



Études des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité par des techniques de changement d'échelle (microscopique-macroscopique) : Application à l'évaluation de la performance énergétique et la durabilité des matériaux de construction

Ferhat Benmahiddine

► To cite this version:

Ferhat Benmahiddine. Études des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité par des techniques de changement d'échelle (microscopique-macroscopique) : Application à l'évaluation de la performance énergétique et la durabilité des matériaux de construction. Architecture, aménagement de l'espace. Université de La Rochelle; Université Abderrahmane Mira - Bejaïa (Bejaïa, Algérie), 2020. Français. NNT : 2020LAROS029 . tel-03516072

HAL Id: tel-03516072

<https://theses.hal.science/tel-03516072>

Submitted on 7 Jan 2022

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

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



LA ROCHELLE UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE EUCLIDE

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) UMR CNRS 7356

UNIVERSITÉ A. MIRA DE BEJAIA

Laboratoire de Génie de Construction et Architectures (LGCA)

THÈSE EN COTUTELLE

Présentée par

Ferhat BENMAHIDDINE

Pour l'obtention du

Grade de Docteur de La Rochelle Université et de
l'Université A. Mira De Bejaia

Discipline : Génie Civil

Etudes des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité par des techniques de changement d'échelle (microscopique – macroscopique) : Application à l'évaluation de la performance énergétique et la durabilité des matériaux de construction

Thèse soutenue le 08 Décembre 2020

Devant le jury composé de :

Mahdia HATTAB	Professeure, Université de Lorraine	Présidente
Ammar YAHIA	Professeur, Université de Sherbrooke	Rapporteur
Mohamed BACHIR BOUAIDJRA	Professeur, Université de Sidi bel Abbes	Rapporteur
Rafik BELARBI	Professeur, La Rochelle Université	Directeur de thèse
Abdelkader TAHAKOURT	Professeur, Université de Bejaia	Codirecteur de thèse
Kamilia ABAHRI	Maître de Conférences, ENS Paris Saclay	Co-encadrante
Nasser CHELOUAH	Professeur, Université de Bejaia	Examineur
Sofiane GUESSASMA	CR-HDR, INRAE Nantes	Examineur
Julien BERGER	CR-CNRS, La Rochelle Université	Invité

Remerciements

Ce travail de thèse doctoral a été réalisé en cotutelle entre le **Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE)** de La Rochelle Université en France et le **Laboratoire de Génie de la Construction et Architecture (LGCA)** de l'Université de Bejaia en Algérie. Il n'aurait pas pu aboutir sans le soutien financier du (i) programme Franco-Algérien PROFAS B+, (ii) CPER –FEDER-Bâtiment Durable Axe 2 MADUR et (iii) du labo commun 4evLab, LaSIE, CNRS, EDF R&D.

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à monsieur M. Xavier Faugas, directeur du LaSIE et à M. Nasser Chelouah, directeur du laboratoire LGCA pour m'avoir accueilli au sein des deux laboratoires durant mes trois années de thèse.

Je remercie vivement les membres du jury de m'avoir fait l'immense honneur de juger mon travail de thèse :

Madame Mahdia HATTAB, Professeur à l'Université de Lorraine, Présidente du jury.

Monsieur Ammar YAHIA, Professeur à l'Université de Sherbrooke, Rapporteur.

Monsieur Mohamed BACHIR BOUAIDJRA, Professeur à l'Université de Sidi bel Abbes
Rapporteur

Monsieur Nasser CHELOUAH, Professeur à l'Université de Bejaia, Examineur

Monsieur Julien BERGIER, Chargé de Recherche CNRS à La Rochelle Université,
Examineur

Monsieur Sofiane GUESSASMA, Chargé de Recherche HDR à l'INRAE de Nantes,
Examineur

Je tiens à manifester ma profonde gratitude et reconnaissance à mon directeur de thèse M. Rafik Belarbi, d'une part, pour l'excellence de son encadrement scientifique, sa disponibilité, ses conseils, ses compétences inculquées, son soutien accentué et aussi pour ses qualités humaines qui m'ont beaucoup aidées pour mener cette thèse à bien et dans les meilleures conditions, et d'autre part, pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de mon travail. De même, je tiens à exprimer mes sincères remerciement à mon co-directeur de thèse M. Abdelkader Tahakourt, pour ses compétences et son suivi enrichissant au quotidien malgré la distance qui nous sépare et aussi pour ses qualités scientifiques et humaines. Merci à vous deux pour tout cela, malgré que les mots semblent faire défaut au regard de ce que vous m'avez apporté.

J'adresse mes remerciements les plus accentués à Rachid Cherif, Fares Bennai et Ameer Hamami, pour leur implication scientifique et leurs conseils enrichissants depuis le début, leur engagement, leur disponibilité et aussi pour leurs qualités scientifiques et humaines.

Je remercie vivement messieurs Abdelkarim Aït-Mokhtar, Julien Berger et Akli Younsi pour leurs conseils, leurs encouragements et leurs qualités humaines. Je remercie Mme Armelle Nouviaire, assistante ingénieur au LaSIE, qui a contribué à la

caractérisation expérimentale des matériaux et Mme Egle CONFORTO, responsable de la plateforme de microscopie au LaSIE.

Je remercie également mes chers collègues Nabil ISSAADI, Yassine BELARBI, Ahmed DEEB, Mustapha Nouri et plus particulièrement Achraf CHARAKA. Et bien sûr, sans oublier mon cher ami, collègue, frère et compagnon des meilleurs et pires moments de ces trois années de thèse, Fouad BOUKHELF.

Je tiens également à remercier le personnel du LaSIE, du département de Génie Civil de La Rochelle Université et de l'École doctorale EUCLIDE. De même, je remercie toutes les personnes (ami(e)s et collègues) qui m'ont soutenu de près ou de loin, à vous tous, sans vous nommer pour n'oublier personne, merci de votre présence et de vos aides si importantes et de si dévouées natures.

Enfin, mes remerciements les plus chaleureux vont aussi à ma chère famille qui m'a toujours soutenue, aidée et encouragée. Le mérite de ce diplôme leur revient amplement.

Merci ...

Résumé

Ce travail a pour objectif l'étude des transferts de chaleur, d'air et d'humidité au sein des matériaux biosourcés. La prise en compte de l'incidence des phénomènes de vieillissement, du gonflement et de l'hystérésis dans la modélisation numérique et expérimentale de ces mécanismes au sein des éco-matériaux d'enveloppe du bâtiment tels que le béton de chanvre et le béton de lin a été entreprise.

Sur le volet expérimental, une campagne de caractérisation fine a été effectuée au laboratoire. Le but de cette dernière est d'étudier, d'une part, les performances de ces matériaux à l'état sain pour pouvoir ensuite analyser leur réponse face à des sollicitations climatiques extrêmes, par l'application des protocoles de vieillissement accéléré (immersion/séchage, immersion/gel/séchage et humidification / séchage). Et d'autre part, de mettre en évidence l'impact de ces derniers sur l'évolution des propriétés des matériaux et sur le comportement hygrothermique et mécanique des bâtiments. L'analyse des résultats a montré que les propriétés thermo-hydro-mécaniques du béton de chanvre dépendent de sa microstructure et principalement de la cohésion de l'interface liant/chênevotte. Aussi, les observations par microscopie numérique et par la microscopie électronique à balayage ont mis en exergue l'apparition de fissures au niveau des interfaces et une augmentation maximale de 6% de la porosité totale. Ces changements de la microstructure ont engendré :

- (i) Une réduction des valeurs : du facteur de la résistance à la diffusion d'humidité, du tampon hydrique (MBV) et celle de la résistance à la compression (-51%) ;
- (ii) Une augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau (+38%) et de la profondeur de pénétration. L'analyse chimique effectuée sur les solutions d'immersion a confirmé la présence du Calcium, du Potassium et du Magnésium. Ces derniers résultent de la dissolution et de la lixiviation de certains hydrates initialement présents dans la matrice solide. Par ailleurs, l'analyse thermogravimétrique (ATG) a montré que la chènevotte et le liant, qu'ils soient vieillis ou non, présentent le même comportement à haute température.

Sur le volet numérique, un modèle de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité a été développé puis validé en comparant les résultats des simulations obtenues avec ceux issus des expérimentations réalisées au laboratoire. L'avantage de ce modèle réside dans le fait que tous ses paramètres d'entrées ont été considérés variables en fonction de la température et de l'état hydrique du matériau. Leur détermination a été rendue possible grâce aux bancs d'essais disponibles au laboratoire. Les propriétés vieilles et non vieilles obtenues lors de la phase de caractérisation ont été utilisées pour implémenter le modèle et étudier ainsi l'incidence du vieillissement sur le comportement hygrothermique de diverses configurations du béton de chanvre. Les résultats ont révélé des écarts sensibles entre les valeurs des humidités relatives d'environ 18%. De même,

la prédiction des déformations de ces matériaux biosourcés issues des sollicitations hygrothermiques a été effectuée suite à la prise en compte, dans la modélisation, des effets mécaniques. La validation du modèle ainsi obtenu a été effectuée moyennant le recours à une approche microscopique basée sur l'observation par micro-tomographie aux rayons X conjuguée à l'utilisation des techniques de traitement d'image (2D).

Enfin, la prise en compte du phénomène d'hystérésis d'adsorption et de désorption a été également entreprise à différentes échelles : matériau-paroi-bâtiment. Cela a permis non seulement d'améliorer la qualité de la prédiction des modèles numériques du comportement hygrothermique de ces matériaux, mais aussi de mettre en évidence les effets de ce phénomène sur les performances énergétiques et environnementales des bâtiments.

Mots clés : Matériaux biosourcés ; béton de chanvre, hystérésis ; couplage thermo-hydro-mécanique ; effets du vieillissement ; micro-tomographie aux rayons X ; traitement d'images (2D), microstructure ; propriétés thermo-hydro-morphiques et mécaniques ; caractérisation des matériaux, Performances énergétiques et environnementales, durabilité des ouvrages de génie civil.

Abstract

The aim of this work is to study the effect of ageing, swelling and hysteresis phenomena on the mechanisms of coupled heat, air and moisture transfer within bio-based materials of building envelopes such as hemp concrete and flax concrete. For this purpose, experimental investigation and numerical modelling have been undertaken.

