de continuité de chaleur définie comme suit :

$$\rho_0 c_0 \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div} (\lambda \text{ grad}(T)) = 0 \text{ dans } \Omega \quad (\text{VI.50})$$

Avec

- ρ_0 : densité sèche du matériau [kg/m^3]
- c_0 : capacité thermique massique du matériau à l'état sec [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]
- T : température [$^\circ\text{C}$]
- λ : conductivité thermique du matériau [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
- t : temps [s]

En utilisant les résultats expérimentaux présentés dans le chapitre III, paragraphes III et en effectuant l'analyse adimensionnelle des paramètres du problème (voir les détails dans l'Annexe A3, paragraphe 3), on trouve :

$$\frac{\tau_1^m}{\tau_2^m} = \frac{\rho_0^{mc} c_0^{mc} L_c^2}{t^c \lambda^{mc}} = \frac{1.398 \times 10^6 \times 0.01^2}{11340 \times 0.761} = 0.016 = \mathcal{O}(\varepsilon^2) \quad (\text{VI.51})$$

$$\frac{\tau_1^f}{\tau_2^f} = \frac{\rho_0^{fc} c_0^{fc} L_c^2}{t^c \lambda^{fc}} = \frac{0.759 \times 10^6 \times 0.01^2}{2160 \times 0.0427} = 0.8 = \mathcal{O}(1) \quad (\text{VI.52})$$

$$\Psi = \frac{\lambda^{fc}}{\lambda^{mc}} = \frac{0.0427}{0.761} = 0.056 = \mathcal{O}(\varepsilon^2) \quad (\text{VI.53})$$

En écrivant les équations de transfert de chaleur au niveau de la matrice solide (m) et les fagots de fibres (f), on obtient :

$$\tau_1^m \left(\rho_0^{m*} c_0^{m*} \frac{\partial T^{m*}}{\partial t} \right) - \tau_2^m \text{div} (\lambda^{m*} \text{ grad}(T^{m*})) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (\text{VI.54})$$

$$\tau_1^f \left(\rho_0^{f*} c_0^{f*} \frac{\partial T^{f*}}{\partial t} \right) - \tau_2^f \text{div} (\lambda^{f*} \text{ grad}(T^{f*})) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (\text{VI.55})$$

$$T^{m*} = T^{f*} \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.56})$$

$$(\lambda^{m*} \text{ grad}(T^{m*})) N = \Psi (\lambda^{f*} \text{ grad}(T^{f*})) N \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{VI.57})$$

En effectuant le développement asymptotique (voir les détails dans le paragraphe 3 de l'Annexe A3) et le calcul de la moyenne pour chaque terme des équations, on obtient l'équation macroscopique homogène de transfert de chaleur dans la terre renforcée par des fagots de fibres de lin suivante :

$$\rho_0^{m0} c_0^{m0} \frac{\partial T^{m0}}{\partial t} - \text{div}_x (\lambda^{eq} \frac{\partial T^{m0}}{\partial x}) + \rho_0^{f0} c_0^{f0} \langle \frac{\partial T^{f0*}}{\partial t} \rangle = 0 \quad (\text{VI.58})$$

Avec $\lambda^{eq} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_f} \lambda^{m0} (\frac{\partial \chi}{\partial y} + I) d\Omega$: la conductivité thermique homogénéisée macroscopique.

La résolution numérique du problème local à l'aide du logiciel COMSOL donne : $\frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_f} (\frac{\partial \chi}{\partial y} + I) d\Omega = 1$ ce qui permet d'écrire la perméabilité équivalente à l'eau liquide comme suit :

$$\lambda^{eq} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_f} \lambda^{m0} (\frac{\partial \chi}{\partial y} + I) d\Omega = \frac{|\Omega_f|}{|\Omega|} \lambda^{m0} = v_f \lambda^{m0} \quad (\text{VI.59})$$

VI. 5 Validation des résultats de la modélisation par homogénéisation

Afin de valider les modèles de transferts obtenus à l'aide de la théorie d'homogénéisation, des essais expérimentaux de transfert de vapeur d'eau ont été réalisés sur des modèles physiques représentés par des échantillons cylindriques de limon GO renforcé avec des fagots de fibres longitudinales, similaires aux modèles théoriques. La méthode expérimentale utilisée pour mesurer la perméabilité à la vapeur d'eau du limon-fibres de lin est celle des dessiccateurs décrite dans le chapitre II. Afin d'évaluer leur effet sur la perméabilité à la vapeur, différents taux de fagots de fibres insérées dans la matrice terre ont été choisis. Les propriétés physiques des échantillons sont résumées dans le **Tableau VI.1**.

Tableau VI. 1 : Propriétés physiques des échantillons de limon-fagots de fibres longitudinales

	Taux de fibres (%)	γ_h (kN/m ³)	w (%)	Porosité n (%)
	4	19.35	14.27	27
Limon GO renforcé avec des fibres de lin disposées longitudinalement	6	18.71	15.63	29
	9	18.29	14.46	31
	11	17.76	15.23	33
	17	16.52	15.27	38

Les résultats des essais expérimentaux de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction du pourcentage des fibres de lin sont présentés dans la **Figure VI. 3**. On remarque que

la perméabilité évolue avec l'augmentation du taux de fibres ajouté. De plus, pour un pourcentage de fibres inférieur à 9%, la variation de la perméabilité à la vapeur n'est pas significative (pente de 3.72×10^{-14} kg/(m. s. Pa)). On peut dire que dans ce domaine c'est la matrice solide qui régit le transfert de vapeur d'eau. Au-delà de 9%, on constate une augmentation notable de la perméabilité à la vapeur avec une pente de l'ordre de 8.04×10^{-13} kg/(m. s. Pa), soulignant l'effet prépondérant des fibres sur le transfert de vapeur. En effet, la forte pente observée lorsque le pourcentage de fibres passe de 9 à 17% est due à la diminution de la densité apparente du composite avec l'augmentation de la teneur en fibres de 19.35 kN/m^3 à 16.52 kN/m^3 respectivement. De plus, les résultats expérimentaux de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau des fibres de lin présentés dans le chapitre III, ont montré une forte perméabilité des fibres en disposition longitudinale, comparée à celle du limon seul. Par conséquent, plus le taux de fibres inséré dans la matrice terre est important, plus le composite terre-fibre est perméable à la vapeur d'eau.

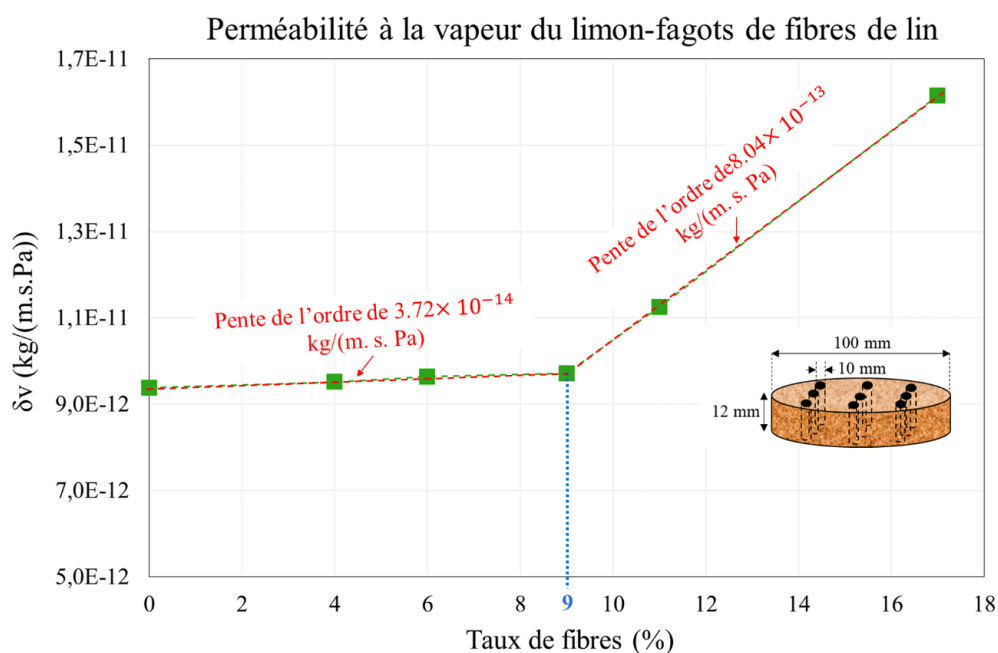


Figure VI. 3 : Evolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de pourcentage des fibres de lin en arrangement longitudinal

La **Figure VI. 4** présente une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques de la perméabilité à la vapeur du matériau composite limon-fagots de fibres de lin longitudinales. On observe, un bon accord dans le domaine de pourcentage de fibres au-delà de 9%. Dans ce domaine, l'arrangement longitudinal des fibres représente un arrangement approprié pour le

transfert de vapeur d'eau. Par conséquent, ce sont les fagots de fibres de lin qui dominent les transferts.

Dans le cas d'un matériau composite où les fibres sont en fagots dans la direction longitudinale, il est clair qu'un certain seuil de pourcentage de fibres doit être atteint pour que la vapeur d'eau soit diffusée en partie majeure par les fagots. Au-dessous de ce seuil, c'est la matrice de terre crue compactée qui régit seule le transfert de vapeur, ce qui justifie le mauvais accord entre les résultats expérimentaux et numériques. En effet, l'hypothèse principale de la théorie d'homogénéisation réside dans le fait que les fibres de lin soient plus conductrices à la vapeur d'eau que la terre crue, alors que les résultats expérimentaux ont montré que cela n'est vrai qu'au-delà de 9% de fibres ajoutées. Dans le domaine au-dessous de 9% de taux de fibres ajoutées, on peut déduire que la théorie d'homogénéisation est non applicable pour des faibles taux de fibres ajoutés à la terre crue, ce qui fait que c'est la matrice de terre crue compactée qui régit seule le transfert de vapeur et non pas les fagots de fibres de lin.

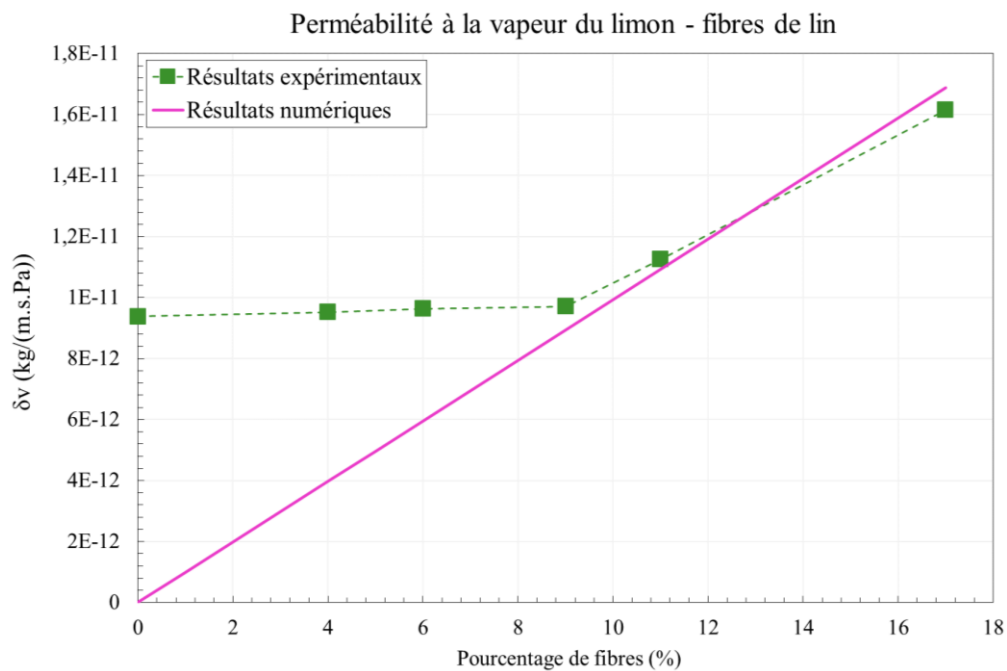


Figure VI. 4 : Comparaison des résultats expérimentaux – numériques

VI. 6 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation des transferts de vapeur d'eau, d'eau liquide et de la chaleur dans le matériau composite terre-fibres de lin a été abordé à l'aide de la théorie

d'homogénéisation. Les équations de transferts ainsi que les caractéristiques hygrothermiques homogénéisées (perméabilité à l'eau liquide, perméabilité à la vapeur d'eau et conductivité thermique) ont été établies en considérant que ces transferts sont indépendants.

Des essais de transferts exclusivement de vapeur d'eau à travers le matériaux composite terre-fagots de fibres de lin ont été réalisés pour différents taux de fibres pour valider une partie des résultats obtenus à l'aide de la méthode d'homogénéisation. Une comparaison des résultats numériques et expérimentaux de la perméabilité à la vapeur du matériau composite limon-fagots de fibres de lin longitudinales a montré un bon accord pour un pourcentage de fibres au-delà d'un certain seuil correspondant dans notre cas à 9%. Au-dessus de ce domaine, il n'y a pas de concordance. En effet, les résultats expérimentaux montrent que la perméabilité à la vapeur passe de 9.38×10^{-12} à 9.71×10^{-12} kg/ (m. s. Pa) avec une faible pente de l'ordre de 8.04×10^{-13} kg/ (m. s. Pa) pour des taux de fibres compris entre 0 et 9%, alors que les résultats numériques montrent une hausse linéaire de la perméabilité à la vapeur de 0 à 8.94×10^{-12} kg/ (m. s. Pa). Au-delà de 9%, expérimentalement la perméabilité augmente de 9.71×10^{-12} à 1.61×10^{-11} kg/ (m. s. Pa) et numériquement elle passe de 8.94×10^{-12} à 1.68×10^{-11} kg/ (m. s. Pa). Dans le domaine au-dessous de 9% de taux de fibres ajoutées, on peut déduire que la théorie d'homogénéisation est non applicable pour des faibles taux de fibres ajoutés à la terre crue, ce qui fait que c'est la matrice de terre crue compactée qui régit seule le transfert de vapeur et non pas les fagots de fibres de lin.

Conclusion générale

Ce travail de thèse a été consacré à l'étude des performances hygrothermiques d'un éco-matériau de construction composite à base d'un limon disponible en Normandie, renforcé à l'aide de fibres de lin. L'étude a traité les transferts hygrométrique, thermique et couplé hygrothermique à travers ce matériau biosourcé ainsi que ses différents composants. Cette étude a comporté un volet « expérimental » et un volet « modélisation » et est scindée en trois parties principales : (i) Etude expérimentale de transfert hygrométrique, (ii) Etude expérimentale de transfert thermique et (iii) Etude expérimentale et numérique des transferts couplés hygrothermiques.

Des dispositifs expérimentaux ont été développés pour la caractérisation des transferts dans le limon seul, les fibres de lin seules et le matériau composite limon-fibres.

Concernant les transferts hygrométriques dans les fibres de lin seules, les résultats ont montré que la perméabilité à la vapeur diminue avec l'augmentation de la densité. De plus, leur orientation a montré un effet significatif sur leur capacité à diffuser la vapeur d'eau. Plus les fibres sont orientées dans la direction du flux, plus elles sont perméables à la vapeur d'eau. Pour le matériau composite limon-fibres, les résultats montrent que plus le taux de fibres ajoutées augmente, plus le limon est perméable à la vapeur d'eau quel que soit le type d'arrangement des fibres (aléatoire ou transversal). Ceci est dû à l'augmentation de la porosité du matériau suite à l'ajout des fibres et à la forte perméabilité des fibres qui est de l'ordre de 10^{-10} kg/(m. s. Pa). L'effet de la teneur en eau sur la capacité du matériau terre-fibres à laisser diffuser la vapeur d'eau est également été évalué. Nous avons constaté que quel que soit le matériau (limon seul ou bien limon-fibres de lin), plus le matériau est humide, plus il diffuse la vapeur. Ceci peut être lié à la présence des transferts d'eau liquide parallèlement aux transferts de vapeur.