The experimental part was dedicated to a characterization campaign carried out in the laboratory. The goal is to study, on the one hand, the performance of these materials in a healthy state in order to be able to analyse their response to extreme climatic conditions by applying accelerated ageing protocols (immersion/drying, immersion/freezing/drying and humidification/drying). On the other hand, to highlight the impact of the latter on the evolution of material properties and on the hygrothermal and mechanical behaviour of buildings. The analysis of the results showed that the thermo-hydro-mechanical properties of hemp concrete depend on its microstructure and mainly on the cohesion of the binder/hemp concrete interface. Also, observations by digital and scanning electron microscopy highlighted the appearance of cracks at the interfaces and a maximum increase of 6% of the total porosity. These changes in the microstructure led to:

- (i) A reduction of some values: the moisture diffusion resistance factor, the water buffer (MBV) and the compressive strength (-51%);
- (ii) An increase in water vapor permeability (+38%) and penetration depth. The chemical analysis performed on the immersion solutions confirmed the presence of Calcium, Potassium and Magnesium. The latter result from the dissolution and leaching of certain hydrates initially present in the solid matrix. Moreover, thermogravimetric analysis (TGA) showed that the hemp shives and the binder, whether aged or not, show the same behaviour at high temperature.

On the numerical side, a model of the coupled heat, air and moisture transfers was developed and validated by comparing the simulation results obtained with those from experiments realized in laboratory. The key advantage of this model is that the determination of all its input parameters was made possible thanks to the test benches available in the laboratory. The aged and non-aged properties obtained during the characterization phase were used to implement the model and to study the impact of aging on the hygrothermal behaviour of various configurations of hemp concrete. The results revealed significant discrepancies between the relative humidity values of approximately 18%. Moreover, the prediction of the deformation of these bio-based materials resulting from hygrothermal solicitations has been carried out by considering, in the modelling, the mechanical effects. The validation of the obtained model was carried out using a microscopic approach based on X-ray micro-tomography observation combined with the use of image processing techniques (2D). Finally, the consideration of the hysteresis phenomenon was also examined. This has not only improved the quality

of the prediction of numerical models of the hygrothermal behaviour, but also highlighted, at different scales (material, wall and building), the effects of this phenomenon on the hygrothermal and energetic performances of bio-based materials.

Keywords: Bio-based materials; hemp concrete, hysteresis; thermo-hydro-mechanical coupling; aging effects; X-ray micro-tomography; image processing (2D), microstructure; thermo-hydro-morphic and mechanical properties; materials characterization, energy and environmental performance, durability of civil engineering structures.

Tables des matières

Remerciements	i
Résumé	I
Abstract	III
Tables des matières	V
Tables des illustrations	XI
Liste des tableaux	XIX
Nomenclature	XX
Introduction générale	1
I. Chapitre I : Etat de l'art.....	5
I.1. Milieu poreux.....	6
I.1.1. Porosité $\epsilon p(\%)$	6
I.1.2. Tortuosité(τ)	7
I.1.3. Teneur en eau.....	7
I.1.4. Degré de saturation en eau (SR)	8
I.1.5. Connectivité	8
I.1.6. Volume Elémentaire Représentatif.....	8
I.1.7. Humidité Relative	9
I.1.8. Surface spécifique	10
I.2. Transfert et stockage de la chaleur dans les milieux poreux.....	10
I.2.1. Conduction.....	10
I.2.2. Convection	11
a) Convection naturelle ou libre	12
b) Convection forcée	12
I.2.3. Rayonnement.....	13
I.2.4. Changement de phase	14
I.2.5. Stockage d'énergie dans les matériaux poreux.....	14
I.3. Transferts d'humidité dans les milieux poreux	14
I.3.1. Transfert de la vapeur d'eau.....	15
a) Diffusion moléculaire (diffusion de Fick)	15
b) Diffusion de Knüdsen (effusion)	16
c) Diffusion de surface	17
I.3.2. Transfert de la phase liquide.....	18
I.4. Modes de fixation d'humidité.....	19

I.4.1. Adsorption de surface	19
I.4.2. Condensation capillaire	20
I.5. Isotherme d'adsorption/désorption	23
I.6. Phénomène d'hystérésis	25
I.7. Caractérisation expérimentales des matériaux de construction.....	29
I.7.1. Caractérisation hydrique	29
a) Isothermes d'adsorption/désorption.....	29
b) Mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau	34
c) Mesure de la capacité de stockage d'humidité.....	38
d) Courbe de rétention d'eau	39
e) Pouvoir tampon à l'humidité (MBV : Moisture Buffer Value).....	41
I.7.2. Caractérisation physique	44
a) Porosité par intrusion de mercure	45
b) Porosité accessible à l'eau	47
I.7.3. Caractérisation Thermique	47
a) Conductivité thermique	47
b) Chaleur spécifique	49
I.8. Modèles de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité	50
I.8.1. Modèle de Luikov	51
I.8.2. Modèle de Philipe et De Vries (1957)	53
I.8.3. Modèle de Kunzel (1995).....	54
I.8.4. Synthèse sur quelques modèles de prédiction du comportement hygrothermique	54
I.9. Choix des matériaux de rénovation	59
I.9.1. Matériaux Biosourcés.....	60
I.9.2. Liant utilisé pour la formulation des bétons végétaux.....	61
I.9.3. Exemples des matériaux à base de fibres végétales.....	62
a) Béton de lin.....	62
b) Béton de chanvre	65
I.9.4. Vieillissement du béton de chanvre.....	69
I.10. Conclusion.....	74
II. Chapitre II : Choix des matériaux et protocoles expérimentaux.....	76
II.1. Introduction.....	76
II.2. Matériaux étudiés.....	76
II.2.1. Etudes à réaliser sur chaque matériau.....	76

a) Béton de lin.....	76
b) Béton de chanvre	77
II.2.2. Composants du béton de chanvre et du béton de lin	77
a) Chènevotte	78
b) Anas de lin.....	80
c) Liant Tradical PF70	80
d) Eau	81
II.2.3. Formulation des matériaux	81
II.2.4. Malaxage et pré-conditionnement.....	81
II.2.5. Répétabilité dans la fabrication des échantillons	83
II.3. Méthode de caractérisation expérimentales des matériaux étudiés	84
II.3.1. Essai de porosité.....	84
II.3.2. Microscope Electronique à Balayage en mode Environnemental (MEB)	85
II.3.3. Résistance à la compression	86
II.3.4. Chaleur spécifique.....	87
II.3.5. Conductivité thermique	88
II.3.6. Isothermes d'adsorption/désorption.....	89
II.3.7. Perméabilité à la vapeur d'eau	90
II.3.8. Capacité de tampon hydrique (MBV)	91
II.4. Protocoles de vieillissement accélérés : démarche et méthodologie.....	92
II.4.1. Protocole N°1 : Immersion/séchage.....	93
II.4.2. Protocole N°2 : Immersion/gel/séchage.....	94
II.4.3. Protocole N°3 : Humidification/séchage.....	94
II.5. Conclusion.....	95
III. Chapitre III : Effet de la taille et de la teneur en particules végétales sur les propriétés hygrothermique et mécanique des matériaux biosourcés : Application sur le béton de lin	97
III.1. Introduction	97
III.2. Matériau étudié	98
III.2.1. Formulations étudiées	98
III.3. Analyse de la microstructure des matériaux par Microscope Electronique à Balayage en mode Environnemental (MEB).....	101
III.3.1. Analyse des images au MEB des anas de lin	101
III.3.2. Analyse des images au MEB du béton de lin	103
III.4. Effet de la teneur et de la taille des particules végétales sur les propriétés du béton de lin	105

III.4.1. Propriétés physiques.....	105
a) Masse volumique.....	105
b) Porosité à l'eau.....	106
III.4.2. Propriétés hygrothermiques	107
a) Conductivité thermique	107
b) Isothermes d'adsorption/désorption	109
c) Capacité de stockage d'humidité	112
d) Capacité de tampon à l'humidité (MBV)	114
III.4.3. Propriété mécanique	116
a) Résistance à la compression	117
III.5. Conclusion	118
IV. Chapitre IV : Effet du vieillissement accéléré sur le comportement thermo-hygro-morphique et mécanique des matériaux biosourcés : application sur le béton de chanvre	122
IV.1. Introduction	122
IV.2. Effet du vieillissement accéléré sur les propriétés thermo-hydro-morphiques et mécanique du béton de chanvre	123
IV.2.1. Dégradation chimique et microstructurale	124
a) Caractérisation de la microstructure de la chènevotte et du béton de chanvre par un Microscope Electronique à Balayage en mode Environnementale (MEB-E)	124
b) Caractérisation de la morphologie du béton de chanvre par un microscope numérique (Keyence®)	130
c) Porosité accessible à l'eau.....	133
d) Masse volumique apparente.....	134
e) Analyse chimique des solutions d'immersion et évolution du pH.....	136
f) Analyse ThermoGravimétrique (ATG).....	138
IV.2.2. Caractérisation hygrothermique.....	141
a) Conductivité thermique	141
b) Chaleur spécifique	142
c) Isotherme de sorption	143
d) Capacité de stockage d'humidité	145
e) Perméabilité à la vapeur d'eau.....	147
f) Profondeur de pénétration et capacité de tampon d'humidité (MBV)	150
IV.2.3. Propriété mécanique	153
a) Résistance à la compression	153

IV.3. Conclusion.....	154
V. Chapitre V : Modélisation du comportement thermo-hygro-morphique des matériaux biosourcés : Application sur le vieillissement du béton de chanvre.....	158
V.1. Introduction.....	158
V.2. Modèle des transferts HAM dans les milieux poreux.....	158
V.2.1. Hypothèses du modèle	159
V.2.2. Equation de conservation de masse.....	159
V.3. Equation de conservation de masse.....	159
a) Transfert de la phase liquide	160
b) Transfert de la phase vapeur.....	161
c) Transfert de la phase gazeuse	162
d) Transfert d'énergie.....	162
V.3.1. Validation du modèle	164
V.4. Effet du vieillissement sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre	166
V.4.1. Configurations étudiées	167
a) Premier cas (T constante et HR variable).....	167
b) Deuxième cas (T et HR variables).....	170
V.4.2. Effet du vieillissement sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre : Application à l'échelle de la paroi.....	174
V.5. Prédiction des déformations du béton de chanvre issues des sollicitation hydriques et thermiques	177
V.5.1. Loi de Hooke : cas unidimensionnel (1D)	178
V.5.2. Loi de Hooke : cas bidimensionnel (2D).....	178
V.5.3. Loi de Hooke : cas tridimensionnel (3D)	180
V.5.4. Sensibilité du modèle numérique vis-à-vis des paramètres du comportement mécanique	182
V.5.5. Validation du modèle	184
V.6. Conclusion	188
VI. Chapitre VI : Etude multi-échelle de l'effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique et énergétique des matériaux biosourcés	191
VI.1. Introduction	191
VI.2. Modèle d'hystérésis.....	192
VI.2.1. Présentation du modèle.....	192
VI.2.2. Implémentation du modèle d'hystérésis	194
VI.2.3. Validation du modèle.....	197

a) Validation à l'échelle du matériau	197
b) Validation à l'échelle de la paroi	201
VI.3. Effet du phénomène d'hystérésis sur la conductivité thermique du béton de chanvre.....	205
VI.4. Effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre	207
VI.4.1. Configurations étudiées.....	208
VI.5. Effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique et la consommation énergétique à l'échelle du bâtiment.....	212
VI.5.1. Présentation du cas d'étude.....	212
VI.6. Conclusion.....	220
Conclusion générale et perspectives.....	223
Références bibliographiques	229