Concernant les transferts thermiques, les résultats obtenus pour les fibres seules ont montré que la conductivité et la capacité thermiques augmentent linéairement avec la densité quel que soit le type d'arrangement des fibres (aléatoire ou bien transversal). De plus, nous avons constaté que la température a un effet sur les propriétés thermiques des fibres. L'évolution de la conductivité ainsi que la capacité thermique est linéaire en fonction de l'augmentation de la température quel que soit le type d'arrangement (aléatoire ou bien transversal).

Concernant les transferts thermiques du limon seul et du matériau composite limon-fibres de lin, nous avons analysé l'effet de la teneur en eau sur les propriétés thermiques (conductivité, diffusivité et capacité thermiques). Nous avons constaté que plus ces matériaux sont humides, plus ils sont conducteurs de la chaleur et plus leurs capacités à stocker la chaleur augmentent. Ceci est dû au fait que l'eau est plus conductrice à la chaleur que l'air sec. En outre, l'ajout des fibres en disposition aléatoire avec différents pourcentages, a entraîné une diminution de la conductivité et de la diffusivité thermiques, ce qui rend le limon plus isolant vis-à-vis des transferts thermiques. En revanche, la capacité thermique augmente avec l'augmentation de la teneur en eau quel que soit le matériau (limon ou limon-fibres de lin).

Concernant les transferts couplés hygro-thermiques, deux essais expérimentaux sur le limon GO ont été réalisés à l'aide du dispositif prototype développé, le premier sur un échantillon très humide et le second sur un échantillon partiellement humide initialement. Les résultats ont montré le bon comportement hygrothermique du limon vis-à-vis des transferts couplés. De plus, le but de ces essais est de valider le modèle numérique des transferts couplés.

En ce qui concerne la modélisation des transferts couplés hygro-thermiques à l'aide du modèle de Künzel, en partant des propriétés physiques et hygrothermiques du limon GO, le modèle de Künzel a permis de simuler de manière satisfaisante les résultats expérimentaux de couplage hygrothermique présentés dans le chapitre IV. Ceci a mis en évidence la capacité du modèle numérique à simuler les transferts hygrothermiques couplés à partir des propriétés physiques et hygrothermiques du matériau déterminées expérimentalement. En outre, une comparaison du comportement hygrothermique du limon avec le béton de ciment a mis en évidence son caractère plus isolant vis-à-vis des transferts thermiques, et plus respirant vis-à-vis des transferts hygrométriques. Ce constat fait de la construction en terre crue une alternative aux matériaux de construction classiques prometteuse vis-à-vis du confort hygrothermique vu qu'elle est deux fois plus isolante à la chaleur et 100 fois plus perméable à la vapeur que le ciment.

Finalement, l'application de la théorie de l'homogénéisation aux transferts hygrothermiques dans le matériau composite limon-fibres de lin, a permis d'obtenir des équations de transferts hygrothermiques homogénéisées macroscopiques ainsi que des coefficients de transfert (perméabilité à l'eau liquide, perméabilité à la vapeur d'eau et conductivité thermique) homogènes équivalents. Seuls les résultats de transfert de vapeur ont été validés par des essais expérimentaux de transferts de vapeur d'eau à travers le matériau composite terre-fagots de

fibres de lin. Un bon accord pour un pourcentage de fibres au-delà d'un certain seuil correspondant dans notre cas à 9%. Au-delà de ce seuil, il n'y a pas de concordance et ceci est dû au fait que c'est la matrice de terre crue compactée qui régit seule le transfert de vapeur et non pas les fagots de fibres de lin. Ceci est contraire à l'hypothèse principale de la théorie de l'homogénéisation.

Perspectives

Ces travaux de recherches ouvrent de nombreuses perspectives :

- Généralisation de notre démarche d'application de la théorie de l'homogénéisation par prise de moyenne pour des matériaux composites limon-fibres de lin aléatoires, ce qui est le cas en général in situ.
- Étude de l'effet du pourcentage de fibres sur les transferts couplés hygrothermiques à travers le matériau composite limon-fibres de lin.
- Étude des transferts couplés hygrothermiques sous conditions aux limites cycliques en humidité et température afin d'analyser la sensibilité du matériau limon-fibres de lin vis-à-vis des conditions aux limites dynamiques.
- Passage à un modèle physique instrumenté en composite limon-fibres à l'échelle 1 sous sollicitations hygro-thermiques dynamiques afin de rendre compte de l'effet saisonnier réel.
- Etude du comportement mécanique du matériau composite limon-fibres de lin pour différents pourcentages et arrangements de fibres.

Annexe A1

Humidités relatives imposées par les solutions salines

Lois de la thermodynamique

L'humidité relative HR est définie comme le rapport entre la pression partielle P_v et la pression saturante de vapeur d'eau P_{sat} . Sachant que la pression partielle de vapeur P_v est la pression exercée par la vapeur d'eau dans l'air et la pression saturante de vapeur P_{sat} est la pression à laquelle la vapeur d'eau est en équilibre thermodynamique avec son état condensé dont son expression est :

$$P_{sat} = e^{(23.5771 - \frac{4042.5}{T-37.58})}$$

Avec T : température [K]

Nous présentons ci-dessous deux lois de la thermodynamique pour calculer les pressions partielles de vapeur d'eau imposée par chaque type de sel : la loi de Clapeyron applicable pour des solutions saturées en sel, et la loi de Raoult qui est générale et applicable quel que soit la concentration de la solution en sel.

Dans le cadre de cette étude, un fichier Excel basé sur ces deux lois de la thermodynamique a été développé permettant de déterminer l'humidité relative imposée par différentes solutions salines à différentes concentrations.

1- Loi de Clapeyron : applicable pour les solutions saturées en sel

Dans le mélange de gaz que constitue l'air humide, la pression partielle de la vapeur d'eau P_v est, par définition, la pression qu'aurait la vapeur d'eau si elle occupait à elle seule tout le volume du mélange. La loi de Clapeyron permet de définir l'évolution de la pression de vapeur en fonction de la température d'équilibre au cours du changement d'état physique. Elle est donnée par la formule suivante :

$$P_v = P_0 e^{\left(\frac{L_v}{RT_0}\right)} e^{\left(-\frac{L_v}{RT}\right)}$$

- P_v : pression de vapeur [Pa]
- L_v : chaleur latente de vaporisation [kJ/mol]

- R = constante des gaz parfaits = 8.31 J/ (mol. K)
- T_0 : température d'ébullition = 100 °C = 373 K de l'eau à la pression $P_0 = 101,3$ kPa
- T : température ambiante de vapeur [K].

Le **Tableau A1.1** illustre les valeurs des L_v pour les différents types de sels :

Tableau A1.1 : Valeurs des L_v pour différents sels en solution saturée en sel [Apelblat, 1993 ; Apelblat et korin, 1998]

Soluté	L_v (kJ/mol)
K_2SO_4	43
Na_2SO_3	43.9
KCl	44.8
KBr	45.2
NH_4Cl	45.6
$NaNO_3$	46.4
NaCl	46.1
$NaNO_2$	49
$CaNO_3$	51
K_2CO_3	51.5
$MgCl_2$	56.4
$CaCl_2$	58.2
LiCl	69.5

Si on prend l'exemple d'une solution saline saturée en K_2SO_4 , on trouve (**Tableau A1.2**) :

Tableau A1. 2: Chaleur latente d'une solution de K_2SO_4 saturée

L_v	43 kJ/mol
P_v	2,29 kPa
P_{sat}	2,34 kPa
$HR = \frac{P_v}{P_{sat}}$	98.92 %

2- Loi de Raoult : applicable quel que soit la concentration de la solution en sel

La loi de Raoult est une loi empirique de la thermodynamique . Elle permet notamment de calculer les équilibres liquide-vapeur des solutions idéales liquides dont la phase vapeur est un mélange de gaz parfaits. Elle est donnée par la formule suivante :

$$P_v = x_{eau} P_{sat}$$

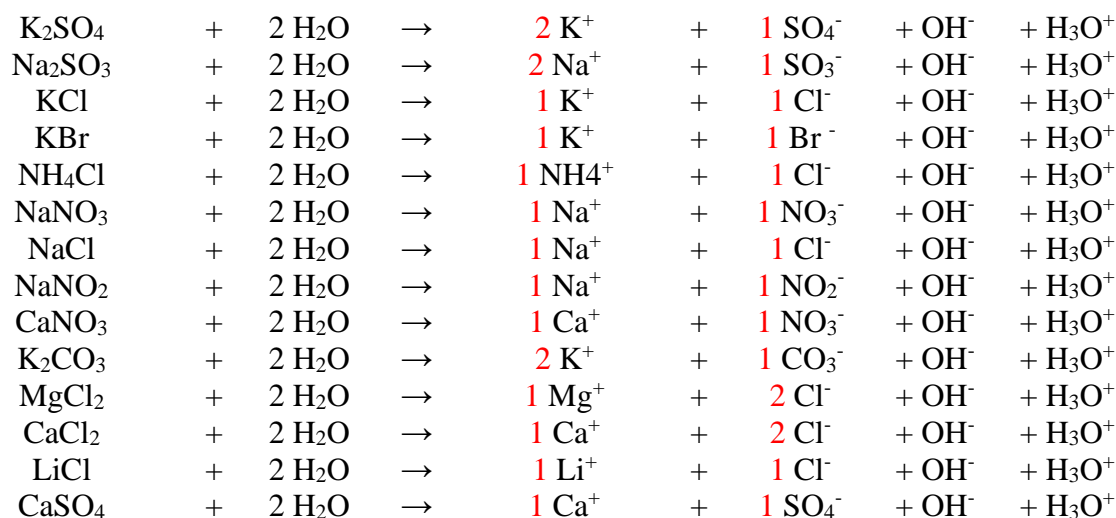
- $\chi_{\text{eau}} = \frac{n_{\text{eau}}}{n_{\text{eau}} + n_{\text{soluté}}}$: fraction molaire de l'eau dans la solution saline
- $n_{\text{eau}} = \frac{m_{\text{eau}}}{M_{\text{eau}}}$: nombre de moles d'eau [mole] ((sachant que la masse molaire de l'eau $M_{\text{eau}} = 18 \text{g/mol}$)
- $n_{\text{soluté}} = \frac{m_{\text{soluté}}}{M_{\text{soluté}}}$: nombre de moles de sel [mole]
- P_{sat} : pression saturante de vapeur d'eau [kPa]

Les masses molaires des différents sels sont données dans le **Tableau A1. 3.**

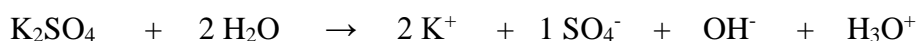
Tableau A1.3: Valeurs des masses molaires de différents sels

Soluté	Masse Molaire M (g/mol)
K ₂ SO ₄	174.26
Na ₂ SO ₃	126.05
KCl	74.55
KBr	119
NH ₄ Cl	53.49
NaNO ₃	84.99
NaCl	58.44
NaNO ₂	69
CaNO ₃	102.08
K ₂ CO ₃	138.21
MgCl ₂	95.21
CaCl ₂	110.98
LiCl	42.39

Les équations d'équilibre de dissolution des sels dans l'eau sont comme suit :



Prenant l'exemple de l'équation du K_2SO_4 :



Pour une solution de 500 g d'eau et 55,5 g de K_2SO_4 pour obtenir une solution saturée en sel :

$$n_{\text{eau}} = \frac{m_{\text{eau}}}{M_{\text{eau}}} = \frac{500}{18} = 27.78 \text{ moles}$$

$$n_{K_2SO_4} = \frac{m_{\text{soluté}}}{M_{\text{soluté}}} = \frac{55,5}{174,26} = 0.32 \text{ moles} \times 3 \text{ puisque nous avons trois moles de } K_2SO_4 \text{ (2 } K^+ \text{ et } 1 SO_4^-) \rightarrow n_{K_2SO_4} = 0.96 \text{ moles,}$$

Finalement, on trouve :

Tableau A1. 4 : Résultats de calcul

$\chi_{\text{eau}} = \frac{n_{\text{eau}}}{n_{\text{eau}} + n_{\text{soluté}}}$	0.9667
$P_v = \chi_{\text{eau}} \cdot P_{\text{sat}}$	2.26 kPa
$HR = \frac{P_v}{P_{\text{sat}}}$	96.67 %

On remarque que les deux lois donnent des valeurs similaires d'humidité relative.

Le **Tableau A1. 5** résume les humidités relatives données par les deux lois (Raoult et Clapeyron) pour 100 g d'eau à 20°C.

Tableau A1.5: Comparaison entre les valeurs des humidités relatives pour des solutions saturées en sel

Soluté	Masse du soluté (g)	HR (%) (Clapeyron, calculées dans cette étude)	HR (%) (Raoult, calculées dans cette étude)	HR (%) (Mesurée à l'aide de l'humidimètre)
K_2SO_4	11.1	98,92	96,67	97.2
Na_2SO_3	27	91,41	89,63	-
KCl	34.2	84,45	85,83	84.5
KBr	65.3	81,54	83,50	-
NH_4Cl	37.2	78,72	79,98	-
$NaNO_3$	87.6	73,38	72,94	-
NaCl	36	75,34	81,85	75.5
$NaNO_2$	80.8	58,39	70,34	-
$CaNO_3$	121.2	48,98	70,06	-
K_2CO_3	111	46,87	69,75	42.5
$MgCl_2$	54.6	30,47	76,35	33
$CaCl_2$	74.5	26,01	73,39	32
LiCl	83.5	9,64	58,51	12.6

Le **Tableau A1. 6** représente les valeurs des différentes humidités relatives qui peuvent être imposées à l'aide du sel **NaCl**. On pourra remarquer qu'en utilisant différentes masses de NaCl

pour 1g d'eau, on peut obtenir les mêmes ordres de grandeurs d'humidités relatives obtenus à l'aide d'autres sels tels que le K_2SO_4 , KNO_3 , $ZnSO_4$...

Tableau A1.6 : Humidité relative imposé par différents sels [Delage et al., 1998 ; Ghembaza, 2004]

Solution saline saturée	Concentration en NaCl à l'équilibre (g sel par g d'eau)	Potentiel d'eau d'après Lang, 1967 (MPa)	Humidité relative (%)	Humidité relative d'après les références
K_2SO_4	0,050	4,2	97,0	97 (AC) - 96 (E)
$CuSO_4, 5H_2O$	0,073	6,1	95,7	98 (BD)
KH_2PO_2	0,076	6,3	95,5	96,5 (C)
$Na_2HPO_4, 12H_2O$	0,108	9,0	93,7	95 (AB)
KNO_3	0,108	9,0	93,7	94 (A) - 93 (A)
$ZnSO_4, 7H_2O$	0,151	12,6	91,3	90 (ABC)
$Na_2SO_3, 7H_2O$	0,157	13,1	90,9	93 (A)
$Na_2SO_3, 7H_2O$	0,165	13,7	90,5	93 (A)
$(NH_4)_2SO_4$	0,299	24,9	83,5	81 (AE)

Référence : (A) : *Spencer, 1926* ; (B) : *Weast, 1968* ; (C) : *Schneider, 1960* ; (D) : *Tessier, 1975* ; (E) : NF X 15 014.

A l'aide du Fichier Excel développé dans le cadre de cette étude, on va essayer de retrouver les résultats obtenus dans le **Tableau A1. 6**. Le **Tableau A1.7** récapitule les humidités relatives obtenues pour différentes concentrations en NaCl.