Tables des illustrations

Figure I-1. Schéma explicatif d'un milieu poreux.....	6
Figure I-2. Différents types de pores.....	7
Figure I-3. Tortuosité d'un pore.....	7
Figure I-4. VER d'un milieu hétérogène.....	9
Figure I-5. Evolution de la porosité avec la taille du volume de mesure [5].....	9
Figure I-6. Transfert de chaleur par conduction [8].	11
Figure I-7. Transfert de chaleur par convection [8].....	11
Figure I-8. Effet du coefficient d'échange convectif sur la température et la teneur en eau de la face extérieur [9].....	13
Figure I-9. Transfert de chaleur par rayonnement [8].....	13
Figure I-10. Représentation schématique de la diffusion moléculaire.....	16
Figure I-11. Représentation schématique de la diffusion de Knüdsen.....	17
Figure I-12. Représentation schématique de la diffusion de surface.....	17
Figure I-13. Modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore [18].....	18
Figure I-14. Représentation schématique des phénomènes d'adsorption et de condensation moléculaire dans un pore [20].	21
Figure I-15. Etapes de remplissage d'un pore [5].....	21
Figure I-16. Condensation capillaire dans un pore [20].....	22
Figure I-17. Différentes zones des isothermes de sorption [12].	23
Figure I-18. Types d'isothermes suivant la classification de l'IUPAC [2].	24
Figure I-19. Classification des boucles d'hystérésis d'après l'IUPAC [2].	26
Figure I-20. Adsorption et désorption dans un pore [30].....	27
Figure I-21. Adsorption et désorption d'eau dans un pore «bouteille d'encre» [30].	27
Figure I-22. Schéma de montage explicatif de la méthode basée sur des solutions salines saturées [21].	31
Figure I-23. Dispositif de mesure des isothermes de sorption (DVS) [19].....	32
Figure I-24. Comparaison des isothermes sorption de l'isolant de fibre en bois (à gauche) et de l'OSB (à droite) à 20 °C obtenues par différentes méthodes [60].	33
Figure I-25. Photo d'un dispositif de mesure des isothermes de sorption par la méthode volumétrique : BELSORP Aqua3.....	34
Figure I-26. Photo d'un dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau : GraviTest...35	35
Figure I-27. Schéma montrant les résistances des couches d'air.....	36
Figure I-28. Perméabilité à la vapeur d'eau (en haut) et l'erreur relative due à la non prise en compte des corrections de résistance à la vapeur (en bas) de l'isolant fibreux mesurées à différents états hydriques [60].....	37

Figure I-29. Evolution de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre en fonction de l'âge (à gauche) et de l'état hydrique (à droite) [63]	38
Figure I-30. Evolution de la capacité d'humidité en fonction de l'âge [63].....	39
Figure I-31. Courbe de rétention d'eau d'une pâte de ciment en fonction du rapport E/C à l'âge de 28 jours [61].....	40
Figure I-32. Photo d'un extracteur à membrane [18].	40
Figure I-33. Photo d'une chambre climatique [19].	42
Figure I-34. Présentation graphique des classes pratiques des valeurs de tampon d'humidité (MBV) [74].....	43
Figure I-35. Effet de la température et de la taille de la chènevotte sur le MBV du béton de chanvre (rouge : petite chènevotte, bleu : grande chènevotte) [78].	44
Figure I-36. Photo d'un porosimètre au mercure [19].	46
Figure I-37. Distribution de la taille des pores du béton de chanvre par intrusion au mercure à 30 et 60 jours d'âge [5].....	46
Figure I-38. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température à 50 % d'humidité relative de deux types de béton de chanvre [78].	49
Figure I-39. Effet de la température sur la chaleur spécifique du béton de chanvre en fonction de la température à 7, 30 et 60 jours [5].....	50
Figure I-40. Schéma du banc expérimental développé pour la mesure des infiltrations d'humidité pour des différences de pression totale extrêmement faible [97].....	56
Figure I-41. Evolution de la pression de vapeur d'eau suivant une coupe selon l'épaisseur du voile avec l'approche déterministe (à gauche) et l'approche probabiliste (à droite).	58
Figure I-42. Cellule élémentaire en 3D d'un milieu poreux [5].....	59
Figure I-43. Consommation d'énergie dans le monde (à gauche), et émission de GES (à droite) [104].....	59
Figure I-44. Avantage des matériaux biosourcés.....	61
Figure I-45. Surfaces des cultures de lin en France [113].	62
Figure I-46. (a) coupe transversale d'une tige de lin, (b) Tissus conducteurs de vaisseaux et trachéides du xylème des plantes ligneuses [114].....	63
Figure I-47. MBV du béton de lin (FLC) et du béton de chanvre (HLC) comparé à d'autres matériaux testés dans le projet Nordtest [117].	64
Figure I-48. Béton de chanvre banché	65
Figure I-49. Béton de chanvre projeté.....	65
Figure I-50. Béton de chanvre préfabriqué	66
Figure I-51. Zones de production de chanvre en France.	67
Figure I-52. Rendement obtenu après la première transformation du chanvre [113].	67
Figure I-53. Images montrant la composition de la tige de chanvre [121-123].....	68
Figure I-54. Image au microscope électronique à balayage d'une particule de chanvre [127]. ...	68

Figure I-55. Image de gauche : couche de sel typique sur la surface du liant. Image de droite: vue latérale d'une fissure de couche de sel montrant que le sel ne s'est pas pénétré dans le liant [130].	70
Figure I-56. Absorption d'eau par capillarité dans le temps en fonction de plusieurs types de liant [73].	71
Figure I-57. Comparaison des coefficients d'absorption capillaires à 28 jours, de trois formulations avec deux liants différents [107].	72
Figure I-58. Conditions moyennes de température, d'humidité relative et de précipitation enregistrées durant l'année 2012 dans quatre villes ou pays différents dans les mêmes zones climatiques[129].	72
Figure I-59. Microstructure du béton de chanvre obtenue par tomographie aux rayons X, (a) 0% HR et (b) 85 % HR [5].	74
Figure II-1. Composants du béton de chanvre.	78
Figure II-2. Photo de la chènevotte utilisée.	78
Figure II-3. Disposition de la chènevotte sur une feuille de papier A3 pour l'analyse granulométrique.	79
Figure II-4. Analyse granulométrique de la chènevotte par traitement d'image : (a) distribution de la longueur et (b) distribution de la largeur.	79
Figure II-5. Photo de la chaux Tradical PF70	81
Figure II-6. Malaxage du béton de chanvre	82
Figure II-7. Pré-conditionnement des matériaux dans une chambre climatique (T=20°C ; HR=50%).	83
Figure II-8. Perte de masse des échantillons du béton de chanvre.	83
Figure II-9. Principe de la porosimétrie à l'eau [134].	85
Figure II-10. Photo du Microscope Electronique à Balayage en mode Environnemental (MEB).	86
Figure II-11. Dispositif utilisé pour la mesure de la résistance à la compression du béton de chanvre.	87
Figure II-12. Coupe du Calorimètre Calvet® utilisé pour la mesure de la chaleur spécifique du béton de chanvre.	88
Figure II-13. Principe de mesure de la conductivité thermique.	89
Figure II-14. Photo du proUmid utilisé pour la mesure des isothermes d'adsorption/désorption.	90
Figure II-15. Schéma descriptif de la méthode de la coupelle.	90
Figure II-16. Différentes classes de capacité de tampon à l'humidité des matériaux selon leurs indices MBV.	91
Figure II-17. Démarche suivie pour l'étude de l'effet vieillissement accéléré sur les propriétés fonctionnelles du béton de chanvre.	93
Figure II-18. Protocole de vieillissement N°1 : cycles d'immersion/séchage pendant 40 jours.	93
Figure II-19. Protocole de vieillissement N°2 : cycles d'immersion/gel/séchage pendant 42 jours.	94
Figure II-20. Protocole de vieillissement N°3 : cycles d'humidification/séchage pendant 8 mois.	95