Tableau A1.7 : Humidités relatives pour différentes concentrations en NaCl

Concentration en NaCl	
à l'équilibre (g de NaCl par g d'eau)	Humidité relative (%)
0.05	97
0.073	95.7
0.076	95.5
0.108	93.8
0.151	91.5
0.157	91.2
0.165	90.8
0.299	84.4

En changeant le sel NaCl par les autres sels présentés précédemment, on trouve les résultats présentés dans le **Tableau A1.8**.

Tableau A1.8 : Valeurs des humidités relatives imposées par des solutions salines non saturées en sel

Concentration en sel à l'équilibre (g de sel par g d'eau)	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR
	(%) K ₂ SO ₄	(%) Na ₂ SO ₃	(%) KCl	(%) KBr	(%) NH ₄ Cl	(%) NaNO ₃	(%) NaNO ₂	(%) CaNO ₃	(%) K ₂ CO ₃	(%) MgCl ₂		
0.05	98.5	97.9	97.64	98.51	96.74	97.93	97.64	98.27	98.08	97.24		
0.073	97.8	96.97	96.59	97.84	95.32	97.00	96.33	97.49	97.23	96.02		
0.108	96.8	95.58	95.04	96.84	93.22	95.63	94.67	96.33	95.95	94.23		
0.151	95.5	93.92	93.20	95.63	90.77	93.99	92.70	94.94	94.43	92.11		
0.299	91.5	88.64	87.38	91.71	83.25	88.76	86.50	90.46	89.54	85.50		
0.5	86.6	82.36	80.55	86.86	74.82	82.52	79.31	85.01	83.66	77.91		
0.8	80.1	74.47	72.13	80.51	65.00	74.69	70.55	78.00	76.19	68.79		
1	76.3	70.01	67.44	76.77	59.77	70.25	65.71	73.93	71.91	63.81		
2	61.74	53.86	50.87	62.30	42.63	54.14	48.93	58.64	56.31	46.85		

Annexe A2

Essais préliminaires de mesure de la perméabilité à la vapeur

En utilisant la méthode de la coupelle, des essais préliminaires de transferts de vapeur d'eau ont été réalisés afin de mesurer la perméabilité à la vapeur des matériaux. La perméabilité est donnée par la loi de Fick :

$$\delta_v = e \frac{j_v}{\Delta P_v}$$

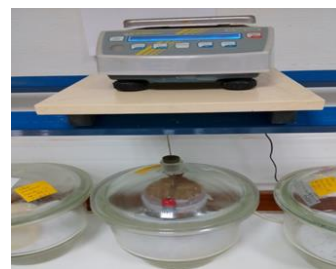
- e : épaisseur de l'échantillon [m] ;
- P_v : pression de vapeur [Pa] ;
- $j_v = \frac{Q_m}{S}$: densité de flux de vapeur [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] (déduite de la pesée et de la surface de l'échantillon)

1- Terre compactée « BTC »

Nous avons commencé les essais préliminaires par un matériau dont on connaît sa perméabilité à la vapeur d'eau de la littérature. Il s'agit d'un échantillon de terre compactée, composé de 70% de sédiment naturel NS (10% sable, 56% limon et 34% argile) et de 30% de sable local et compacté à une énergie donnée (Optimum Proctor Modifié + 25 Coups). L'échantillon utilisé pour l'essai est cylindrique d'épaisseur 3cm et de diamètre 10cm (**Figure A2. 1**).



(a)



(b)

Figure A2. 1 : (a) Echantillon de BTC entouré par du papier cellophane pour assurer une bonne étanchéité (b) Essai de transfert de vapeur d'eau en cours

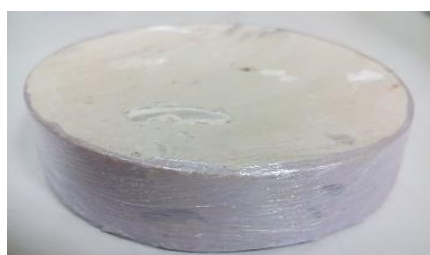
Les résultats obtenus pour cet essai sont récapitulés dans le **Tableau A2. 1** :

Tableau A2.1 : Résultats de mesure de la perméabilité à la vapeur du « BTC »

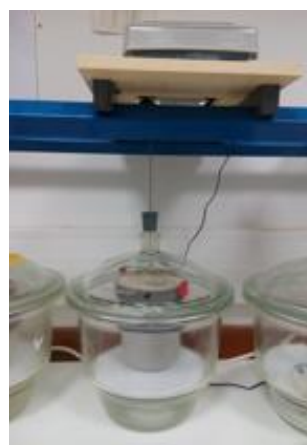
Matériaux	Epaisseur de l'échantillon (m)	Gradient de pression de vapeur ΔP_v (Pa)	Flux de vapeur d'eau $J_v = \frac{Q_m}{S}$ (kg/ (m. s))	Perméabilité à la vapeur d'eau δ_v (kg/ (m. s. Pa))
BTC	0.03	2.48	9.24×10^{-7}	1.12×10^{-11}

2- Béton de terre « Cématerre »

Le béton de terre « Cématerre » est composée de 78% de limon naturel prélevé du site de construction, de granulats de béton recyclé et mélangé, de 8% de ciment, de 3% de chaux, et renforcé par un faible pourcentage de fibres de lin. L'échantillon utilisé pour l'essai est de 1.5cm d'épaisseur et de 10cm de diamètre (**Figure A2. 2**).



(a)



(b)

Figure A2. 2 : (a) Echantillon cylindrique de Cématerre pour l'essai de la coupelle « Mesure de la perméabilité à la vapeur » et (b) Essai de transfert de vapeur d'eau en cours

Essai n°1 – Flux descendant

Pour cet essai, le sens du gradient d'humidité est de haut vers le bas. Il est égal à 47.9% imposé à l'aide de deux solutions salines saturées en sel : dans le récipient nous avons mis une solution saturée en K_2CO_3 (HR = 42.5%) et dans le dessiccateur une solution saline saturée en $ZnSO_4$ (HR = 90.4%). La **Figure A2. 3** et le **Tableau A2.2** montrent respectivement la variation de la masse de vapeur d'eau échangée durant l'essai et les détails de calcul de la perméabilité à la vapeur de « Cématerre ». Après tout calcul, on trouve $\delta_v = 1.06 \times 10^{-11}$ (kg/ (m. s. Pa)).

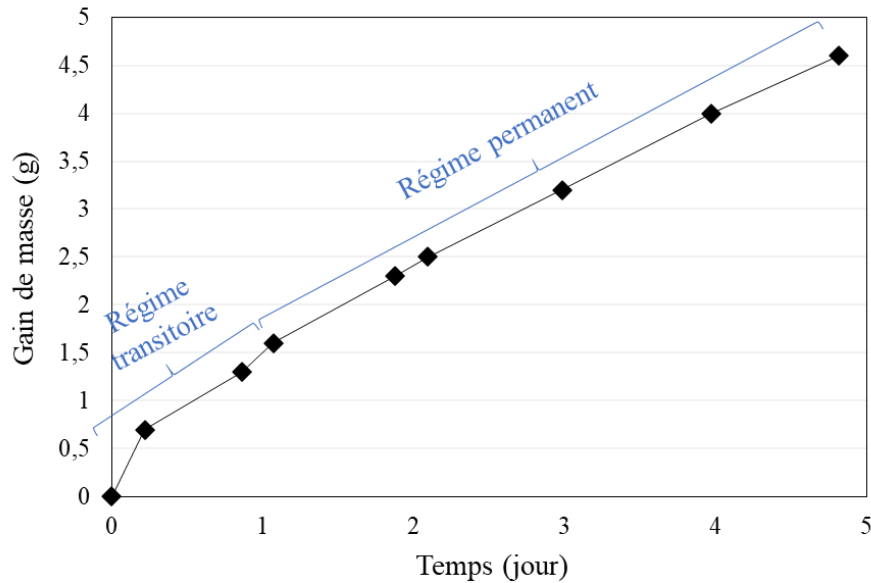


Figure A2.3 : Variation de la masse de vapeur d'eau échangée en fonction du temps (Essai n°1)

Tableau A2.2: Détails de calcul de la perméabilité à la vapeur de « Cématerre » – Flux descendant

Essai de la coupelle : Gradient d'humidité $\Delta HR = 47.9\%$				
		Formules	Valeurs	
Pente de la courbe Q_m (g/jour)		-	0.81	
Pente de la courbe Q_m (kg/s)		-	9.37×10^{-9}	
S (m ²)		-	0.0087	
j_v (kg/(m ² .s))		$J_v = \frac{Q_m}{S}$	1.08×10^{-6}	
HR ₁ (%)	90.4	$P_{v1} = HR_1 \times P_{sat}$	P_{v1} (Kpa)	2.95
HR ₂ (%)	42.5	$P_{v2} = HR_2 \times P_{sat}$	P_{v2} (Kpa)	1.42
ΔP_v (KPa)		$P_{v1} - P_{v2}$	1.53	
e (m)		-	0.015	
δ_v (kg/(m. s. Pa))		$\delta_v = e \frac{j_v}{\Delta p_v}$	1.06×10^{-11}	

Essai n°2 – Flux ascendant

Pour cet essai, le gradient d'humidité est ascendant, de bas vers le haut et il est égal à 74.5%. Il est imposé à l'aide de deux solutions salines saturées en sel : dans le récipient on trouve une solution saline saturée en K_2SO_4 et dans le dessiccateur une solution saline saturée en LiCl. Le **Figure A2.4** et le **Tableau A1.8** montrent respectivement la variation de la masse de vapeur d'eau échangée durant l'essai et les détails de calcul de la perméabilité à la vapeur de « Cématerre ». Après tout calcul, on trouve $\delta_v = 1.1 \times 10^{-11}$ (kg/ (m. s. Pa)).

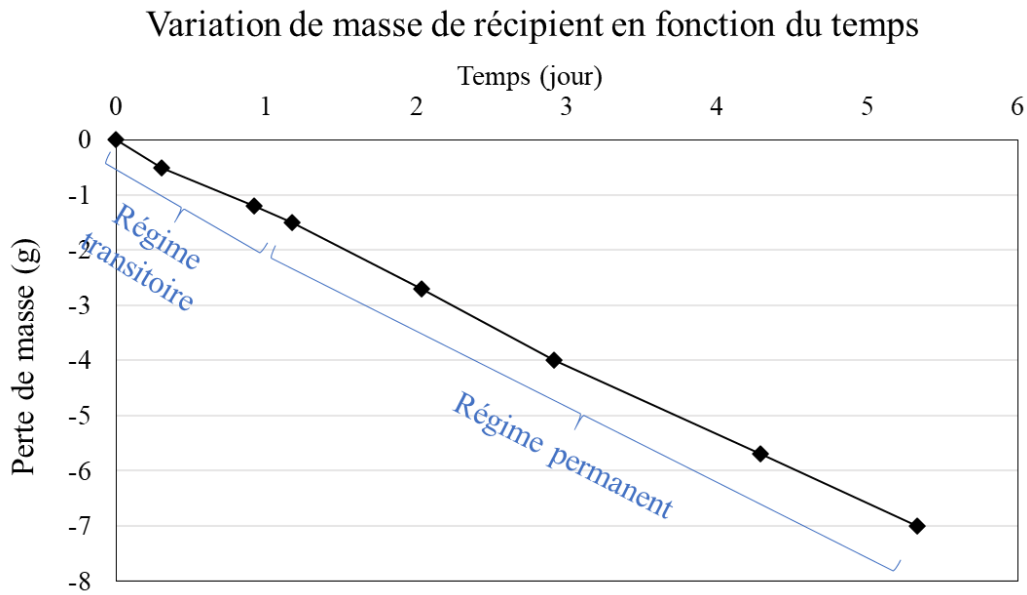


Figure A2.4 : Variation de la masse de vapeur d'eau échangée en fonction du temps (Essai n°2)

Tableau A2.3 : Détails de calcul de la perméabilité à la vapeur de « Cématerre » – Flux ascendant

Essai de la coupelle : Gradient d'humidité $\Delta HR = 74.5\%$		
	Formules	Valeurs
Pente de la courbe Q_m (g/jour)	-	1.41
Pente de la courbe Q_m (kg/s)	-	1.63×10^{-8}
S (m^2)	-	0.0087
j_v ($kg/(m^2 \cdot s)$)	$J_v = \frac{Q_m}{S}$	1.88×10^{-6}
ΔP_v (Kpa)	$P_{v1} - P_{v2}$	2.48
e (m)	-	0.015
δ_v ($kg/(m \cdot s \cdot Pa)$)	$\delta_v = e \frac{j_v}{\Delta p_v}$	1.1×10^{-11}

Les deux résultats obtenus par les deux essais de transfert de vapeur d'eau (flux descendant et flux ascendant) montrent que ce paramètre reste constant même si on change le sens de flux. On peut déduire que la perméabilité à la vapeur est un paramètre intrinsèque du matériau.

Annexe A3

Théorie d'homogénéisation

1- Transfert de vapeur d'eau

Validation du modèle de résolution du problème en χ sur COMSOL Multiphysics par des études de la littérature :

Lewandowska et al., (2004), comme a été mentionné dans le chapitre I, ont appliqué la théorie d'homogénéisation périodique aux transferts d'eau liquide dans un milieu poreux à double porosité (Ω_1 et Ω_2 , dont Ω_1 est le domaine caractérisé par une perméabilité beaucoup plus importante que celle qui caractérise le matériau constituant le domaine Ω_2). Les pores représentent les hétérogénéités et ils sont considérés comme des inclusions rectangulaires dans cette étude. Deux modèles ont été abordés. Pour le premier, le sens d'écoulement d'eau est le même que celui des inclusions les plus conductrices alors que pour le second, il est perpendiculaire à celui des inclusions les plus conductrices. La **Figure A3. 1** montre l'exemple n°1 qu'on va traiter dans cette partie afin de mettre en évidence la bonne réponse du modèle implémenté sous COMSOL Multiphysics pour la résolution du problème local en χ .

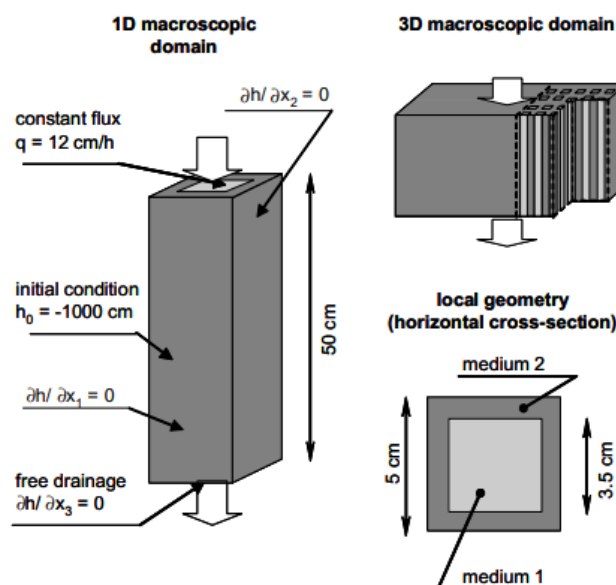


Figure A3. 1 : Géométries du milieu à double porosité et conditions aux limites utilisées dans l'étude numérique [Lewandowska et al, 2004]

Les résultats de la théorie d'homogénéisation de [Lewandowska et al., 2004] sont comme suit :

➤ Equation de transfert d'eau liquide macroscopique :

$$C^{\text{hom}} \frac{\partial h^0}{\partial t^*} - \text{div}_x (K^{\text{hom}} \left(\frac{\partial h^0}{\partial x} + I \right)) + \langle C_2^0 \frac{\partial h^0}{\partial t^*} \rangle = 0 \quad (\text{A3.1})$$

avec :

- K^{hom} : Perméabilité à l'eau homogénéisée : $K^{\text{hom}} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_1} k^0 \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) d\Omega$
- C^{hom} : Coefficient de stockage d'eau homogénéisée : $C^{\text{hom}} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_1} C^0 d\Omega = C^0 \frac{|\Omega_1|}{|\Omega|}$
- h : pression hydraulique capillaire [m]
- t^* : temps adimensionnel [s]

➤ A l'aide du code DPOR-1D, [Lewandowska et al., 2004] a résolu le problème en χ :

$$\text{div}_y^* \left(K^{(0)} \left(I + \frac{\partial \chi}{\partial y} \right) \right) = 0 \text{ dans } \Omega_1 \quad (\text{A3.2})$$

$$K^{(0)} \left(I + \frac{\partial \chi}{\partial y} \right) N = 0 \text{ sur } \Gamma \quad (\text{A3.3})$$

et ils ont obtenu les résultats suivants : $K^{\text{hom}} = 0.49 K_1$ et $C^{\text{hom}} = 0.49 C_1$

avec K_1 et C_1 sont respectivement la conductivité hydraulique et la capacité de stockage d'eau du milieu Ω_1 .

Afin de valider le modèle implémenté sur le logiciel COMSOL dans le cadre de cette étude pour résoudre le problème en χ , l'exemple n°1 de [Lewandowska et al., 2004] a été traité à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics.

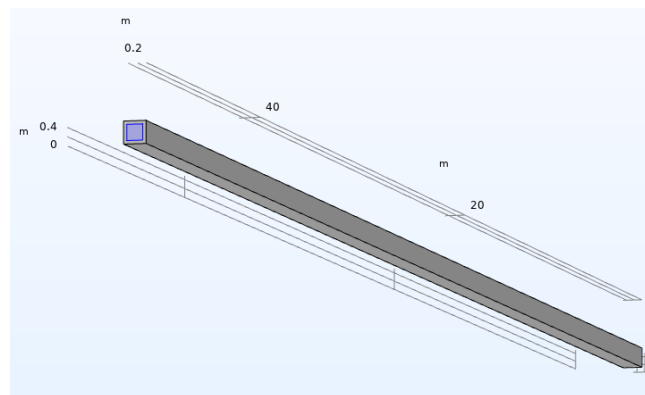


Figure A3. 2 : VER de dimensions $0.5 \times 0.5 \times 50 \text{ cm}^3$

L'analogie entre les équations en χ et celles de COMSOL Multiphysics pour cet exemple conduit à :

- $e_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ en s^2/m^2
- $d_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ en s/m^2
- $u = \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \chi_3 \end{pmatrix}$ en m
- $c = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$
- $\alpha = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ en $1/m$
- $\gamma = \begin{pmatrix} 10^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-2} \end{pmatrix}$ en $1/m$
- $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2}, \frac{\partial}{\partial y_3} \right)$
- $f = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ en $1/m^2$

Conditions aux limites :

On applique un flux/source dans le sens (z) égale à 12 cm/h comme c'est mentionné dans la **Figure A3. 1**.

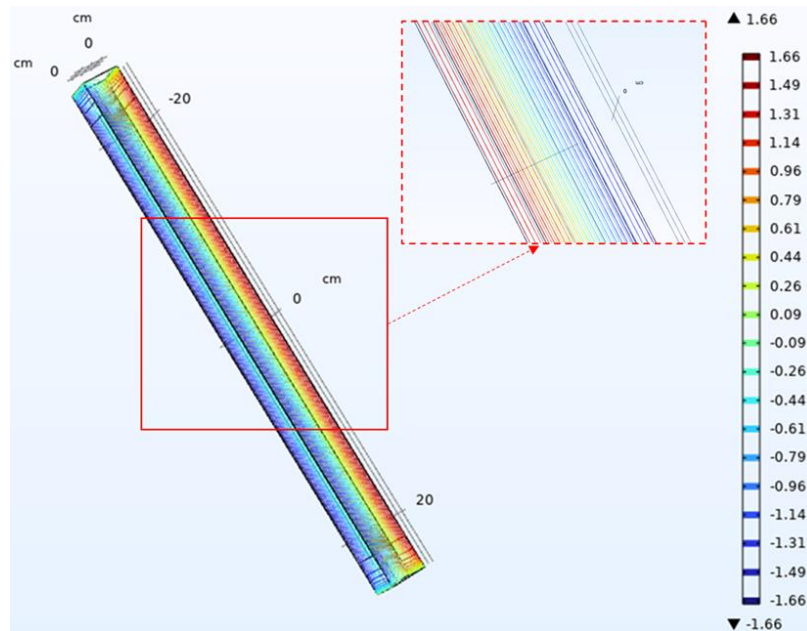


Figure A3. 3 : Variation de χ_3 dans le VER

Pour déterminer le tenseur de perméabilité homogénéisé $K^{\text{hom}} = \frac{k^0}{|\Omega|} \int_{\Omega_1} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) \cdot d\Omega$ on doit calculer la moyenne de χ_1 (ou χ_2). Cette moyenne est calculée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. En fait, ce logiciel nous permettons de déterminer la moyenne de χ sur Ω_1 et non pas sur Ω donc la valeur obtenue par le logiciel COMSOL doit être multipliée par $\frac{|\Omega_1|}{|\Omega|}$ pour avoir la moyenne sur tout le domaine Ω du VER.

D'après le logiciel COMSOL Multiphysics, la valeur de la moyenne obtenue sur le domaine Ω_1 :

$$\frac{1}{|\Omega_1|} \int_{\Omega_1} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) \cdot d\Omega = 0.97$$

$$\rightarrow \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_1} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) \cdot d\Omega \times \frac{|\Omega_1|}{|\Omega|} = 0.97 \times 0.49 = 0.48$$

$$\rightarrow K^{\text{hom}} = 0.48 K_1$$

On peut conclure que les résultats obtenus par notre modélisation à l'aide du logiciel COMSOL ou ceux de [Lewandowska et al. \(2004\)](#) sont comparables dont l'erreur est de l'ordre de 2%.

D'autre part, [Szymkiewicz et Burzyński \(2005\)](#) ont réalisé une étude sur les transferts hydriques dans les milieux à doubles porosités où les pores représentent les hétérogénéités. Ils ont considéré que les pores qui forment le milieu Ω_1 sont plus conductrices à l'eau liquide que les pores (milieu Ω_2). Les pores sont de forme sphérique dans cette étude (voir **Figure A3. 4**).

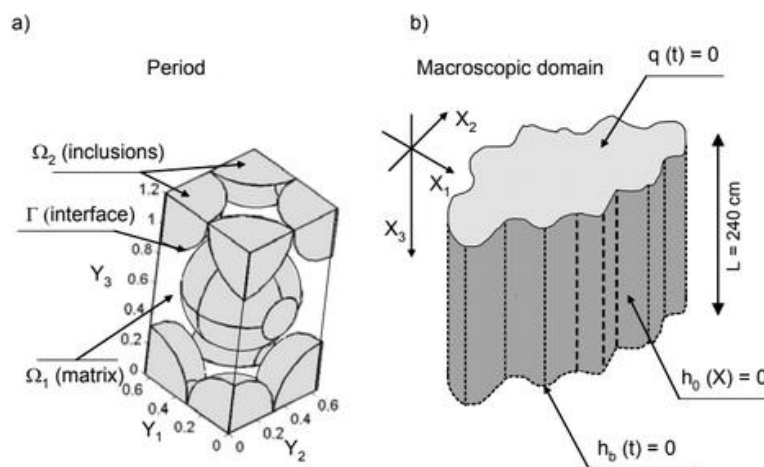


Figure A3. 4 : Géométrie du VER utilisé dans la simulation numérique : (a) Dimensions du VER en [cm], (b) Conditions initiales et aux limites du problème macroscopique [[Szymkiewicz et Burzyński, 2005](#)]

Les résultats de la théorie d'homogénéisation obtenus par [Szymkiewicz et Burzyński, \(2005\)](#) sont comme suit :

Equation de transfert d'eau liquide macroscopique :

$$C^{\text{hom}} \frac{\partial h^0}{\partial t^*} - \text{div}_x(K^{\text{hom}} \left(\frac{\partial h^0}{\partial x} + I \right)) + \langle C_2^0 \frac{\partial h^0}{\partial t^*} \rangle = 0 \quad (\text{A3.4})$$

- h : pression hydraulique capillaire [m]
- Perméabilité à l'eau homogénéisée : $K^{\text{hom}} = k_1 \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_1} k_1 \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) d\Omega$
- Coefficient de stockage d'eau homogénéisée : $C^{\text{hom}} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_2} C_1 d\Omega = C_1 \frac{|\Omega_1|}{|\Omega|}$

Szymkiewicz et Burzyński (2005) a utilisé le code DPOR-1D pour résoudre le problème local en χ . La figure suivante montre la solution χ_3 obtenue :

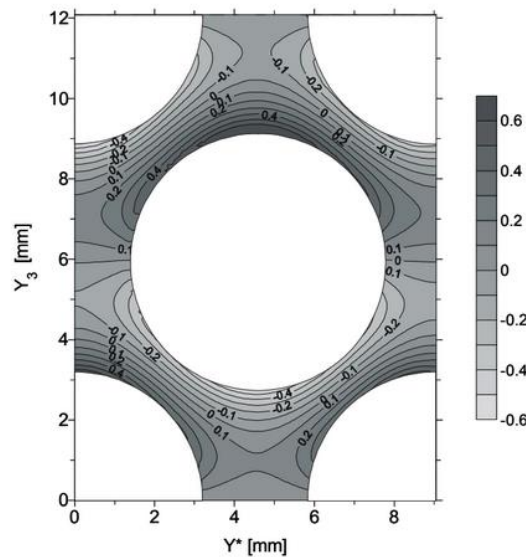


Figure A3. 5 : Solution du problème local, fonction χ_3 . Coupe diagonale du VER dans le plan ($y_1 = y_2, y_3$) [Szymkiewicz et Burzyński, 2005]

Après le calcul de la moyenne de χ_3 à l'aide du code DPOR, le tenseur de perméabilité à l'eau effective obtenu par Szymkiewicz et Burzyński, (2005) est : $\mathbf{K}^{\text{hom}} = \mathbf{0.308 K}_1$ avec K_1 est la conductivité hydraulique du milieu Ω_1 .

Passons maintenant à la modélisation de cet exemple à l'aide de COMSOL Multiphysics. L'analogie entre les équations en χ et celles de COMSOL conduit à :

- $e_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ en s^2/m^2
- $d_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ en s/m^2

- $\mathbf{u} = \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \chi_3 \end{pmatrix}$
- $\mathbf{c} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$
- $\boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ en 1/m
- $\boldsymbol{\gamma} = \begin{pmatrix} 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} \end{pmatrix}$ en 1/m
- $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial y_1}, \frac{\partial}{\partial y_2}, \frac{\partial}{\partial y_3} \right)$
- $\mathbf{f} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ en 1/m²

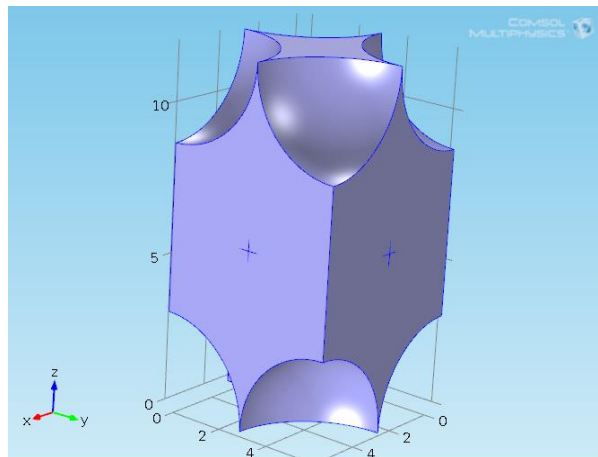


Figure A3. 6 : Modélisation du VER sous COMSOL Multiphysics de $6.4 \times 6.4 \times 12$ cm³

La solution obtenue à l'aide de COMSOL est présentée dans la figure suivante :

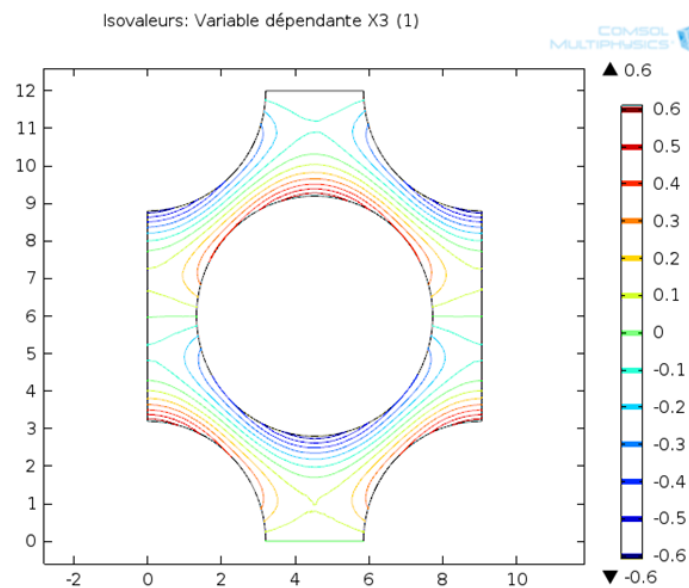


Figure A3. 7 : Solution du problème local, fonction χ_3 obtenue à l'aide du logiciel COMSOL

Après avoir calculé la moyenne de χ_3 à l'aide du logiciel COMSOL, le tenseur de perméabilité à l'eau homogénéisé est $\mathbf{K}^{\text{hom}} = 0.309 \times \mathbf{k}_1$. En analysant les résultats de [Szymkiewicz et Burzyński \(2005\)](#) et ceux de notre simulation sur COMSOL Multiphysics, on remarque un écart de l'ordre de 0.3% entre eux.

2- Transfert d'eau liquide

Le transfert d'eau liquide dans les milieux poreux partiellement saturés est régi par l'équation de Richards qui est définie comme suit :

$$\frac{\partial n S_w}{\partial t} - \text{div} \left(\frac{K_w}{\mu} \text{grad}(p_w + \rho_w g x_3) \right) = 0 \quad (\text{A3.5})$$

Avec

- n : porosité
- S_w : degré de saturation du milieu
- t : temps (s)
- K_w : perméabilité à l'eau liquide (m^2)
- μ : viscosité dynamique (Pa. s)
- p_w : pression à l'eau liquide (Pa)
- ρ_w : masse volumique de l'eau liquide (kg/m^3)
- g : accélération de pesanteur (m/s^2)

Equations de transfert d'eau liquide au niveau de la matrice et des fibres

Les équations de transfert hydrique au niveau des deux composants matrice solide (m) et fagots de fibres (f) sont les suivantes :

$$\frac{\partial \theta_w^m}{\partial p_w^m} \frac{\partial p_w^m}{\partial t} - \text{div} \left(\frac{K_w^m}{\mu} \text{grad}(p_w^m + \rho_w g y_3) \right) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (\text{A3.6})$$

où $\theta_w^m = n_m S_w^m =$ fraction de l'eau dans le domaine Ω_m

$$\frac{\partial \theta_w^f}{\partial p_w^f} \frac{\partial p_w^f}{\partial t} - \text{div} \left(\frac{K_w^f}{\mu} \text{grad}(p_w^f + \rho_w g y_3) \right) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (\text{A3.7})$$

où $\theta_w^f = n_f S_w^f =$ fraction de l'eau dans le domaine Ω_f

Les conditions d'interface sont :

$$p_w^f = p_w^m \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.8})$$

$$K_w^m \text{ grad}(p_w^m + \rho_w g y_3) N = K_w^f \text{ grad}(p_w^f + \rho_w g y_3) N \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.9})$$

Analyse adimensionnelle

Dans cette partie, on s'intéresse à l'adimensionnalisation des paramètres du problème. Les paramètres adimensionnels sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} \Theta_v &= \Theta_v^* \times \Theta_v^c, \quad t = t^* \times t^c, \quad p_w = p_w^* \times p_w^c, \quad k_w = k_w^* \times k_w^c, \quad \mu = \mu^* \times \mu_c, \quad y = \\ &y^* \times l_c, \quad x = x^* \times L_c \end{aligned} \quad (\text{A3.10})$$

On définit le temps caractéristique $t^c = \frac{\Theta_w^{f*} L_c^2 \mu}{p_w^{f*} k_w^{*f}}$ en [s] qui représente le temps caractéristique de diffusion d'eau liquide dans le fagot de fibres et $\frac{D_m^c}{D_f^c} = \frac{k_w^{m*} p_w^{m*} \mu \Theta_w^{f*}}{\mu \Theta_w^{m*} k_w^{f*} p_w^{f*}} = \mathcal{O}(\varepsilon^2)$. Il représente le rapport entre le coefficient de diffusion d'eau liquide dans la matrice solide D_m^c [m²/s] et le coefficient de diffusion d'eau liquide dans le fagot de fibres D_f^c [m²/s].