Figure III-1 Tailles des anas de lin étudiées : (a) en vrac, (b) moyenne et (c) grande.....	98
Figure III-2. Exemple sur la disposition des anas de lin sur une feuille de papier A4.....	100
Figure III-3. Analyse granulométrique par traitement d'image des différentes tailles d'anas de lin : (a) mélange en vrac, (b) mélange avec une taille moyenne et (c) mélange avec une taille grande.....	100
Figure III-4. Particules végétales de chanvre et de lin.	101
Figure III-5. Coupe transversale de la particule végétale de lin observée au MEB à différentes échelles : (a, b) images de types BSE et (c, d) images de types SE.....	102
Figure III-6. Coupe longitudinale de la particule végétale de lin observée au MEB à différentes échelles et son spectre EDS.....	103
Figure III-7. Images au MEB du béton de lin de type SE : adhérence matrice/particule végétale.	105
Figure III-8. Masse volumique des différentes formulations du béton de lin.	106
Figure III-9. (a) porosité totale des différentes formulations du béton de lin et (b) leurs écarts types.	107
Figure III-10. (a) Conductivité thermique des différentes formulations du béton de lin et (b) écarts types correspondant.	108
Figure III-11. (a), (b) et (c) montrent l'effet de la teneur en anas de lin sur les isothermes d'adsorption/désorption du béton de lin, (d) montre l'effet de la taille des anas de lin sur les isothermes d'adsorption/désorption.....	110
Figure III-12. Isothermes d'adsorption du béton de lin obtenues par le modèle GAB : (a) F12, (b) F22 and (c) F32.....	112
Figure III-13. (a), (b) et (c) montrent l'effet de la teneur en anas de lin sur la capacité de stockage d'humidité du béton de lin, (d) montre l'effet de la taille des anas de lin sur la capacité de stockage d'humidité.....	113
Figure III-14. Photo de l'enceinte climatique « Climats » disponible au LaSIE.....	115
Figure III-15. Classes des valeurs de tampon à l'humidité proposées par le projet Nordtest. ..	115
Figure III-16. (a) MBV des différentes formulations du béton de lin et (b) leurs écarts types..	116
Figure III-17. (a) Résistance à la compression des différentes formulations du béton de lin, (b) leurs écarts types.	117
Figure IV-1. Images au MEB de la coupe transversale de la chènevotte : (à gauche) chènevotte non vieillie, (à droite) chènevotte vieillie.	124
Figure IV-2. Images au MEB de la coupe longitudinale de la chènevotte : (à gauche) chènevotte non vieillie, (à droite) chènevotte vieillie.	125
Figure IV-3. Images au MEB de la coupe longitudinale d'une chènevotte saine (non mélangée avec le liant) et son spectre EDS.....	126
Figure IV-4. Surface d'une chènevotte couverte par du liant.....	127
Figure IV-5. Observation au MEB de l'interface liant/chènevotte du béton de chanvre non vieilli et le spectre EDS qui lui correspond.	128
Figure IV-6. Observation au MEB de l'interface liant/chènevotte du béton de chanvre vieilli..	129

Figure IV-7. Spectre EDS du béton de chanvre vieilli (surfactive : 2.54x2.10 mm).....	129
Figure IV-8. Photo du microscope numérique « Keyence ».....	130
Figure IV-9. Microstructure du béton de chanvre : (à gauche) non vieilli, (à droite) vieilli par immersion/séchage.	131
Figure IV-10. Microstructure du béton de chanvre : (à gauche) non vieilli, (à droite) vieilli par immersion/gel/séchage.	131
Figure IV-11. Microstructure du béton de chanvre : (à gauche) non vieilli, (à droite) vieilli après l'application du protocole d'humidification/séchage.	133
Figure IV-12. Porosité des bétons de chanvre de référence et vieilli.	134
Figure IV-13. Instruments de mesure de la masse volumique apparente.....	135
Figure IV-14. Photo du chromatographe ionique du LaSIE.....	136
Figure IV-15. ATG (a) et dTG (b) de la chènevotte vieillie et non vieillie.....	139
Figure IV-16. ATG (a) et dTG (b) du liant vieilli et non vieilli.....	140
Figure IV-17. Conductivité thermique des matériaux de référence et vieillis.....	141
Figure IV-18. Comparaison entre la conductivité thermique du béton de chanvre et du béton de lin	142
Figure IV-19. Isothermes d'adsorption et de désorption du béton de chanvre vieilli et non vieilli (I/S : immersion/séchage ; I/G/S : immersion/gel/séchage ; H/S : humidification/séchage)... ..	143
Figure IV-20. Comparaison entre l'isotherme d'adsorption/désorption du béton de lin et du béton de chanvre.....	145
Figure IV-21. Capacité de stockage d'humidité des bétons de chanvre vieillis et non vieilli.	146
Figure IV-22. Comparaison entre les capacités de stockages d'humidité du béton de lin et du béton de chanvre.....	147
Figure IV-23. (a) perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre de référence et vieilli, (b) leurs facteurs de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau.	148
Figure IV-24. Perméance en (ng/(m ² .s.Pa)) de divers matériaux.....	150
Figure IV-25. MBV du béton de chanvre vieilli et non vieilli.....	152
Figure IV-26. Comparaison du MBV du béton de lin à celui du béton de chanvre.....	153
Figure IV-27. Résistance à la compression du béton de chanvre vieilli et non vieilli [MPa].	154
Figure IV-28. Comparaison entre la résistance à la compression du béton de lin et celle du béton de chanvre.....	154
Figure V-1. Conditions initiales et aux limites du modèle.	164
Figure V-2. Comparaison entre les profils de température obtenus numériquement (lignes continues) avec ceux de la norme EN 15026 (Astérisques).....	165
Figure V-3. Comparaison entre les profils de teneur en eau obtenus numériquement (lignes continues) avec ceux de la norme EN 15026 (Astérisques).....	166
Figure V-4. (a) isotherme d'adsorption et (b) capacité de stockage d'humidité du béton de chanvre vieilli (par immersion/gel/séchage) et non vieilli.	167
Figure V-5. Schéma montrant les sollicitations hydriques et thermiques appliquées.	168

Figure V-6. Cas isotherme : Profils d'humidité relative du béton de chanvre vieilli et non vieilli : (en noir : matériau non vieilli et en couleur : matériau vieilli).....	168
Figure V-7. Cas isotherme : évolution de l'humidité relative du béton de chanvre vieilli et non vieilli (V : Vieilli ; NV : Non Vieilli).....	169
Figure V-8. Cas isotherme : évolution de la température du béton de chanvre vieilli et non vieilli.	170
Figure V-9. Sollicitation climatique dynamiques appliquées.	171
Figure V-10. Cas non isotherme : Profils de température du béton de chanvre vieilli et non vieilli.	171
Figure V-11. Cas non isotherme : Evolution de la température au cours du temps du béton de chanvre vieilli et non vieilli.	172
Figure V-12. Cas non isotherme : Profils d'humidité relative du béton de chanvre vieilli et non vieilli.	173
Figure V-13. Cas non isotherme : Evolution de l'humidité relative du béton de chanvre vieilli et non vieilli.	174
Figure V-14. Conditions aux limites intérieures et extérieures appliquées au mur étudié.	175
Figure V-15. Évolution temporelle des flux de chaleur (a) latente, (b) sensible et (c). (d) Évolution temporelle de l'humidité sur la face intérieure du mur.	176
Figure V-16. Déformations d'une géométrie 2D soumises à des contraintes dans les deux directions.	179
Figure V-17. Sensibilité des déplacements (u) vis-à-vis du module de Young (E en MPa) à $x=e/2$	182
Figure V-18. Sensibilité des déplacements (u) vis-à-vis du coefficient de Poisson (ν) à $x=e/2$	183
Figure V-19. Sensibilité des déplacements (u) vis-à-vis du coefficient de gonflement (β) à $x=e/2$	183
Figure V-20. Déformations obtenues par corrélation d'image [5].	184
Figure V-21. Différentes phases de la configuration du béton de chanvre étudiée.	185
Figure V-22. Maillage de la configuration étudiée.	186
Figure V-23. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	187
Figure V-24. Points sélectionnés pour la comparaison ponctuelle.	187
Figure VI-1. Schématisation des cycles d'adsorption/désorption principaux (a et b) et intermédiaires (c et d) dans l'espace 2D de Mualem [54].	192
Figure VI-2. Evolution de l'humidité relative à l'instant (t : HR) et (t-1 : hr) ainsi que l'évolution de l'humidité relative d'inversion entre l'adsorption et la désorption (Pinv).	195
Figure VI-3. Evolution de la teneur en eau à l'instant (t : U) et (t-1 : u) ainsi que l'évolution de la teneur en eau d'inversion entre l'adsorption et la désorption (uinv).	196
Figure VI-4. Evolution à mi épaisseur de HR, hr et Pinv vis-à-vis des conditions climatiques réelles de la ville de Montréal (Canada) pendant une année.	197
Figure VI-5. Photos montrant la campagne expérimentale de validation à l'échelle du matériau.	198

Figure VI-6. Conditions initiales et aux limites appliquées.....	198
Figure VI-7. Evolution de l'humidité relative dans le temps à ($x = 1,5$ cm).....	199
Figure VI-8. Ecart relatifs aux résultats expérimentaux de HR (sans et avec la prise compte du phénomène d'hystérésis).	200
Figure VI-9. Evolution de la température dans le temps (à $x = 1,5$ cm).....	200
Figure VI-10. Photo de l'enceinte bi - climatique disponible au LaSIE.	201
Figure VI-11. Photo de la paroi du béton de chanvre étudiée.	202
Figure VI-12. Photo montrant l'enceinte bi climatique durant l'expérience.....	202
Figure VI-13. Configuration étudiée et conditions climatiques appliquées pour le cas de validation à l'échelle de la paroi.....	203
Figure VI-14. Evolution de l'humidité relative dans le temps à ($x = 2,5$ cm de la surface extérieure).	203
Figure VI-15. Evolution de la température dans le temps à ($x = 2,5$ cm de la surface extérieure).	204
Figure VI-16. Effet d'hystérésis de la teneur en eau sur la conductivité thermique du béton de chanvre.....	205
Figure VI-17. Effet d'hystérésis de la conductivité thermique sur la densité de flux hydrique : <i>Flux_{λUads, hys}</i> signifie la densité de flux hydrique simulée en considérant la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau d'adsorption et d'hystérésis, respectivement.	206
Figure VI-18. Effet d'hystérésis de la conductivité thermique sur la densité de flux chaleur totale : <i>Flux_{λUads, hys}</i> signifie la densité de flux de chaleur simulée en considérant la conductivité thermique en fonction respectivement de la teneur en eau d'adsorption et d'hystérésis.....	207
Figure VI-19. Configuration étudiée et conditions climatiques appliquées : Ville de Montréal au Canada.	208
Figure VI-20. Configuration étudiée et conditions climatiques appliquées : Ville de La Rochelle en France.	208
Figure VI-21. Configuration étudiée et conditions climatiques appliquées : Ville Chihuahua au Mexique.....	208
Figure VI-22. Evolution de l'humidité relative (à gauche) et de la température (à droite) dans le temps à différentes profondeurs (sans et avec hystérésis) : Ville de Montréal.	209
Figure VI-23. Evolution de l'humidité relative (à gauche) et de la température (à droite) dans le temps à différentes profondeurs (sans et avec hystérésis) : Ville de La Rochelle.	210
Figure VI-24. Evolution de l'humidité relative (à gauche) et de la température (à droite) dans le temps à différentes profondeurs (sans et avec hystérésis) : Ville de Chihuahua.....	211
Figure VI-25. Schéma de la maison étudiée (à gauche) et coupe transversale de la paroi extérieure (à droite).	213
Figure VI-26. Scénarios d'échanges thermiques (à gauche) et hydriques (à droite) d'une seule personne en état de repos dans l'ambiance habitable.....	214
Figure VI-27. Evolution des flux hydriques dans le temps (sans et avec hystérésis) pour différentes conditions aux limites intérieures: (a) en tenant compte des conditions réelles de la	

chambre 01, (b) en tenant compte des conditions réelles de la chambre 02 et (c) en supposant des conditions constantes ($T = 23^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 50\%$) dans l'ambiance habitable.....	214
Figure VI-28. Evolution de la température dans la chambre 01 (a) et la chambre 02 (b) pendant un an : Climat de Montréal.	216
Figure VI-29. Evolution de l'humidité relative dans la chambre 01 (a) et la chambre 02 (b) pendant un an : Climat de Montréal.	217
Figure VI-30. Evolution des flux de chaleur latente dans la chambre 01 (a) et la chambre 02 (b) pendant un an : Climat de Montréal.	218
Figure VI-31. Ecart entre les flux de chaleur latente des deux cas de simulation (sans et avec hystérésis) dans les chambres 01 et 02 durant la première semaine de février : Climat de Montréal.....	219
Figure VI-32. Gains et pertes de flux de chaleur totale durant la première semaine de février dans la chambre 01 (a) et la chambre 02 (b).	220
Figure VI-33. Gains et pertes des flux de chaleur totale durant la première semaine de juillet dans la chambre 01 (a) et la chambre 02 (b).	220