En remplaçant les paramètres adimensionnels dans l'équation de Richards aux deux échelles matrice et fibres et en tenant compte des conditions à l'interface, on obtient :

$$\tau_w^m \frac{\partial \Theta_w^{m*}}{\partial p_w^{m*}} \frac{\partial p_w^{m*}}{\partial t^*} - \text{div}^* \left(\frac{k_w^{*m}}{\mu} \text{grad}^* (p_w^{m*} + \varepsilon \rho_w g y_3) \right) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (\text{A3.11})$$

$$\tau_w^f \frac{\partial \Theta_w^{f*}}{\partial p_w^{f*}} \frac{\partial p_w^{f*}}{\partial t^*} - \text{div}^* \left(\frac{k_w^{*f}}{\mu} (\text{grad}^* (p_w^{f*} + \varepsilon \rho_w g y_3)) \right) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (\text{A3.12})$$

$$p_w^{f*} = p_w^{m*} \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.13})$$

$$\left(\frac{k_w^{*f}}{\mu} \text{grad}(p_w^f + \varepsilon \rho_w g y_3) \right) N = \zeta \left(\frac{k_w^{*m}}{\mu} \text{grad}(p_w^m + \varepsilon \rho_w g y_3) \right) N \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.14})$$

Avec :

- $\tau_w^f = \frac{\Theta_w^{f*} l_c^2 \mu}{p_w^{f*} k_w^{*f} t^c} = \mathcal{O}(\varepsilon^2)$
- $\tau_w^m = \frac{\Theta_w^{m*} l_c^2 \mu}{p_w^{m*} k_w^{*m} t^c} = \mathcal{O}(\varepsilon^0)$
- $\zeta = \frac{k_w^{*m} l_c p_w^{m*}}{p_w^{f*} l_c k_w^{*f}} = \mathcal{O}(\varepsilon^2)$

Les équations de transfert d'eau liquide à l'échelle de la matrice solide et les fagots de fibres deviennent :

$$\varepsilon^0 C_w^{m*} \frac{\partial p_w^{m*}}{\partial t^*} - \operatorname{div}^* \left(\frac{k_w^{*m}}{\mu} \operatorname{grad}^* (p_w^{m*} + \varepsilon \rho_w g y_3) \right) = 0 \quad \text{sur } \Omega_m \quad \text{avec } C_w^{m*} = \frac{\partial \theta_w^{m*}}{\partial p_w^{m*}} \quad (\text{A3.15})$$

$$\varepsilon^2 C_w^{f*} \frac{\partial p_w^{f*}}{\partial t^*} - \operatorname{div}^* \left(\frac{k_w^{*f}}{\mu} \operatorname{grad}^* (p_w^{f*} + \varepsilon \rho_w g y_3) \right) = 0 \quad \text{dans } \Omega_f \quad (\text{A3.16})$$

$$\text{avec } C_w^{f*} = \frac{\partial \theta_w^{f*}}{\partial p_w^{f*}}$$

Les conditions aux limites associées sur l'interface matrice solide/fagot $\Gamma_{m/f}$ sont données par :

$$p_w^{f*} = p_w^{m*} \quad \text{sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.17})$$

$$\frac{k_w^{*m}}{\mu} \operatorname{grad}^* (p_w^{m*} + \varepsilon \rho_w g y_3) N = \varepsilon^2 \left(\frac{k_w^{*f}}{\mu} \operatorname{grad}^* (p_w^{f*} + \varepsilon \rho_w g y_3) \right) N \quad \text{sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.18})$$

Développement asymptotique

La méthode d'homogénéisation est basée sur l'analyse adimensionnelle et le développement asymptotique en puissances du petit paramètre ε qui permet de ramener le problème de l'échelle locale à l'échelle macroscopique.

$$C_w^{\gamma*} (x, y, t^*) = \varepsilon^0 C_w^{\gamma 0*} (x, y, t^*) + \varepsilon^1 C_w^{\gamma 1*} (x, y, t^*) + \varepsilon^2 C_w^{\gamma 2*} (x, y, t^*) + \dots \quad (\text{A3.19})$$

$$p_w^{\gamma*} (x, y, t^*) = \varepsilon^0 p_w^{\gamma 0*} (x, y, t^*) + \varepsilon^1 p_w^{\gamma 1*} (x, y, t^*) + \varepsilon^2 p_w^{\gamma 2*} (x, y, t^*) + \dots \quad (\text{A3.20})$$

$$k_w^{\gamma*} (x, y, t^*) = \varepsilon^0 k_w^{\gamma 0*} (x, y, t^*) + \varepsilon^1 k_w^{\gamma 1*} (x, y, t^*) + \varepsilon^2 k_w^{\gamma 2*} (x, y, t^*) + \dots \quad (\text{A3.21})$$

Où $\gamma = m$ ou f .

$$\bullet \quad \operatorname{grad}^* = \frac{\partial}{\partial y} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \quad (\text{A3.22})$$

$$\bullet \quad \operatorname{div}^* = \operatorname{div}_y^* + \varepsilon \operatorname{div}_x^* \quad (\text{A3.23})$$

Problème P_0 à l'ordre de ε^0

En ne gardant que les termes d'ordre ε^0 , on obtient le problème P_0 qui est défini comme suit :

$$C_w^{m 0*} \frac{\partial p_w^{m 0*}}{\partial t^*} - \operatorname{div}_y^* \left(\frac{k_w^{m 0*}}{\mu} \frac{\partial p_w^{m 0*}}{\partial y} \right) = 0 \quad \text{dans } \Omega_m \quad (\text{A3.24})$$

$$\operatorname{div}_y^* \left(\frac{k_w^{f 0*}}{\mu} \frac{\partial p_w^{f 0*}}{\partial y} \right) = 0 \quad \text{dans } \Omega_f \quad (\text{A3.25})$$

$$\left(\frac{k_w^{f 0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f 0*}}{\partial y} + \rho_w g l \right) \right) N = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.26})$$

D'après Auriault (1991) ; Lewandowaska et al. (2004) ; Szymkiewicz et Burzyński (2005) ; Mchirgui et al. (2010) ; Bennai et al. (2016), la solution du problème P_0 est :

$$p_w^{f0*}(x, y, t) = p_w^{f0*}(x, t) : p_w^{f0*} \text{ est } y\text{-périodique et ne dépend que des variables 'x' et 't*'.} \quad (A3.27)$$

Problème P_1 à l'ordre de ε^1

En ne gardant que les termes d'ordre ε^1 , on obtient le problème P_1 qui est défini comme suit :

$$\operatorname{div}_y^* \left(\frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial y} + \rho_w g I \right) + \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} \right) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (A3.28)$$

$$\frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial y} + \rho_w g I \right) + \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} N = 0 \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (A3.29)$$

D'après Auriault (1991) ; Lewandowaska et al. (2004) ; Szymkiewicz et Burzyński (2005) ; Mchirgui et al. (2010) ; Bennai et al. (2016), la solution est :

$$p_w^{f1*}(x, y, t^*) = \overline{p_w^{f1*}(x, t^*)} + \chi(y) \left(\frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} + \rho_w g I \right) \quad (A3.30)$$

$\overline{p_w^{f1*}(x, t^*)}$ est une fonction arbitraire qui ne dépend pas de la variable locale y et $\chi(\chi_1, \chi_2, \chi_3)$ est un vecteur y -périodique défini par la moyenne nulle sur le domaine du VER Ω $\langle \chi(y) \rangle = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \chi \, d\Omega = 0$ et solution du système d'équations suivant :

$$\operatorname{div}_y^* \left(k_w^{f0*} \left(I + \frac{\partial \chi}{\partial y} \right) \right) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (A3.31)$$

$$k_w^{f0*} \left(I + \frac{\partial \chi}{\partial y} \right) N = 0 \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (A3.34)$$

Problème P_2 à l'ordre de ε^2

En ne gardant que les termes d'ordre ε^2 , on obtient le problème P_2 qui est défini comme suit :

$$C_w^{f0*} \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial t^*} - \operatorname{div}_y^* \left(\frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f2*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f1*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f1*}}{\mu} \rho_w g I \right) - \operatorname{div}_x^* \left(\frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f0*}}{\mu} \rho_w g I \right) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (A3.35)$$

$$\left(\frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f2*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f1*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f1*}}{\mu} \rho_w g I \right) N = \left(\frac{k_w^{m0*}}{\mu} \frac{\partial p_w^{m0*}}{\partial y} \right) N \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (A3.36)$$

L'équation macroscopique de transfert d'eau liquide dans la terre crue renforcée par des fagots de fibres de lin est obtenue en moyennant l'équation (A3.35) sur Ω_f :

$$\langle C_w^{f0*} \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial t^*} \rangle - \langle \text{div}_y \left(\frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f2*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f1*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f1*}}{\mu} \rho_w \mathbf{g} \mathbf{I} \right) \rangle - \langle \text{div}_x \left(\frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f0*}}{\mu} \rho_w \mathbf{g} \mathbf{I} \right) \rangle = 0 \quad (\text{A3.37})$$

Où :

$$\langle C_w^{f0*} \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial t^*} \rangle = \langle C_w^{f0*} \rangle \frac{\partial p_w^{f0}}{\partial t^*} = C_w^{\text{hom}}(p_w^{f0}) \frac{\partial p_w^{f0}}{\partial t^*} = C_w^{f0} \frac{|\Omega_f|}{|\Omega|} \frac{\partial p_w^{f0}}{\partial t^*} \quad (\text{A3.38})$$

$$\text{Avec } C_w^{\text{hom}} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_f} C_w^{f0*} d\Omega = C_w^{f0} \frac{|\Omega_f|}{|\Omega|} = C_w^{f0} v_f$$

En appliquant le théorème de divergence sur le deuxième terme de l'équation précédente, on trouve :

$$\begin{aligned} & \langle \text{div}_y \left(\frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f2*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f1*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f1*}}{\mu} \rho_w \mathbf{g} \mathbf{I} \right) \rangle \\ &= \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{m/f}} \left(\frac{k_w^{m0*}}{\mu} \frac{\partial p_w^{m0*}}{\partial y} \right) N d\Gamma \\ &= \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_m} C_w^{m0*} \frac{\partial p_w^{m0*}}{\partial t^*} d\Omega \\ &= \langle C_w^{m0*} \frac{\partial p_w^{m0*}}{\partial t^*} \rangle \end{aligned} \quad (\text{A3.39})$$

Pour le troisième terme, rappelons que :

$$p_w^{f1*}(x, y, t^*) = \overline{p_w^{f1*}(x, t^*)} + \chi(y) \left(\frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} + \rho_w \mathbf{g} \mathbf{I} \right) \quad (\text{A3.40})$$

$$\Leftrightarrow \frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f0*}}{\mu} \rho_w \mathbf{g} \mathbf{I} = \frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + \mathbf{I} \right) \left(\frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} + \rho_w \mathbf{g} \mathbf{I} \right)$$

$$\Leftrightarrow \langle \text{div}_x \left(\frac{k_w^{f0*}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f1*}}{\partial y} + \frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} \right) + \frac{k_w^{f0*}}{\mu} \rho_w \mathbf{g} \mathbf{I} \right) \rangle = \text{div}_x \left(\frac{k_w^{\text{eq}}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} + \rho_w \mathbf{g} \mathbf{I} \right) \right)$$

Avec $k_w^{\text{eq}} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_f} k_w^{f0*} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + \mathbf{I} \right) d\Omega$: tenseur de perméabilité à l'eau liquide homogénéisé macroscopique.

On obtient finalement l'équation macroscopique de transfert d'eau liquide dans la terre renforcée par des fibres de lin :

$$C_w^{\text{hom}} \frac{\partial p_w^{f0}}{\partial t^*} - \text{div}_x \left(\frac{k_w^{\text{eq}}}{\mu} \left(\frac{\partial p_w^{f0*}}{\partial x} + \rho_w \mathbf{g} \mathbf{I} \right) \right) - \langle C_w^{m0*} \frac{\partial p_w^{m0*}}{\partial t^*} \rangle = 0 \quad (\text{A3.41})$$

Nous pouvons observer que l'équation macroscopique (A3.41) contient un terme source ($\langle C_w^{m0*} \frac{\partial p_w^{m0*}}{\partial t^*} \rangle$) qui est dû à l'interaction du sous-domaine Ω_f avec le sous-domaine Ω_m . Pour déterminer ce terme source, nous devons résoudre l'équation (A3.24) en Ω_m et qui est défini

comme la quantité d'eau liquide stockée par la matrice poreuse Ω_m et transférée aux faisceaux de fibres de lin Ω_f .

Résolution du problème local

La résolution numérique du problème local sur Ω_f donne : $\frac{1}{|\Omega_f|} \int_{\Omega_f} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + 1 \right) d\Omega = 1$, ce qui permet d'écrire la perméabilité équivalente à l'eau liquide comme suit :

$$k_w^{eq} = \frac{1}{|\Omega_f|} \int_{\Omega_f} k_w^{f0*} \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + 1 \right) d\Omega = \frac{|\Omega_f|}{|\Omega|} k_w^{f0} = v_f k_w^{f0} \quad (A3.42)$$

Où v_f est la fraction volumique des fibres de lin dans la matrice terre.

3- Transfert thermique

Conservant le même modèle de la terre crue renforcée par des fagots de fibres de lin présenté précédemment (voir **Figure VI. 1**), le transfert thermique à travers ce matériau est régi par l'équation de continuité de chaleur définie comme suit :

$$\rho_0 c_0 \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div} (\lambda \text{ grad}(T)) = 0 \text{ dans } \Omega \quad (A3.43)$$

Avec

- ρ_0 : densité sèche du matériau [kg/m^3]
- c_0 : capacité thermique massique du matériau à l'état sec [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]
- T : température [$^\circ\text{C}$]
- λ : conductivité thermique du matériau [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
- t : temps [s]

Equations de transfert de chaleur au niveau de la matrice et des fibres

L'équation de continuité (A3.43) doit être écrite à l'échelle des deux constituants du matériau composite terre-fibres de lin :

Au niveau de la matrice terre (m) :

$$\rho_0^m c_0^m \frac{\partial T^m}{\partial t} - \text{div} (\lambda^m \text{ grad}(T^m)) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (A3.44)$$

Au niveau des fibres de lin (f) :

$$\rho_0^f c_0^f \frac{\partial T^f}{\partial t} - \text{div} (\lambda^f \text{grad}(T^f)) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (\text{A3.45})$$

Conditions aux limites :

$$T^m = T^f \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.46})$$

$$(\lambda^m \text{grad}(T^m)) N = (\lambda^f \text{grad}(T^f)) N \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.47})$$

Analyse adimensionnelle

Dans cette partie, on s'intéressera à l'adimensionnalisation des paramètres du problème. Les paramètres adimensionnels sont définis comme suit :

$$\rho = \rho^* \times \rho^c, t = t^* \times t^c, c = c^* \times c^c, T = T^* \times T^c, \lambda = \lambda^* \times \lambda^c, y = y^* \times l_c, x = x^* \times L_c \quad (\text{A3.48})$$

En remplaçant les paramètres adimensionnels dans les deux équations (A3.44), (A3.45), et (A3.47), on trouve :

$$\tau_1^m (\rho_0^{m*} c_0^{m*} \frac{\partial T^{m*}}{\partial t}) - \tau_2^m \text{div} (\lambda^{m*} \text{grad}(T^{m*})) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (\text{A3.49})$$

$$\tau_1^f (\rho_0^{f*} c_0^{f*} \frac{\partial T^{f*}}{\partial t}) - \tau_2^f \text{div} (\lambda^{f*} \text{grad}(T^{f*})) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (\text{A3.50})$$

$$T^{m*} = T^{f*} \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.51})$$

$$(\lambda^{m*} \text{grad}(T^{m*})) N = \psi (\lambda^{f*} \text{grad}(T^{f*})) N \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.52})$$

D'après les résultats expérimentaux présentés dans le chapitre III, paragraphes III. 2. 2 et III. 3. 2 :

$$\frac{\tau_1^m}{\tau_2^m} = \frac{\rho_0^{mc} c_0^{mc} L_c^2}{t^c \lambda^{mc}} = \frac{1.398 \times 10^6 \times 0.01^2}{11340 \times 0.761} = 0.016 = O(\varepsilon^2) \quad (\text{A3.53})$$

$$\frac{\tau_1^f}{\tau_2^f} = \frac{\rho_0^{fc} c_0^{fc} L_c^2}{t^c \lambda^{fc}} = \frac{0.759 \times 10^6 \times 0.01^2}{2160 \times 0.0427} = 0.8 = O(1) \quad (\text{A2.54})$$

$$\Psi = \frac{\lambda^{fc}}{\lambda^{mc}} = \frac{0.0427}{0.761} = 0.056 = O(\varepsilon^2) \quad (\text{A3.55})$$

Finalement les équations (A3.49), (A3.50) et (A3.52) deviennent :

$$\varepsilon^2 (\rho_0^{m*} c_0^{m*} \frac{\partial T^{m*}}{\partial t}) - \text{div} (\lambda^{m*} \text{grad}(T^{m*})) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (\text{A3.56})$$

$$\rho_0^{f*} c_0^{f*} \frac{\partial T^{f*}}{\partial t} - \text{div} (\lambda^{f*} \text{grad}(T^{f*})) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (\text{A3.57})$$

$$T^{m*} = T^{f*} \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.58})$$

$$(\lambda^{m*} \text{grad}(T^{m*})) N = \varepsilon^2 (\lambda^{f*} \text{grad}(T^{f*})) N \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.59})$$

Développement asymptotique

La méthode d'homogénéisation est basée sur l'analyse adimensionnelle et le développement asymptotique en puissances du petit paramètre ε qui permet de ramener le problème de l'échelle locale à l'échelle macroscopique.

$$\rho_\gamma^*(x, y, t^*) = \varepsilon^0 \rho_\gamma^{0*}(x, y, t^*) + \varepsilon^1 \rho_\gamma^{1*}(x, y, t^*) + \varepsilon^2 \rho_\gamma^{2*}(x, y, t^*) + \dots \quad (\text{A3.60})$$

$$c_\gamma^*(x, y, t^*) = \varepsilon^0 c_\gamma^{0*}(x, y, t^*) + \varepsilon^1 c_\gamma^{1*}(x, y, t^*) + \varepsilon^2 c_\gamma^{2*}(x, y, t^*) + \dots \quad (\text{A3.61})$$

$$T_\gamma^*(x, y, t^*) = \varepsilon^0 T_\gamma^{0*}(x, y, t^*) + \varepsilon^1 T_\gamma^{1*}(x, y, t^*) + \varepsilon^2 T_\gamma^{2*}(x, y, t^*) + \dots \quad (\text{A3.62})$$

$$\lambda_\gamma^*(x, y, t^*) = \varepsilon^0 \lambda_\gamma^{0*}(x, y, t^*) + \varepsilon^1 \lambda_\gamma^{1*}(x, y, t^*) + \varepsilon^2 \lambda_\gamma^{2*}(x, y, t^*) + \dots \quad (\text{A3.63})$$

Problème P_0 à l'ordre de ε^0

En ne gardant que les termes d'ordre ε^0 , on obtient le problème P_0 qui est défini comme suit :

$$\text{div}_y (\lambda^{m0*} \frac{\partial T^{m0*}}{\partial y}) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (\text{A3.64})$$

$$\rho_0^{f0*} c_0^{f0*} \frac{\partial T^{f0*}}{\partial t} - \text{div}_y (\lambda^{f0*} \frac{\partial T^{f0*}}{\partial y}) = 0 \text{ dans } \Omega_f \quad (\text{A3.65})$$

$$T^{m0*} = T^{f0*} \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.66})$$

$$(\lambda^{m0*} \frac{\partial T^{m0*}}{\partial y}) N = 0 \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.67})$$

La solution du problème P_0 comme a été montré dans les travaux de [Auriault \(1991\)](#) ; [Lewandowska et al. \(2004\)](#) ; [Szymkiewicz et Burzyński \(2005\)](#) ; [Mchirgui et al. \(2010\)](#) ; [Bennai et al. \(2016\)](#) est la fonction $T^{f0*}(x, y, t) = T^{f0*}(x, t)$ qui une fonction y -périodique dépendant de la variable macroscopique x .

Problème P_1 à l'ordre de ε^1

En ne gardant que les termes d'ordre ε^1 , on obtient le problème P_1 défini comme suit :

$$\operatorname{div}_y^* (\lambda^{m0*} (\frac{\partial T^{m1*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x})) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (\text{A3.68})$$

$$T^{m1*} = T^{f1*} \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.69})$$

$$(\lambda^{m0*} (\frac{\partial T^{m1*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x})) N = 0 \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.70})$$

La solution du problème (A3.68) - (A3.70) s'écrit classiquement sous la forme :

$$T^{m1*}(x, y, t) = \overline{T^{m1*}(x, t)} + \chi(y) \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x} \quad (\text{A3.71})$$

$\overline{T^{m1*}(x, t)}$, comme a été mentionné dans les paragraphes précédents, est une fonction arbitraire qui ne dépend pas de la variable locale y et $\chi(\chi_1, \chi_2, \chi_3)$ est un vecteur y -périodique défini par la moyenne nulle sur le domaine du VER Ω $\langle \chi(y) \rangle = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \chi \, d\Omega = 0$ et solution du système d'équations suivant :

$$\operatorname{div}_y^* (\lambda^{m0*} (I + \frac{\partial \chi}{\partial y})) = 0 \text{ dans } \Omega_m \quad (\text{A3.72})$$

$$\lambda^{m0*} (I + \frac{\partial \chi}{\partial y}) N = 0 \text{ sur } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.73})$$

Problème P_2 à l'ordre de ε^2

En ne gardant que les termes d'ordre ε^2 , on obtient le problème P_2 défini comme suit :

$$(\rho_0^{m0*} c_0^{m0*} \frac{\partial T^{m0*}}{\partial t}) - \operatorname{div}_y^* (\lambda^{m0*} (\frac{\partial T^{m2*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m1*}}{\partial x}) + \lambda^{m1*} (\frac{\partial T^{m1*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x})) - \quad (\text{A3.74})$$

$$\operatorname{div}_x^* (\lambda^{m0*} (\frac{\partial T^{m1*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x})) = 0 \text{ dans } \Omega_m$$

$$T^{m2*} = T^{f2*} \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.75})$$

$$(\lambda^{m0*} (\frac{\partial T^{m2*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m1*}}{\partial x}) + \lambda^{m1*} (\frac{\partial T^{m1*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x})) N = (\lambda^{f0*} \frac{\partial T^{f0*}}{\partial y}) N \text{ sur l'interface } \Gamma_{m/f} \quad (\text{A3.76})$$

L'équation macroscopique de transfert de chaleur dans la terre crue renforcée par des fagots de fibres de lin est obtenue en moyennant l'équation (A3.74) trouvée dans le problème P_2 précédent :

$$\langle \rho_0^{m0*} c_0^{m0*} \frac{\partial T^{m0*}}{\partial t} \rangle - \langle \operatorname{div}_y^* (\lambda^{m0*} (\frac{\partial T^{m2*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m1*}}{\partial x}) + \lambda^{m1*} (\frac{\partial T^{m1*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x})) \rangle - \quad (\text{A3.77})$$

$$\langle \operatorname{div}_x^* (\lambda^{m0*} (\frac{\partial T^{m1*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x})) \rangle = 0 \text{ dans } \Omega_m$$

Où

$$\langle \rho_0^{m0*} c_0^{m0*} \frac{\partial T^{m0*}}{\partial t} \rangle = \rho_0^{m0} c_0^{m0} \frac{\partial T^{m0}}{\partial t} \text{ parce que } T^{m0*} \text{ est une fonction } \quad (\text{A3.78})$$

macroscopique ne dépend que de x .

$$\langle \text{div}_y^* (\lambda^{m0*} (\frac{\partial T^{m2*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m1*}}{\partial x}) + \lambda^{m1*} (\frac{\partial T^{m1*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x})) \rangle \quad (\text{A3.79})$$

$$= \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{\frac{m}{f}}} (\lambda^{f0*} \frac{\partial T^{f0*}}{\partial y}) N D\gamma$$

$$= \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_f} (\rho_0^{f0*} c_0^{f0*} \frac{\partial T^{f0*}}{\partial t}) d\Omega$$

$$= \rho_0^{f0} c_0^{f0} \langle \frac{\partial T^{f0*}}{\partial t} \rangle$$

$$\langle \text{div}_x^* (\lambda^{m0*} (\frac{\partial T^{m1*}}{\partial y} + \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x})) \rangle \quad (\text{A3.80})$$

$$= \langle \text{div}_x (\lambda^{m0} (\frac{\partial \chi}{\partial y} + I) \frac{\partial T^{m0*}}{\partial x}) \rangle$$

$$= \text{div}_x (\lambda^{eq} \frac{\partial T^{m0}}{\partial x})$$

avec

$$\lambda^{eq} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_f} \lambda^{m0} (\frac{\partial \chi}{\partial y} + I) d\Omega : \text{ la conductivité thermique homogénéisée macroscopique.}$$

Finalement, si on substitue les termes (A3.78), (A3.79) et (A3.80) dans l'équation macroscopique (A3.77), on obtient l'équation macroscopique de transfert thermique dans un la terre renforcée par des fibres de lin :

$$\rho_0^{m0} c_0^{m0} \frac{\partial T^{m0}}{\partial t} - \text{div}_x (\lambda^{eq} \frac{\partial T^{m0}}{\partial x}) + \rho_0^{f0} c_0^{f0} \langle \frac{\partial T^{f0*}}{\partial t} \rangle = 0 \quad (\text{A3.81})$$

Annexe A4

Mesure de la succion à l'aide du psychromètre à effet Peltier

1- Principe

Le psychromètre est un dispositif qui permet de déterminer la succion des sols dans une plage variant de 200 kPa à 8 MPa, et ceci grâce à la mesure de l'humidité relative de l'air contenu dans les pores du sol. La loi de Kelvin relie l'humidité relative **HR** à la succion **s** :

$$s = \left(\frac{R T_0 \rho}{M} \right) \ln(\text{HR})$$

Avec

s : succion [Pa],

R : constante des gaz parfaits $R = 8.314 \text{ J/ (mol. K)}$

T₀ : température ambiante absolue [K]

ρ : masse volumique de l'eau [kg/m³]

M : masse molaire de l'eau [kg/mol]

HR : humidité relative [%]

Le psychromètre fonctionne en mode « point de rosée (Dew Point DP) ». Ce mode consiste à appliquer un courant de faible intensité pour refroidir la jonction de mesure du thermocouple (effet Peltier) jusqu'à la température de rosée **T_r** (**Figure A4. 1**). La différence de température (**T₀-T_r**) entre la température de référence **T₀** (jonction de référence) et la température de rosée **T_r** (jonction de mesure) est aussi liée à l'humidité relative et à la succion.

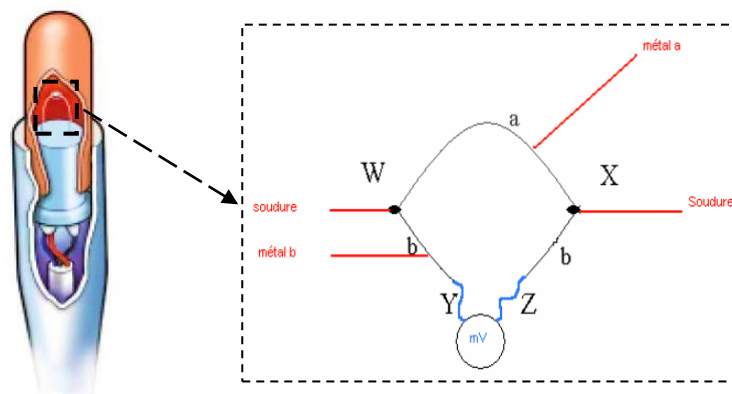


Figure A4. 1 : (a) Sonde psychrométrique et (b) Zoom de la jonction du thermocouple

Le thermocouple est composé de deux matériaux conducteurs de natures différentes a et b sont reliés par deux jonctions en X et W. Dans le cas de l'effet Seebeck, une différence de température $\Delta T = T_1 - T_2$ est engendrée entre W et X, cela entraîne l'apparition d'une différence de potentiel E entre Y et Z. L'importance et la direction du courant dépend de la différence de la température entre les jonctions et les propriétés des métaux utilisés dans le circuit.

Les deux grandeurs tension et température sont liées par le coefficient de Seebeck. Cette relation tension-température n'est pas toujours linéaire car le coefficient de Seebeck dépend de la température et de la nature du matériau. Si la différence de température entre les deux jonctions est dT et la différence de potentiel développée par le thermocouple est dV, le coefficient de Seebeck est $S = \frac{dV}{dT}$.

Une fois on insère la sonde psychrométrique dans le sol, le principe de mesure de la succion est détaillé ci-dessous :

1. Le thermocouple est d'abord refroidi par l'application d'un courant de refroidissement de 8mA d'intensité pour une durée déterminée. Cette durée est suffisamment longue pour baisser la température en dessous de la température du point de rosée. Cette baisse de température conditionne donc la condensation sur la jonction du thermocouple.
2. Suite à la condensation, le courant de refroidissement est coupé, ce qui permet au thermocouple de se réchauffer vers la température ambiante. Quand la température du bulbe humide de dépression est atteinte, le refroidissement dû à l'évaporation de l'eau sur la jonction va maintenir la température de la jonction constante. C'est le début du plateau de bulbe humide. Pour les sondes utilisées dans ce travail, ce plateau apparaît souvent quelques secondes après l'arrêt du refroidissement.
3. Après l'arrêt du courant de refroidissement, l'enregistrement du voltage est démarré. Un délai de 3 à 5 secondes est souvent suffisant pour s'assurer que la mesure est faite pendant la présence du plateau de bulbe humide. Une fois que la température du thermocouple est presque constante (pendant l'évaporation de l'eau qui vient de la jonction), plusieurs lectures peuvent être faites et on calcule la moyenne afin d'assurer la précision de la mesure. Pendant l'évaporation de l'eau de la jonction du thermocouple, la température du thermocouple continue à augmenter jusqu'à ce que la température ambiante soit atteinte.