Liste des tableaux

Tableau I-1 Coefficients de diffusion effectifs dans les milieux poreux [15].....	18
Tableau I-2 Description des domaines hygroscopique et non hygroscopique d'un milieu poreux [12].....	19
Tableau I-3 Solutions salines saturées contrôlant l'humidité relative de l'air.	31
Tableau I-4 Valeur de la succion et de l'humidité relative issues de la relation de Kelvin [61] ...	41
Tableau I-5 Principales techniques d'investigation de la structure poreuse des matériaux à base de ciment [79]	45
Tableau I-6 Composition volumique du liant Tradical PF70 [111].....	61
Tableau I-7 Performance de la chaux Tradical PF70 [112].....	62
Tableau I-8 Formulation du béton de lin selon les travaux de [117].	64
Tableau I-9 Description des formulations du béton de chanvre (Applications banchage & Dallage).	69
Tableau I-10 Description des formulations du béton de chanvre (Application Enduit).....	69
Tableau II-1 Minimum, maximum et moyenne de la longueur et de la largeur de la chènevotte utilisée.	80
Tableau II-2 Pourcentages massiques de la formulation utilisée.....	81
Tableau II-3 Masse volumique et écart type des éprouvettes du béton de chanvre fabriquées par le même opérateur et dans les mêmes conditions.....	84
Tableau III-1. Différentes formulations du béton de lin étudié	99
Tableau III-2. Paramètres d'ajustement du model GAB pour les trois formulations modélisées.	111
Tableau IV-1 Masse volumique du béton de chanvre vieilli et non vieilli.....	135
Tableau IV-2 Composition chimique de la solution d'immersion obtenue par la chromatographie ionique.....	137
Tableau IV-3 pH du béton de chanvre vieilli et non vieilli.	138
Tableau IV-4. Chaleur spécifique du béton de chanvre vieilli et non vieilli mesuré à 25°C.....	143
Tableau IV-5. Perméance du béton de chanvre vieilli et non vieilli.....	149
Tableau IV-6. Profondeur de pénétration du béton de chanvre vieilli et non vieilli.....	151
Tableau V-1 Paramètres d'entrées du modèle numérique.....	165
Tableau V-2 Propriétés utilisées pour l'alimentation du modèle numérique.....	166
Tableau V-3. Confrontation ponctuelle entre les déformation numériques et expérimentales	188

Nomenclature

Caractères latins

C_l	J/(kg.K)	Capacité thermique massique de l'eau liquide
C_m	kg/kg	Capacité de stockage d'humidité du matériau
C_p	J/(kg.K)	Chaleur spécifique du matériau
P_v	Pa	Pression de vapeur d'eau
HR	%	Humidité relative
h_l	J/kg	Enthalpie massique de l'eau liquide
h_v	J/kg	Enthalpie massique de la vapeur d'eau
j_l	kg/(m ² .s)	Densité de flux massique de la phase liquide
j_v	kg/(m ² .s)	Densité de flux massique de la phase vapeur
j_q	J/(m ² .s)	Densité de flux de chaleur
k_l	kg/(m.s.Pa)	Conductivité hydraulique
K_l^P	kg/(m.s.Pa)	Coefficient de transfert de la phase liquide gouverné par la pression de vapeur d'eau
K_l^T	kg/(m.s.K)	Coefficient de transfert de la phase liquide gouverné par un gradient de vapeur d'eau
L_v	J/kg	Chaleur latente d'évaporation
M	kg/mol	Masse molaire de l'eau
P_c	Pa	Pression capillaire
R	J/(mol.K)	Constante des gaz parfaits
T	K	Température
u_l	kg/m ³	Teneur en eau volumique de la phase liquide
w	kg/kg	Teneur en eau massique

Caractères grecs

λ	W/ (m.K)	Conductivité thermique du matériau
λ^*	W/(m. K)	Coefficient de transfert de chaleur par conduction dû au gradient de température
χ	W/(m. Pa)	Coefficient de transfert de chaleur par convection dû au gradient de la pression de vapeur

γ	$(h_l K_f + L_v K_{fv})$	Coefficient de transfert thermique dû à un gradient de pression totale,
δ_p	kg/(m.s.Pa)	Perméabilité à la vapeur d'eau
ρ_l	kg/m ³	Masse volumique de l'eau
ρ_s	kg/m ³	Masse volumique sèche

Introduction générale

Le secteur du bâtiment constitue encore aujourd'hui un gisement important d'économie d'énergie et de réduction de gaz à effet de serre. Avec ses 45% de la consommation énergétique mondiale et une émission du CO₂ dépassant les 36 billion de tonnes, il est un secteur d'action prioritaire tant pour la rénovation du parc existant que pour la construction de bâtiments neufs performants pour la réduction de la demande énergétique. Il fait aussi objet de préoccupations en matière de santé, de consommation énergétique et d'impacts environnementaux. Dans ce domaine, il existe différentes voies d'action avec comme objectifs, non seulement l'amélioration des performances énergétiques et environnementales des bâtiments mais aussi une meilleure prédiction de la durabilité des ouvrages.

En effet, les réglementations thermiques actuelles préconisent de concevoir des bâtiments de plus en plus isolés thermiquement avec une perméabilité de l'enveloppe très faible. Certes, cela permet de limiter l'impact énergétique et environnemental mais fait apparaître des enjeux nouveaux car cela risque d'altérer le confort d'été et la qualité de l'air intérieur. Une autre conséquence est de voir ces bâtiments « hermétiques » se dégrader par la présence d'humidité à l'intérieur des ambiances habitables. En effet, la présence de l'eau (en phases vapeur et liquide) est responsable de la croissance fongique et de la dégradation des isolants à base de plantes végétales. De plus, elle constitue le vecteur de transport des agents agressifs (tels que les chlorures et les sulfates) et le siège des réactions chimiques (telle que la carbonatation). Ainsi, des phénomènes de second ordre jusque-là négligés sont devenus de plus en plus importantes au point où ils contribuent fortement dans le bilan thermique global des bâtiments et ne peuvent ainsi être négligés. Les transferts massiques (notamment d'humidité) en sont les principaux. En outre, l'utilisation des matériaux à faible impact environnemental tels que les éco matériaux, matériaux biosourcés et les matériaux recyclés est freinée, notamment, par la non disponibilité de bases de données relatives à leurs propriétés intrinsèques et par méconnaissance de leurs comportements dans le temps. De plus, un manque relatif à la réglementation et aux normes d'utilisation de ces matériaux est également présent.

L'une des voies permettant de remédier à ce constat alarmant est de recourir à l'utilisation des matériaux à faible empreinte environnementale tels que les matériaux biosourcés. Ces matériaux poreux et moins énergivores sont formulés principalement à base de la biomasse animale ou végétale. Ils constituent une solution incontournable pour réduire les impacts

énergétiques, et ce, grâce à leurs propriétés hygrothermiques et acoustiques prometteuses. Cependant, l'utilisation de ces matériaux reste limitée, d'une part, en raison du manque de base de donnée qui définit leurs propriétés intrinsèques tel qu'il est le cas pour le béton de lin, et d'autre part, en raison du manque de garantie quant à l'évolution de leurs propriétés dans le temps tel qu'il est le cas pour le béton de chanvre.

Par ailleurs, les transferts couplés de chaleur, d'air et de masse à l'échelle des matériaux poreux et à l'interface bâtiment-ambiance est de nature complexe à plusieurs égards. Il est multi-échelles (pore, matériau, enveloppe et bâtiment tout entier) ; multi-physique (transfert de masse, de chaleur avec interaction forte) et multi-système (enveloppe chauffage, ventilation, etc.). Un des enjeux majeurs est d'identifier les paramètres les plus influents qui définissent le comportement global du bâtiment (neuf et ancien) et les interactions qui existent entre sous-systèmes en vue de proposer une conception adaptée aux espaces bâtis. La connaissance d'une telle réponse est importante tant sur le plan de la prédiction de la qualité des ambiances habitables que sur l'évaluation de la durabilité des structures.

Ce projet de recherche doctorale répond à cette problématique et s'insère parfaitement dans le cadre des nombreux défis sociétaux. Il répond au défi dédié à la « Mobilité et systèmes urbains durables » et plus particulièrement dans l'axe « Du bâtiment au cadre de vie bâti durable ». Il contribue également au défi « Une énergie, propre, sûre et efficace ». Pour répondre à cette problématique, ce travail de thèse doctoral s'articulera autour de six chapitres complémentaires :

Le premier chapitre de ce manuscrit de thèse sera constitué d'un état de l'art permettant de synthétiser les travaux de la littérature dédiés à cette thématique de recherche. Il s'agira d'établir, entre autre, une étude phénoménologique sur les transferts de chaleur, d'air et d'humidité au sein des milieux poreux afin de comprendre, d'une part, les différents modes de fixation d'eau à l'échelle microscopique et d'autre part, d'appréhender les mécanismes mis en jeu lors de ces transferts. S'ensuit, une phase dédiée aux différentes méthodes et protocoles expérimentaux permettant de mesurer les principales propriétés microstructurale, thermique, hydrique, de fixation et de stockage d'humidité des matériaux. Les modèles de prédiction du comportement hygrothermique dans les milieux poreux font également l'objet de ce chapitre. Enfin, une dernière partie du chapitre sera consacrée à l'évaluation du degré de l'importance

du choix des matériaux de construction afin de répondre aux problématiques actuelles en enrichissant les bases de données de ces matériaux et en s'affranchissant de la méconnaissance de leur comportement dans le temps.

Lors du deuxième chapitre de ce de ce manuscrit, il sera présenté la démarche entreprise dans le cadre de cette thèse. Nous présentons les matériaux choisis pour piloter les différentes investigations expérimentales et numériques tout en justifiant notre choix ainsi que les protocoles expérimentaux auxquels nous avons faits appels.

Quant au troisième chapitre, il se focalise sur l'étude de l'effet de la formulation sur les propriétés hygrothermiques et mécaniques des matériaux biosourcés. Plusieurs formulations ont été réalisées pour cet effet tout en tenant compte de la taille et de la teneur en particules végétales. Les résultats de ce chapitre permettent de mieux appréhender le comportement hygrothermique et mécanique de ces matériaux à l'état sain (non vieilli) et de répondre aux différentes applications que nous rencontrons dans le domaine de la construction. Cela permet également de promouvoir de nouvelles perspectives économiques pour ces produits.

Le quatrième chapitre de ce manuscrit de thèse est basé sur une investigation expérimentale permettant d'étudier l'effet du vieillissement sur les propriétés hygrothermiques et mécaniques des matériaux biosourcés. Pour cela, trois protocoles de vieillissement accéléré ont été proposés et appliqués sur le béton de chanvre au laboratoire. La comparaison entre les propriétés du matériau vieilli et de référence permet de mettre en évidence l'effet du vieillissement sur l'évolution des propriétés fonctionnelles de ce matériau dans le temps. Cela permet également d'enrichir d'avantage les bases de données en termes des propriétés saines et vieilles et de s'affranchir de la barrière limitant l'utilisation de ces matériaux.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons une investigation numérique basée sur les résultats du chapitre précédent. Pour ce faire, un modèle de transfert de chaleur, d'air et d'humidité a été développé et validé. Ce dernier est ensuite alimenté par les propriétés vieilles et non vieilles afin de prendre en compte l'effet du vieillissement et de mieux appréhender son impact sur l'évolution de la température et de l'humidité relative dans le temps. De plus, ce modèle est ensuite couplé avec un autre modèle du comportement mécanique. Cela permettra de prédire non seulement le comportement hygrothermique du matériau, mais aussi l'évolution des déformations dans le matériau, notamment le gonflement et le rétrécissement des particules végétales issues des sollicitations hydriques et thermiques.

Enfin, le sixième chapitre est dédié sur l'étude de l'effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique et énergétique du béton de chanvre à plusieurs échelles. Une nouvelle méthode d'implémentation de ce phénomène dans le solveur Comsol Multiphysics est présenté et validé avec des résultats expérimentaux à l'échelle du matériau et à l'échelle de la paroi. De plus, un couplage entre Comsol Multiphysics et le code de simulation thermique dynamique TRNSYS est ainsi réalisé afin de mettre en évidence l'effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique et énergétique à l'échelle du bâtiment.

Chapitre I : Etat de l'art

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter un état de l'art sur la thématique abordée relative aux transferts de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux. Nous commençons d'abord par rappeler les concepts de base et des définitions afin de mieux comprendre le milieu poreux où se produisent les transferts de chaleur, d'air et d'humidité. S'ensuit une partie dédiée à l'étude des transferts hygrothermiques au sein des matériaux. Cette partie va nous permettre non seulement de comprendre les différents modes de fixation d'eau à l'échelle microscopique, mais aussi de mieux appréhender les mécanismes mis en jeux lors de ces transferts. Un peu plus loin, nous abordons les différentes méthodes et protocoles expérimentaux permettant de caractériser les principales propriétés microstructurales, thermiques, hydrique, de fixation et de stockage d'humidité des matériaux. Par la suite, une synthèse des principaux modèles phénoménologiques des transferts est présentée. Enfin, une dernière partie est dédiée au choix des matériaux de construction et à l'importance de s'intéresser au vieillissement des matériaux biosourcés notamment au béton de chanvre.

I.1. Milieu poreux

Un milieu poreux (Figure I-1) est un solide contenant des espaces vides qu'on appelle aussi espaces poreux, dispersés dans ce solide d'une façon régulière ou aléatoire. Ces derniers peuvent être occupés par une série de fluide qui se présentent sous forme liquide ou gazeuse [1].

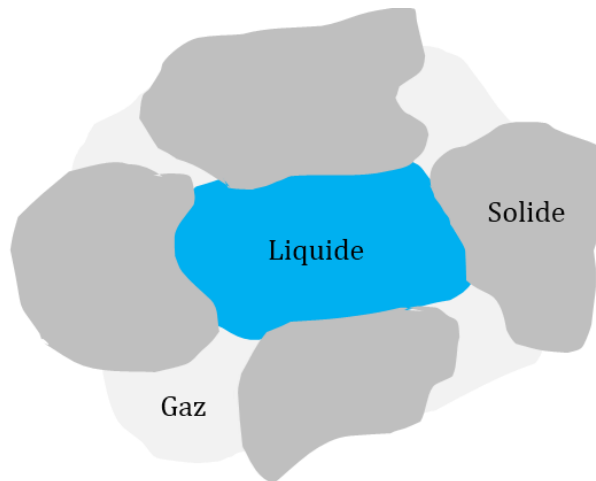


Figure I-1. Schéma explicatif d'un milieu poreux.

D'après la classification de l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) [2], les pores peuvent être classés dans trois domaines différents, à savoir :

- Les micropores dont le diamètre est inférieur à 2 nm.
- Les mésopores dont le diamètre est compris entre 2 nm et 50 nm.
- Les macropores dont le diamètre est supérieur à 50 nm.

En effet, un milieu poreux peut être décrit par un certain nombre de paramètres, nous pouvons notamment citer :

I.1.1. Porosité $\varepsilon_p(\%)$

Elle traduit le degré de remplissage d'un matériau par les vides. Elle est définie comme étant le rapport entre le volume des vides et le volume total du milieu poreux.

$$\varepsilon_p(\%) = \frac{V_p}{V_t} \times 100 \quad (\text{I-1})$$

Deux catégories de pores (Figure I-2) peuvent être distinguées :

- Les pores ouverts qui relient au moins deux faces du matériau poreux. Ces pores sont connectés entre eux par des canaux qui permettent le transfert de fluide.

- Les pores fermés qui sont isolés à l'intérieur du matériau et ne sont connectés à aucun autre pore. Ces derniers ne sont pas concernés par le transfert des masses fluides.

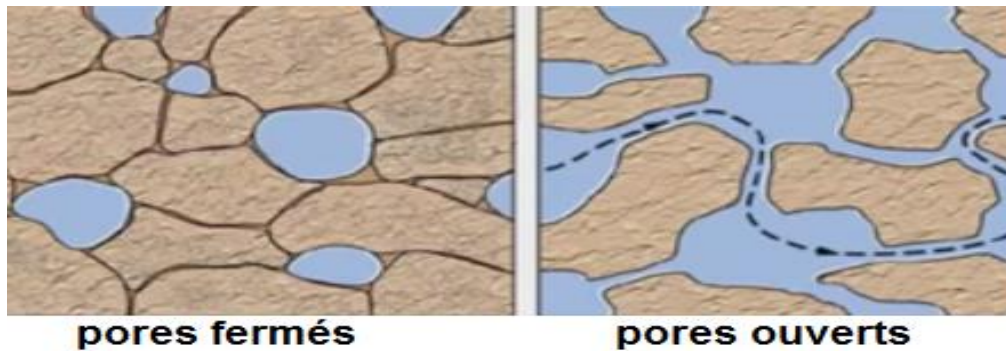


Figure I-2. Différents types de pores

1.1.2. Tortuosité(τ)

La tortuosité d'un pore est le rapport entre la longueur de la moyenne des lignes de courant du fluide traversant un échantillon (L_e) et son épaisseur (L) [5] (voir Figure I-3).

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (\text{I-2})$$

Cette grandeur peut nous renseigner sur deux aspects essentiels. Elle reflète, en effet, la mesure de l'écart à la rectitude des chemins traversant le matériau, comme elle nous informe également sur la quantité des pores qui n'interviennent pas dans les phénomènes de transport.

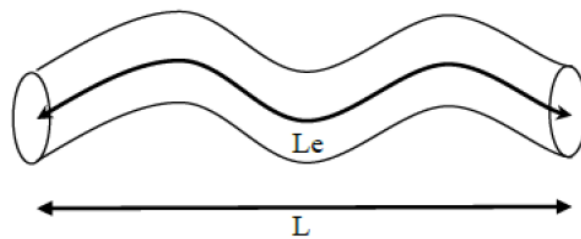


Figure I-3. Tortuosité d'un pore.

Ainsi, la tortuosité vaut « 1 » si les canaux sont droits et perpendiculaire par rapport à la surface, et elle augmente jusqu'à l'infinie si les canaux sont fermés [3].

1.1.3. Teneur en eau

La teneur en eau est l'une des propriétés les plus importantes qui permettent d'étudier les transferts d'humidité et la durabilité d'un matériau. Elle permet de quantifier la quantité d'eau contenue dans un domaine donné. On distingue :

- **Teneur en eau massique ω en (%) :** La teneur en eau massique d'un matériau est le rapport de la masse d'eau contenue dans le matériau sur la masse du matériau sec :

$$\omega = \frac{m_l}{m_t} \times 100 \quad (\text{I-3})$$

- **Teneur en eau volumique θ en (%) :** La teneur en eau volumique est le rapport du volume d'eau sur le volume apparent du matériau sec :

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} \times 100 \quad (\text{I-4})$$

- **Teneur en eau massique par unité de volume u en (kg/m³) :** La teneur en humidité en masse par unité de volume est le rapport de la masse d'eau sur le volume apparent du matériau sec.

$$u = \frac{m_l}{V_t} \quad (\text{I-5})$$

I.1.4. Degré de saturation en eau (SR)

Ce paramètre est compris entre 0 et 1. Il nous indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini par le rapport du volume d'eau au volume des vides.

$$SR = \frac{V_l}{V_t - V_s} \quad (\text{I-6})$$

I.1.5. Connectivité

La connectivité est un paramètre microscopique qui mesure le degré de connexion et de liaison entre les pores. Elle constitue une propriété très importante car elle nous informe davantage sur les écoulements des fluides et les chemins traversés dans une structure poreuse. D'après Dullien *et al.* [4], c'est le plus grand nombre de branches du réseau pouvant être coupées sans créer des parties indépendantes :

$$C = b - n + 1 \quad (\text{I-7})$$

Où b est le nombre de branches et n est le nombre de nœuds.