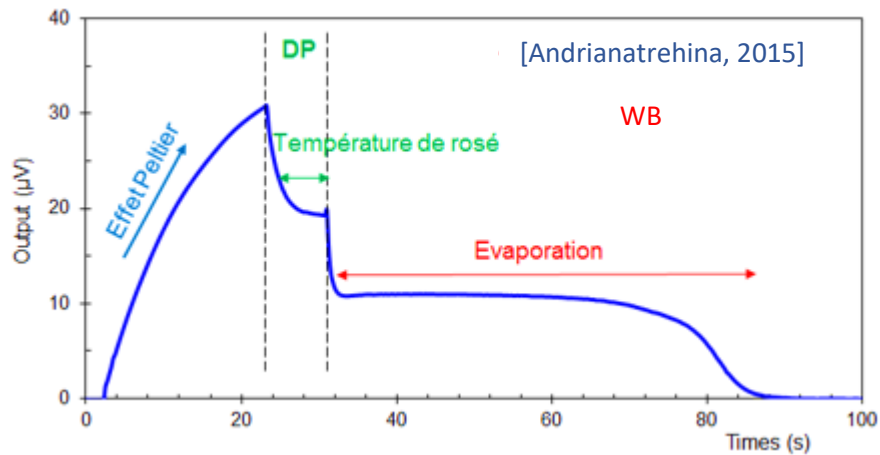


Figure A4. 2 : Evolution de la tension dans le thermocouple suivant l'effet Peltier

2- Dispositif expérimental : Cas du modèle PSYPRO

Le dispositif PSYPRO est composé d'une centrale d'acquisition permet une mesure autonome (sans ordinateur), et de sondes psychrométriques (**Figure A4.3**). La centrale est un accessoire indispensable puisqu'il sert à alimenter en même temps l'ensemble des sondes psychrométriques (8 au maximum) à acquérir, et à enregistrer toutes les données. La configuration peut être faite par ordinateur ou par cette centrale.

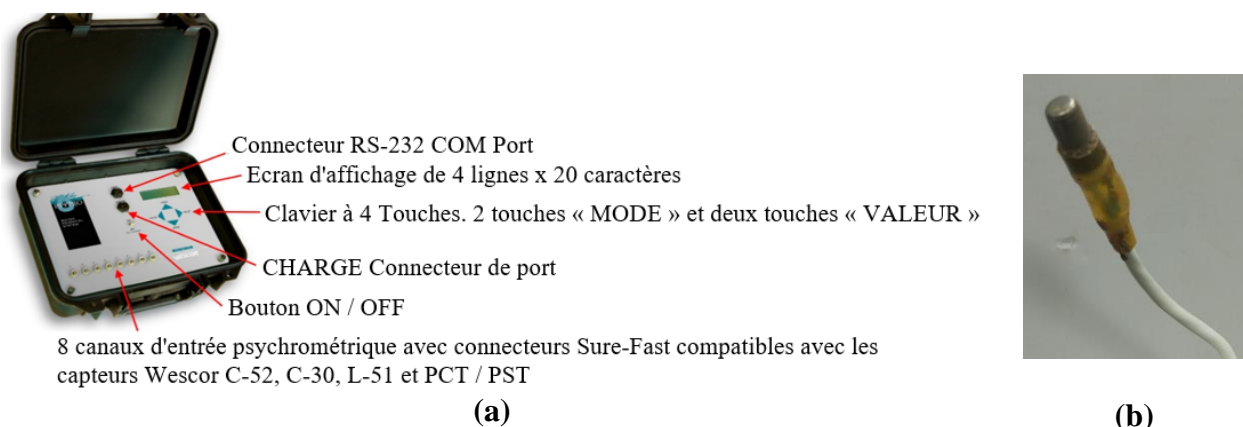


Figure A4. 3 : (a) Centrale d'acquisition du Psychromètre et (b) Sonde psychrométrique

Mode opératoire

1) Allumer le psychromètre (**Figure A4.4**)



Figure A4. 4 : Bouton ON/OFF du Psychromètre

2) Sur l'écran 1, on peut régler la date et l'heure, le contraste (**Figure A4.5**)

Par exemple pour régler l'année, le nombre de jour et l'heure, on utilise les touches « Mode » (▲ et ▼) servent comme des curseurs sur l'écran et le changement des valeurs se fait à l'aide des touches « Value » (◀ et ▶).

3) Sur l'écran 10, il faut choisir le numéro de la sonde (de 1 jusqu'à 8) et lancer la mesure en cliquant sur la touche « Value » (▶).

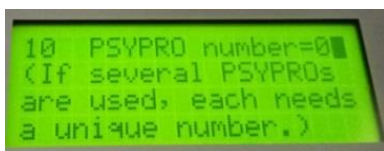


Figure A4. 5 : Ecran 10

4) Sur l'écran 3, on peut afficher les 50 dernières mesures effectuées par le dispositif Psychromètre (**Figure A4.6**)

- L'écran 3 permet de balayer manuellement les 50 lectures enregistrées après que la lecture effectuée à partir de l'écran 2 soit terminée.
- Passer d'un pas de temps à autre en utilisant la touche VALUE.
- Pour chaque pas de temps une lecture du capteur en μV s'affiche.



Figure A4. 6 : Ecran 3

Pour les autres écrans, on garde les paramètres définis par défaut

5) On peut récupérer les résultats de mesure de la succion sur un fichier Excel. Pour le faire, on doit suivre les étapes suivantes (**Figure A4.7**) :

- Installer le logiciel « **Wescor Water Potential System** » du Psychromètre sur un ordinateur
- On connecte le Psychromètre à l'ordinateur à l'aide d'un câble spécifique
- On lance le logiciel, on clique sur « File » et on clique sur « Open PSYPRO Settings » afin de connecter le Psychromètre à l'ordinateur

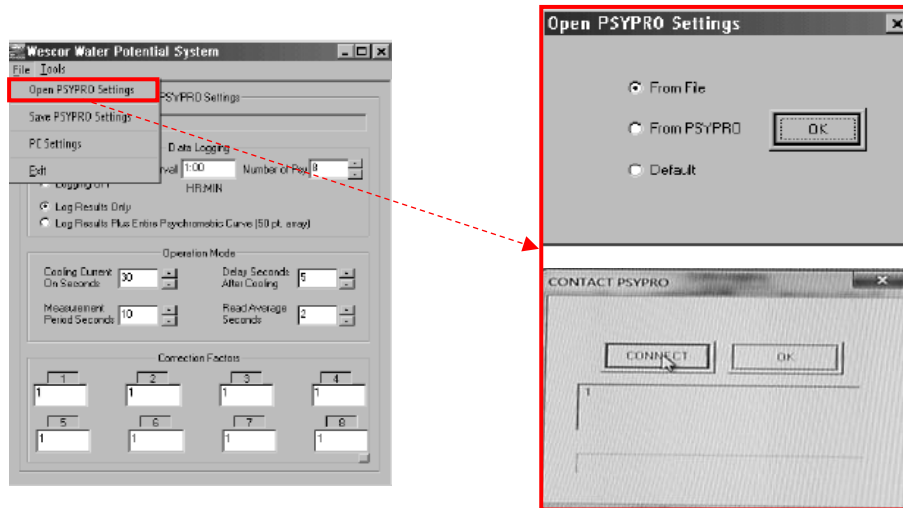


Figure A4.7 : Connexion du Psychromètre à l'ordinateur

- Ensuite, on clique sur « Tools » puis sur « Contact PSYPRO » afin de vérifier que la connexion est bien établie, une nouvelle fenêtre s'affiche, cliquer sur **CONNECT**
- Afin de sauvegarder et afficher les résultats enregistrés dans le Psychromètre sur un fichier Excel sur l'ordinateur, on clique sur « Tools » puis sur « Save PSYPRO Data » (**Figure A4.8**)

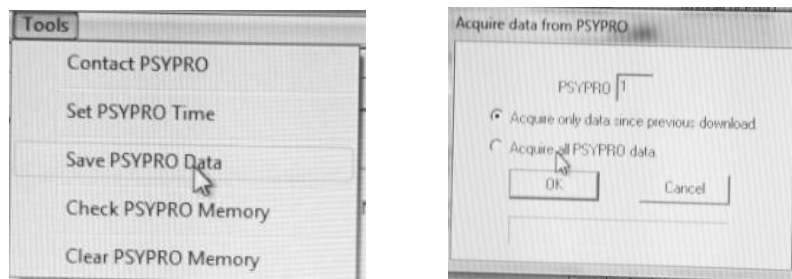


Figure A4.8 : Enregistrement des résultats du Psychromètre dans un fichier Excel

3- Etalonnage des sondes

Les essais d'étalonnage des sondes consistent à placer les sondes psychrométriques dans des tubes contenant des solutions saturées en NaCl (**Figure A4.9**). Le **Tableau A4.1** récapitule les

succions qui peuvent être imposées par les différentes molalités des solutions en NaCl et que nous les avons utilisées pour l'étalonnage des sondes.



Figure A4. 9 : Etalonnage des sondes psychrométriques à l'aide des solutions de NaCl

Tableau A4.8 : Solutions NaCl utilisées pour l'étalonnage des psychromètres

Molalité (Moles/1000 g _{eau})	Succion (MPa)
0.05	0.234
0.2	0.915
0.5	2.281
0.55	2.45
0.7	3.21
0.9	4.158
1.1	5.127
1.3	6.119
1.5	7.134
1.7	8.17

La **Figure A4. 10** présente un exemple de comparaison entre la succion de référence donnée par le **Tableau A4.1** (2.45 MPa) et celle mesurée expérimentalement avec une sonde psychrométrique. On remarque un bon accord entre les deux résultats ce qui met en évidence le bon fonctionnement de la sonde.

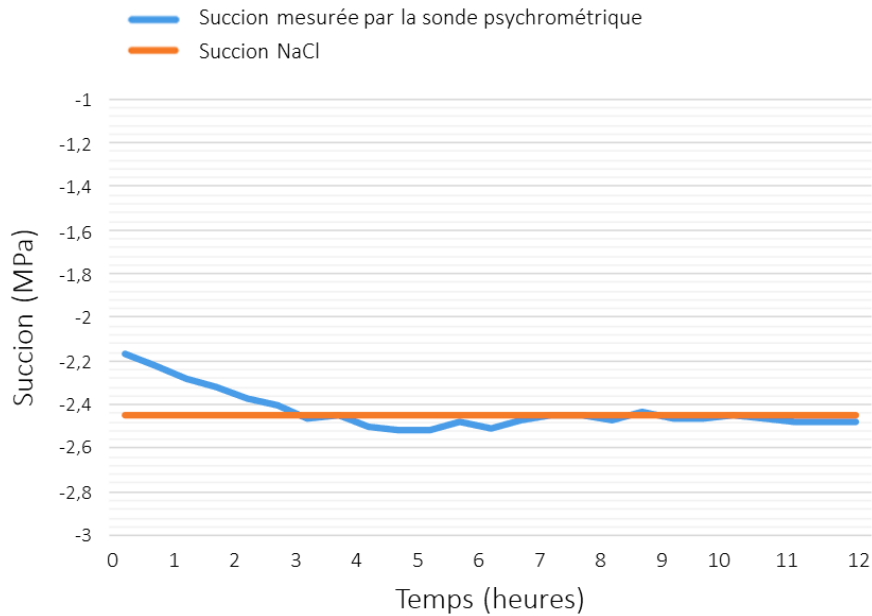


Figure A4. 10 : Résultats de l'essai d'étalonnage – Sonde 1

4- Conclusion

Le Psychromètre fonctionnant dans une gamme de succion comprise entre 200 kPa et 8 MPa, Ceci correspond à un domaine d'humidité de 100% à 94% respectivement.

Nous n'avons pas pu utiliser ce dispositif dans notre analyse des propriétés hygro-thermiques des matériaux à base de terre crue, et ce pour deux raisons :

- 1- L'humidité relative étudiée est plus large (0 à 100%)
- 2- La dimension de la sonde psychrométrique est imposante (voir Figure A4.11) et ne permet pas son insertion dans nos échantillons de 10 à 20 mm d'épaisseur sans perturbation. Nous avons par conséquent utilisé des sondes SHT40, plus adaptées en terme de gamme d'humidité relatives et de gabarit à nos échantillons comme cela est mentionné en détails dans le chapitre IV.

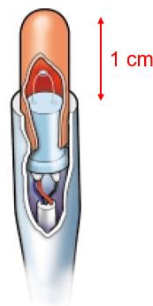


Figure A4. 11 : sonde psychrométrique

Références

A

Abbas, M-S. (2021). 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, École Nationale des Travaux Publics de l'État, Lyon, France, Thèse de doctorat,

Abdou. A-A, Budaiwi. I-M. Comparison of thermal conductivity measurements of building insulation materials under various operating temperatures, *J. Build. Phys.* 29 (2) (2005) 171–184. [DOI : 10.1177/1744259105056291](https://doi.org/10.1177/1744259105056291),

ADEME. Déchets Edition 2015. Technical report, 2015,

Alioua, T., Agoudjil, B., Chennouf, N., Boudenne, A., Benzarti, K. (2019). Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect. *Building and Environment*, 163, pp.106333. [10.1016/j.buildenv.2019.106333](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106333),

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>,

Allinson, D & Hall, M. (2012). Humidity buffering using stabilised rammed earth materials. *Construction Materials* Volume 165 Issue CM6. <https://doi.org/10.1680/coma.11.00023>,

Apelblat, A. (1993). The vapour pressures of saturated aqueous lithium chloride, sodium bromide, sodium nitrate, ammonium nitrate, and ammonium chloride at temperatures from 283 K to 313 K. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Volume 25, 63-71, <https://doi.org/10.1006/jcht.1993.1008>,

Apelblat, A et Korin, E. (1998). The vapour pressures of saturated aqueous solutions of sodium chloride, sodium bromide, sodium nitrate, sodium nitrite, potassium iodate, and rubidium chloride at temperatures from 227 K to 323 K. *J. Chem. Thermodynamics*, 30, 59-71, [DOI :10.1006/jcht.1997.0275](https://doi.org/10.1006/jcht.1997.0275),

Andrianatrehina, S.R., Li, Z., Taibi, S., Fleureau, J.M., Boutonnier, L. (2019). An improved unsaturated triaxial device to characterize the pore-water pressure and local volume change behavior of a compacted marl. *ASCE Geotechnical Testing Journal*. [DOI :10.1520/GTJ20190003](https://doi.org/10.1520/GTJ20190003),

Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S. (2015). Equilibrium moisture content of earth bricks biocomposites stabilized with cement and gypsum. *Cement and Concrete Composites*. 59, 18–25. [DOI : 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.005](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.005),

ASTM D5298-03, Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper,

ASTM D2487-11, Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 2012,

ASTM Standards on Soil Stabilization with Admixtures (2nd ed.). ASTM International, 1992

Auriault, J-L. (1991). Heterogeneous medium. Is an equivalent macroscopic description possible? *International Journal of Engineering Science*, 29, 785–95. [DOI:10.1016/0020-7225\(91\)90001-J](https://doi.org/10.1016/0020-7225(91)90001-J),

B

Barbosa, R-M., Mendes, N. (2008). Combined simulation of central HVAC systems with a whole-building hygrothermal model. *Energy and Buildings*, v.40(3), 276–288,