I.1.6. Volume Élémentaire Représentatif

C'est le volume minimum à utiliser pour capturer l'ensemble de l'information statistique sur la microstructure du matériau poreux. Ce paramètre est utilisé généralement lors de la modélisation des phénomènes de transfert à l'échelle macroscopique, contrairement à

l'échelle microscopique qui est associée au diamètre du pore. La condition (I-8) doit être alors vérifiée [5] :

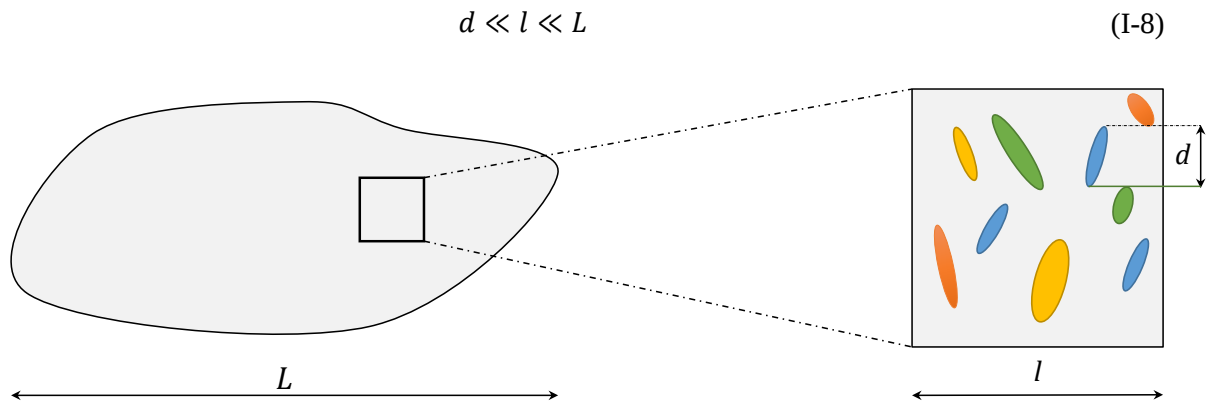


Figure I-4. VER d'un milieu hétérogène.

Dans la plus part des cas, ce volume peut être défini en effectuant un suivi de l'évolution de la porosité du matériau en fonction de son volume. Le VER sera fixé lorsque la porosité ne varie plus avec la variation du volume (Figure I-5).

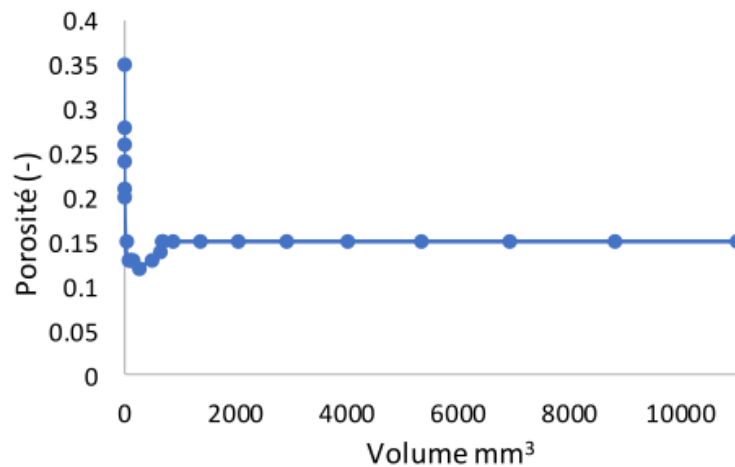


Figure I-5. Evolution de la porosité avec la taille du volume de mesure [5].

1.1.7. Humidité Relative

C'est le rapport de la pression exercée par la vapeur d'eau dans l'air sec divisée par la pression de vapeur saturante (la pression limite) que peut exercer cette vapeur d'eau dans cet air sec à la même température. Autrement dit, c'est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau (P_v) et la pression de vapeur saturante (P_{vsat}) exprimée à la même température. Elle permet de connaître la fraction de vapeur d'eau réellement présente dans l'air sous une température donnée :

$$HR = \frac{P_v}{P_{vsat}} \times 100 \quad (I-9)$$

Pour une température $0^\circ\text{C} < T < 80^\circ\text{C}$, la pression de vapeur saturante peut être donnée par la formule empirique présentée par l'expression (I-10). La précision est de $\pm 0,15\%$ [6]:

$$P_{vsat}(T) = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T - 37,58}\right) \quad (I-10)$$

Avec T est la température absolue en Kelvin [K].

I.1.8. Surface spécifique

La surface spécifique est l'un des paramètres essentiels pour la caractérisation des milieux poreux. Elle représente la surface porale interne par unité de masse ou de volume du matériau, qui est accessible aux molécules.

I.2. Transfert et stockage de la chaleur dans les milieux poreux

Dans le domaine du bâtiment, les matériaux de construction sont considérés comme des milieux poreux où les phénomènes de transferts et de stockage hygrothermiques se produisent.

Les modes de propagation de la chaleur dans les milieux poreux sont en nombre de quatre [7], à savoir : la conduction, la convection, le rayonnement et le changement de phase. Dans cette partie, ces derniers sont étudiés séparément, mais généralement dans le cas pratique, ils se produisent simultanément.

I.2.1. Conduction

La conduction est le mode de transfert existant dans un milieu donné sans qu'il y ait déplacement apparent de matière. Autrement dit, c'est le transfert au sein d'un milieu opaque «solide, gaz, liquide» sans déplacement de matière sous l'influence d'un gradient de température (Figure I-6).

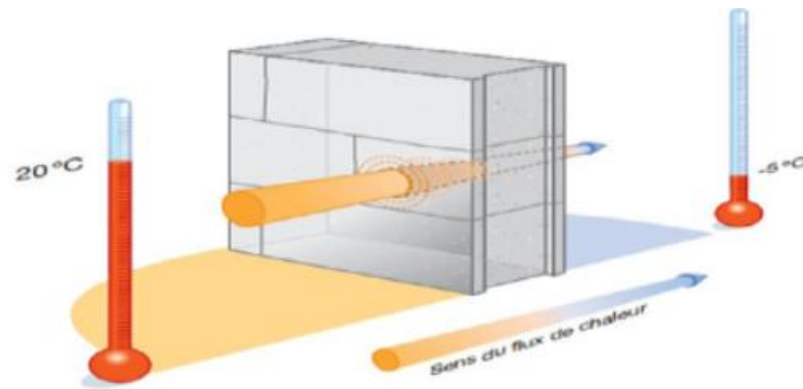


Figure I-6. Transfert de chaleur par conduction [8].

La théorie de la conduction repose sur la loi de Fourier : la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température :

$$\begin{aligned}\Phi &= -\lambda S \text{grad}(T) = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \\ \Phi &= -\lambda \text{grad}(T) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\end{aligned}\tag{I-11}$$

Avec :

λ : conductivité thermique du milieu	(W m ⁻¹ K ⁻¹)
S : aire de la section de passage du flux de chaleur	(m ²)
x : variable d'espace dans la direction du flux	(m)
Φ : flux de chaleur transmis par conduction	(W)
e : épaisseur de la paroi	(m)
$R = e/\lambda S$: résistance thermique	(°C/W)
T : température	(K)

1.2.2. Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide. L'énergie étant transmise par déplacement du fluide (Figure I-7).

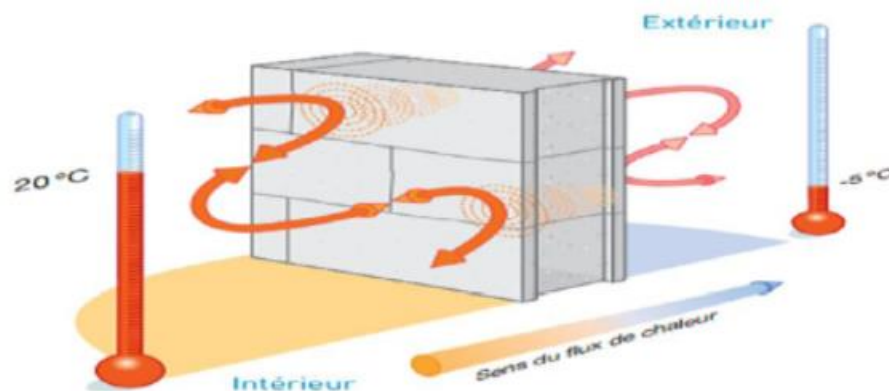


Figure I-7. Transfert de chaleur par convection [8].

Remarque :

- ✓ La valeur du coefficient d'échange convectif dépend des caractéristiques du fluide et de sa température, de la nature de l'écoulement et de la géométrie de la surface d'échange.
- ✓ La quantité de chaleur échangée par unité de temps dépend de plusieurs paramètres :
 - La différence de température entre la paroi et le fluide ;
 - La vitesse du fluide ;
 - La capacité thermique massique du fluide ;
 - La surface d'échange ;
 - L'état de surface du solide et sa dimension, etc.

Dans le cas pratique, on distingue deux types de convection :

a) Convection naturelle ou libre

C'est lorsque le gradient de température est le seul responsable du transfert. Autrement dit, l'écoulement du fluide n'est pas imposé, il n'a lieu que parce que les particules fluides reçoivent de la chaleur au contact de la paroi et de ce fait, subissent des variations de masse volumique qui entraînent leur déplacement dans le champ de la pesanteur.

b) Convection forcée

Ce type de convection apparaît lorsque le mouvement du fluide est provoqué par une action mécanique.