Ben Ayed, H., Limam, O., Aidi, M., Jelidi, A. (2016). Experimental and numerical study of Interlocking Stabilized Earth Blocks mechanical behavior. *Journal of Building Engineering*, 7 207–216. [DOI :10.1016/J.JOBE.2016.06.012](https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2016.06.012),

Ben Ayed, H. (2016). Etude expérimentale et numérique du comportement mécanique en compression des Blocs Autobloquants de Terre Stabilisée (BATS), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie, Thèse de doctorat,

Ben Mansour, M., Jelidi, A., Cherif, A-S., Ben Jabrallah., S. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials* 104 44–51. [DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024),

Bennai, F., Abahri, K., Belarbi, R., Tahakourt, A. (2016). Periodic homogenization for heat, air, and moisture transfer of porous building materials. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*. [DOI :10.1080/10407790.2016.1230393](https://doi.org/10.1080/10407790.2016.1230393),

Bennai, F. (2017). Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé Fares Bennai, Université de La Rochelle, La Rochelle, France, Thèse de doctorat,

Berardi, U., Naldi, M. The impact of the temperature dependent thermal conductivity of insulating materials on the effective building envelope performance, *Energy Build.* 144 (2017) 262–275. [DOI : 10.1016/j.enbuild.2017.03.052](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.052),

Bodian, S. (2019). Etude des propriétés mécaniques, thermophysiques et hygroscopiques d'un matériau en terre crue et d'un matériau en terre cuite à utiliser dans un bâtiment bioclimatique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar, Sénégal, Thèse de doctorat,

Bouddour, A., Auriault, J-L., Mhamdi Alaoui, M. (1998). Heat and mass transfer in wet porous media in presence of evaporation-condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41, No. 15, pp. 2263-2277. [DOI :10.1016/S0017-9310\(98\)00002-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(98)00002-7),

Boutin, C. (1996). Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé : Modélisation par méthode autocohérente. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 29(194), 609–615,

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., Ranganathan, M., Hoxha, D., Méo, S. (2017). Experimental assessment of hygrothermal properties of clay-sunflower (*heliantus 248 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,

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>,

Bruno, A-W. (2016). *Hygro-mechanical characterisation of hypercompacted earth for building construction*, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France, Thèse de doctorat

C

Casnedi, L., Cappai, M., Cincotti, A., Delogu, F., Pia, G. (2020). Porosity effects on water vapour permeability in earthen materials: Experimental evidence and modelling description. *Journal of Building Engineering*, 27, 100987, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100987>,

Cagnon, H., Aubert, J-E., Coutand, M., Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy Buildings*, 80, 208–217, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>,

Chabriac, P-A. (2014). *Mesure du Comportement hygrothermiques du pisé*, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon, France, Thèse de doctorat,

Chamoin, J. (2013). *Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation*, INSA de Rennes, Rennes, France, Thèse de doctorat,

Champiré, F. (2017). *Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction*, Université de Lyon, Lyon, France, Thèse de doctorat,

Champiré, F., Soudani, L., Fabbri, A., Morel, J-C., Woloszyn, M., Wong, H., Grillet, A-C., Cointet, S. (2014). *Le pisé, un atout pour la transition énergétique dans le bâtiment*. Forum francosuisse sur la transition énergétique dans le bâtiment, Université de Lausanne, Lyon, France,

Chang, W.-J & Weng, C.-I. (2000). An analytical solution to coupled heat and moisture diffusion transfer in porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 3621-3632. [DOI : 10.1016/S0017-9310\(00\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00003-X),

Collet, F. (2004). *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*, University of Rennes 1, Rennes, France, Thèse de doctorat,

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., 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. (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. (2014). Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall. *Building and Environment*, 82, 459-466. [DOI : 10.1016/j.buildenv.2014.09.018](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.018),

D

Da Cunha Neto, J-A-B. (1991). Transport d'humidité en matériau poreux en présence d'un gradient de température : caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, Thèse de doctorat,

Daheur, E.G., Taibi, S., Goual, I., Zhong-Sen Li, Z-S. (2021). Hydro-mechanical behavior from small strain to failure of tuffs amended with dune sand – Application to pavements design in Saharan areas. *Construction and Building Materials* 272. [DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2020.121948](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121948),

Dallel, M. (2012). Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*) : caractérisation physico-chimique de la fibre au fil Mohamed Dallel, Université de Haute Alsace-Mulhouse, Mulhouse, France, Thèse de doctorat,

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>,

Delage, P., Howat, M-D., Cui, Y-J. (1998). The Relationship Between Suction and Swelling Properties in a Heavily Compacted Unsaturated Clay. *Engineering Geology*, Vol. 50, No. 1/2, pp. 31-48. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)00083-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)00083-5),

Dondi, M., Principi, P., Raimondo, M., Zanarini, G. (2003). Water vapour permeability of clay bricks. *Construction and Building Materials* 17, 253–258, [DOI :10.1016/S0950-0618\(02\)00117-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00117-4),

Dong, W., Chen, Y., Bao, Y., Fang, A. (2020). A validation of dynamic hygrothermal model with coupled heat and moisture transfer in porous building materials and envelopes. *Journal of Building Engineering*, 32 101484. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101484>,

Driss, S. (2008). Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon, France, Thèse de doctorat,

Duperron, G & Roux, J-C. (2018). Les cloisons en torchis dans l'édifice en grand appareil de l'établissement de Saint-Martin-le-Bas à Gruissan. Roman architecture, 20 pages,

E

Eid, J., Taibi, S., Fleureau, J. M., & Hattab, M. (2015). Drying, cracks and shrinkage evolution of a natural silt intended for a new earth building material. Impact of reinforcement. *Construction and Building Materials*, 86, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.115>,

Eid, J. (2016). Élaboration d'un éco-géo-matériau à base de terre crue, Université Le Havre Normandie, Le Havre, France, Thèse de doctorat,

El Fgaier, F. (2013). Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue, Ecole Centrale de Lille, Lille, France, Thèse de doctorat,

El Fgaier, F., Lafhaj, Z., Chapiseau, Ch., Antczak, E. (2016). Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks. *Journal of Building Engineering* 6, 86-92, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.02.011>,

El Hajjar, A., Ouahbi, T., Taibi, S., Eid, J., Hattab, M., & Fleureau, J. M. (2021). Assessing crack initiation and propagation in flax fiber reinforced clay subjected to desiccation.

Construction and Building Materials, 278, 122392.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122392>,

Ezbakhe, H., Boussaid, S., El Bakkouri, A., Ajzoul, T., El Bouardi. A. (2000). Method of testing thermal conductivity at steady state for insulation materials • Polyurethane and hollow bricks results of the measurements. World Renewable Energy Congress VI, 2000, Pages 1788-1791. <https://doi.org/10.1016/B978-008043865-8/50373-1>,

F

Fabbri, A., Morel, J-C. (2016). Earthen materials and constructions. Nonconventional and Vernacular Construction Materials. [DOI : 10.1016/B978-0-08-100038-0.00010-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100038-0.00010-X),

Fang, L., Clausen, G., Fanger, P-O. (1998). Impact of temperature and humidity on perception of indoor air quality. Indoor Air, v.8, 80-90, [DOI : 10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x),

Ferroukhi, M. Y. (2016). Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l'humidité, Université de La Rochelle, La Rochelle, France, Thèse de doctorat,

G

Gallipoli, D., Bruno, A. W., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). A geotechnical perspective of raw earth building. Acta Geotechnica, 12(3), 463–478. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0521-1>,

Ghembaza, M-S. (2004). Étude du comportement thermo-hydro-mécanique des sols argileux soumis à une pression interstitielle négative, Université Le Havre Normandie, Le Havre, France, Thèse de doctorat,

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,

Gourlay, E., 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>,

H

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>,

Hibouche, A. (2013). Sols traités aux liants Performances hydro-mécaniques et hygrothermiques Applications en BTP, Université Le Havre Normandie, Le Havre, France, Thèse de doctorat,

Huang, Z., Sun, Y., Musso, F. Hygrothermal performance of natural bamboo fiber and bamboo charcoal as local construction infills in building envelope. (2018). *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.071>,

I

ISO 12572-2001 Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment-Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau, 2001,

L'IUPAC, International Union of Pure and Applied Chemistry,

J

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>,

K

Kallel, H. (2016). Influence de la température et de l'hygrométrie sur le comportement instantané du béton, [Université de Pau et des Pays de l'Adour](#), Pau, France, Thèse de doctorat,

Khoukhi, M. (2018). The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance. *Energy & Buildings*. DOI: [10.1016/j.enbuild.2018.03.055](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.055),

Koru. M. (2016). Determination of thermal conductivity of closed-cell insulation materials that depend on temperature and density, *Arabian Journal for Science and Engineering* volume, 41 (11), 4337–4346. DOI:[10.1007/S13369-016-2122-6](https://doi.org/10.1007/S13369-016-2122-6),

Künzel, H. (1995). *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation*, Fraunhofer IRBVerlag Stuttgart (ISBN 3-8167-4103-7),

L

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 & Buildings* 178, 265-278. DOI : [10.1016/j.enbuild.2018.08.021](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021),

Laurent, J.-P. (1986). Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, Thèse de doctorat,

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>,

Luikov, A-V. (1964). Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies, in: *Advances in Heat Transfer*, Elsevier, 1964: pp. 123–184. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065271708700984>,

Lewandowska, J., Szymkiewicz, A., Burzyński, K., (2004). Modeling of unsaturated water flow in double-porosity soils by the homogenization approach. *Advances in Water Resources*, 27, 283–296. DOI :[10.1016/j.advwatres.2003.12.004](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2003.12.004),

M

Mazhoud, B., Collet, F., Pretot, S., & Lanos, C. (2021). Effect of hemp content and clay stabilization on hygric and thermal properties of hemp-clay composites. *Construction and Building Materials*, 300, 123878. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123878>,

Mchirgui, W., Millet, O., Amiri, O. (2010). Numerical modeling of moisture transport using periodic homogenization. Application to cementitious materials. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics 00 : 1–17. [DOI :10.1002/nag.2315](https://doi.org/10.1002/nag.2315),

Mchirgui, W. (2012). Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique : Application aux matériaux cimentaires, Université de Le Rochelle, La Rochelle, France, Thèse de doctorat,

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>,

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>,

Mendes, N., Winkelmann, F-C., Lamberts, R., Philippi P-C. (2003). Moisture effects on conduction loads. Energy and Buildings, 35 (7), 631–644, [DOI 10.1016/S0378-7788\(02\)00171-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00171-8),

Morel, J-C., Mesbah, A., Oggero, M., P Walker, P. (2001). Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. Building and Environment, 36 :1119–1126, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00054-8),

Moulay Omar, H., Mekerta, B., Jarno, A., Imanzadeh, S., Alem, A., Taibi, S. (2021). Optimization of dune sand-based mixture material for pavement design. European Journal of Environmental and Civil Engineering (TECE). [DOI : 10.1080/19648189.2021.1877827](https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1877827),

N

NF P94-052-1. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration,

NF EN ISO 8990. Isolation thermique - Détermination des propriétés de transmission thermique en régime stationnaire - Méthode à la boîte chaude gardée et calibrée,

Ngohe-Ekam., P-S. (1992). Etude expérimentale des propriétés thermophysiques des bois tropicaux, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France, Thèse de doctorat,

O

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>,

Ouméziane, Y. A. (2013). Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre, INSA de Rennes, Rennes, France, Thèse de doctorat,

P

Padet, J., Cotta, R-M., Cherches, N-C, El Wakil, N. (2005). Convection laminaire interne : critères de sélection pour distinguer les régimes de convection naturelle, mixte ou forcée. 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2004 at Rio de Janeiro; Brazil,

Peuhkuri, R. (2003). Moisture dynamics in building envelopes, Université de Denmark, Denmark, Thèse de doctorat,

Phung, T-A. (2018). Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales, Université de Caen Normandie, Caen, France, Thèse de doctorat,

Philip, J., De Vries, D.A. (1957). Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients. Advances in Heat Transfer, 123-184, [DOI :10.1029/TR038I002P00222](https://doi.org/10.1029/TR038I002P00222),

Piattoni, Q., Quagliarini, E., Lenci, S. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. Construction and Building Materials, 25 2067–2075. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.039>,

Piot, A. (2009). Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique, INSA de Lyon, Lyon, France, Thèse de doctorat,

Q

Qin, M., Belarbi, R., Ait-Mokhtar, A., Nilsson, L-O. (2007). Nonisothermal moisture transport in hygroscopic building materials: modeling for the determination of moisture transport coefficients, *Transp Porous Med* 2008, Vol 72 (2), 255-271, [DOI: 10.1007/s11242-007-9148-x](https://doi.org/10.1007/s11242-007-9148-x),

R

Roudier, A. (2012). Analyse multi-échelle du comportement hygro-mécanique des fibres de lin. University Blaise Pascal - Clermont II, Clermont-Ferrand, France, Thèse de doctorat,

Rousseau, M-Z. (2003). Heat, Air and Moisture Control Strategies for Managing Condensation in Walls. BSI 2003 Proceedings, 1-11,

S

Saidi, M., Cherif, A-S., Zeghmami, B., Sediki, E. (2018). Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. *Construction and Building Materials* 167 566–577, [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063),

Simons, A., Laborel-Préneron, A., Bertron, A., Aubert, J-E., Magniont, C., Roux, C., Roques, C. (2015). Development of bio-based earth products for healthy and sustainable buildings : characterization of microbiological, mechanical and hygrothermal properties. *Matériaux & Techniques* 103, 206. [DOI : https://doi.org/10.1051/mattech/2015011](https://doi.org/10.1051/mattech/2015011),

Soudani. L. (2016). Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon, France, Thèse de doctorat,

Szymkiewicz, A., Burzyński, K. (2005). Numerical simulation of water drainage in double-porosity soils. *Studia Geotechnica et Mechanica* Vol. XXVII, 1–2,

T

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>,

Tessier, D. (1975). Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles. Université de Paris-Laboratoire de Géologie Appliquée, Paris, Thèse de doctorat,

Trabelsi, A. (2010). Etude numérique et expérimentale des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction, Université de La Rochelle, La Rochelle, France, Thèse de doctorat,

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>,

U

Unver, R., Akdag, N., Gedik, G., Ozturk, L., and Karabiber, Z. (2004). Prediction of building envelope performance in the design stage : an application for office buildings. Build. Environ. 39, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.08.014>,

V

Vaitkus, S., Karpavičiūtė, R., Vėjelis, S., Lekūnaitė, L. (2014). Development and Research of Thermal Insulation Materials from Natural Fibres. Key Engineering Materials Vol. 604 pp 285-288, [DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.604.285](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.604.285),

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>,

W

Woloszyn, M., May, M., Kwiatkowski, J. (2006). Influence des conditions aux limites sur les mesures de l'inertie hygrique des matériaux de construction. 24èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, La Grande Motte, France,

X

Xu, Y, Zeng, Z, Lv, H. (2019). Temperature dependence of apparent thermal conductivity of compacted bentonites as buffer material for high-level radioactive waste repository, Applied Clay Science, 174, 10–14. [DOI : 10.1016/J.CLAY.2019.03.017](https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2019.03.017),

Y

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>,

Z

Zhang, W., Min, H., Gu, X., Xi, Y., Xing, Y. (2015). Mesoscale model for thermal conductivity of concrete, Construction and Building Materials, Volume 98. [DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.106](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.106),

Zhang, L., Yang, L., Jelle, B-P, Yu Wang, Y., Arild Gustavsen. (2018). Hygrothermal properties of compressed earthen bricks. Construction and Building Materials 162 576–583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.163>.