En effet, Tamene *et al.* [9] ont étudié l'influence du coefficient d'échange convectif de la face intérieure (hl) sur l'évolution et l'interaction température-humidité. Pour cela, ils ont fixé les humidités relatives intérieures et extérieures de l'air respectivement à 50% et 70%, et les températures de l'air à l'intérieur et à l'extérieur respectivement à 22°C et 35°C. Enfin, ils ont fixé le coefficient d'échange sur la face extérieure et la température de leur matériau (condition initiale) respectivement à 13 W/ (m².C) et à 20°C. Leurs résultats ont montré que ce paramètre a un effet inverse sur les teneurs en eau que sur les températures (Figure I-8). Par ailleurs, l'étude menée par Gourlay *et al.* [10] a montrée l'importance des transferts convectifs vis-à-vis de la régulation thermique d'un mur en béton de chanvre. Ils ont constaté que les apports d'air continus de vapeur d'eau depuis l'extérieur favorisent les changements de phase au sein du matériau, ce qui permet d'amortir considérablement les variations de température dans le mur.

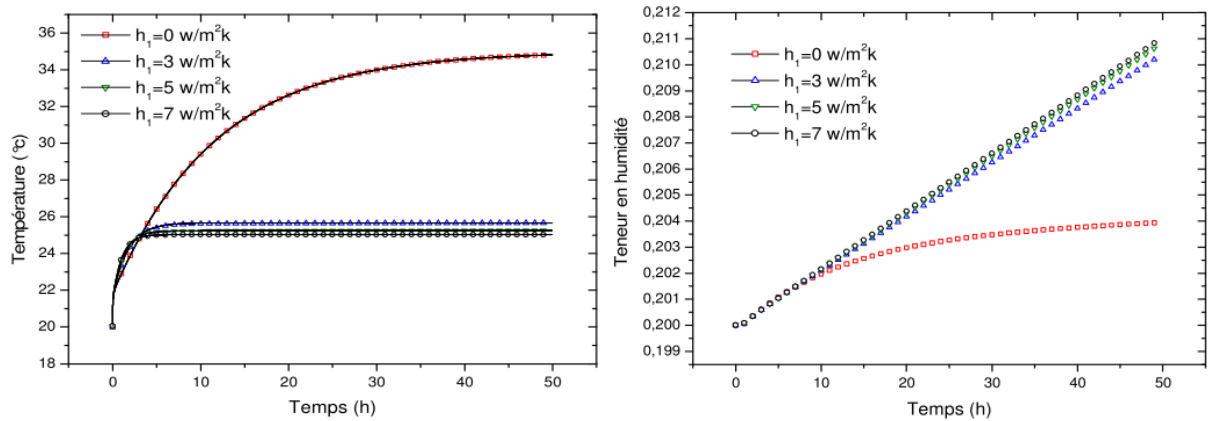


Figure I-8. Effet du coefficient d'échange convectif sur la température et la teneur en eau de la face extérieure [9].

I.2.3. Rayonnement

Le rayonnement est un processus physique de transmission de chaleur à distance sans support matériel. Donc c'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (Figure I-9) [11].

Le flux de chaleur est donné par la relation de Stefan-Boltzmann comme suit :

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma F_{12} S_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{I-12})$$

Avec :

- F_{12} : facteur de forme de la surface S_1 vis-à-vis de S_2 ;
- ε : Émissivité de surface ;
- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ [W/(m² K⁴)] : constante de Stefan-Boltzmann ;
- S : surface limite entre le corps chaud et le milieu ambiant ;

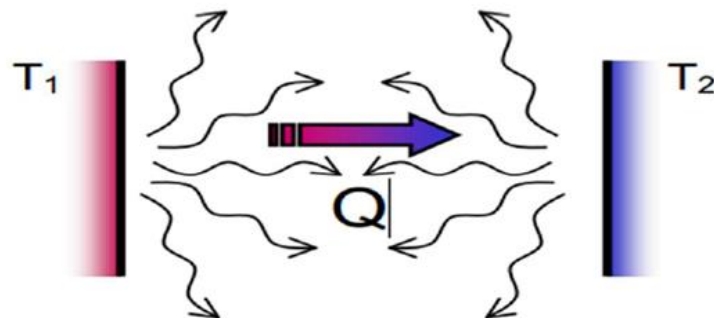


Figure I-9. Transfert de chaleur par rayonnement [8]

1.2.4. Changement de phase

Lors d'un changement d'état d'un corps pur, la chaleur se transfère de façon isotherme. Le flux de chaleur échangé avec l'environnement (milieu extérieur) est proportionnel à la quantité de matière qui change de phase.

$$\dot{Q} = q_m L \quad (\text{I-13})$$

$\dot{Q}$: Flux de chaleur échangé par le corps avec l'environnement exprimé en [W] ;

q_m : Débit massique [kg.s^{-1}] ;

L : Chaleur latente de changement de phase [J.kg^{-1}] ou en [kg.mol^{-1}] ;

La chaleur latente massique est par définition, la quantité de chaleur nécessaire pour permettre le changement d'état d'une unité de masse d'un corps pur d'une substance sous une pression constante, autrement dit, c'est la variation d'enthalpie d'un corps pour passer d'un état à un autre.

Si on doit fournir de l'énergie à un corps pour passer d'un état à un autre, la chaleur latente de changement d'état est alors positive. C'est le cas de la vaporisation qui nécessite une fourniture d'énergie pour passer du liquide à la vapeur. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si le corps libère de l'énergie, dans ce cas la chaleur latente de changement d'état est négative. Par exemple, la condensation est une opération qui correspond à une libération de chaleur par la vapeur qui se condense.

1.2.5. Stockage d'énergie dans les matériaux poreux

Sous des conditions isobares, le stockage de la chaleur est défini par la notion d'enthalpie. Pour une température appartenant à l'intervalle [-20°C ; 40°C], l'enthalpie varie linéairement avec la variation de la température.

Pour un matériau de construction sec, son enthalpie est donnée par la relation (I-14) :

$$H_s = \rho \times C_p \times T \quad (\text{I-14})$$

Où, H_s [J/m^3] est l'enthalpie du matériau poreux, ρ [kg/m^3] la masse volumique et C_p [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] sa chaleur spécifique.

1.3. Transferts d'humidité dans les milieux poreux

Le transfert d'humidité en milieu poreux résulte du mouvement de chacune des phases présentes (liquide et vapeur).

I.3.1. Transfert de la vapeur d'eau

Dans un milieu poreux, le transport de la vapeur d'eau se fait par diffusion sous l'influence d'un gradient de concentration. Selon le diamètre des pores, on peut distinguer trois types de diffusion de la vapeur d'eau, à savoir :

a) Diffusion moléculaire (diffusion de Fick)

Ce mode de diffusion se manifeste lorsque le diamètre du pore est supérieur au libre parcours de la molécule diffusante. Cela revient à dire que la probabilité de choc entre deux molécules est supérieure à celle du choc des molécules contre les parois du pore [12]. Ce type de transfert de vapeur d'eau est donc gouverné par la collision entre les particules ou les molécules sans aucune interaction avec la matrice solide (Figure I-10).

Le transfert par diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air est donné en fonction du gradient de concentration de vapeur par la loi de FICK comme suit [13] :

$$j_v = -D_a \nabla \rho_v \quad (\text{I-15})$$

j_v : Densité de flux massique de vapeur [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$] ;

D_a : Coefficient de diffusion de vapeur dans l'air [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], il caractérise le mouvement résultant de la diffusion.

$\nabla \rho_v$: Gradient de concentration de la vapeur d'eau ;

En assimilant la vapeur d'eau à un gaz parfait, la loi de FICK peut s'écrire en fonction du gradient de pression de vapeur [13] (voir expression (I-16)) :

$$j_v = -\frac{D_a}{RT} \nabla P_v \quad (\text{I-16})$$

De Vries [14,15] a proposé un coefficient de diffusion de vapeur, il est donné par la relation ((I-17)) :

$$D_a(P, T) = c \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad (\text{I-17})$$

Où, P_0, T_0 désignent un état de référence, on prendra $P_0 = 101325 \text{ [Pa]}$, $T_0 = 273,15 \text{ [K]}$

$c = 2,17 \times 10^{-5} \text{ [m}^2/\text{s]}$, et $n = 1,88$.

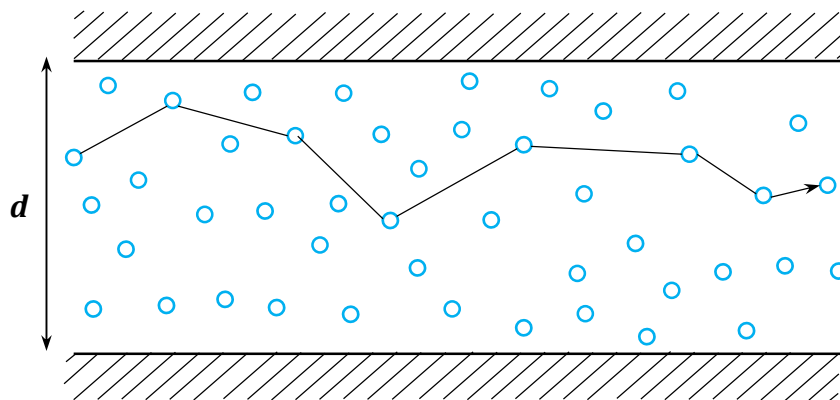


Figure I-10. Représentation schématique de la diffusion moléculaire.

b) Diffusion de Knüdsen (effusion)

La diffusion de Knüdsen ou l'effusion représente le deuxième type de diffusion qui se produit dans les pores ayant un diamètre largement inférieur au libre parcours moyen. Dans ce cas, il n'y a plus d'interaction entre molécules, c'est plutôt des collisions entre particules/parois du pore (Figure I-11). Ce mode de transfert est caractérisé par le nombre de Knüdsen (K_n) qui sépare la diffusion de l'effusion. Il est défini par le rapport entre le libre parcours moyen (L_{pm}) et le diamètre du pore comme suit :

$$K_n = \frac{L_{pm}}{d} \quad (\text{I-18})$$

Le libre parcours moyen (L_{pm}) caractérise la distance parcourue par une molécule entre deux chocs intermoléculaire, il dépend de la température et de la pression.

Si $K_n \ll 1$, soit $d \gg L_{pm}$: le transport se fait par diffusion moléculaire, sinon le transport se fait par la diffusion de Knüdsen.

Le coefficient de diffusion de Knüdsen D_k [m^2/s] pour un capillaire cylindrique de rayon r (cm) est défini par la relation (I-19) [16] :

$$D_k = 9,7 \times 10^3 \times r \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (\text{I-19})$$

Où T est la température absolue et M la masse molaire de la vapeur d'eau.

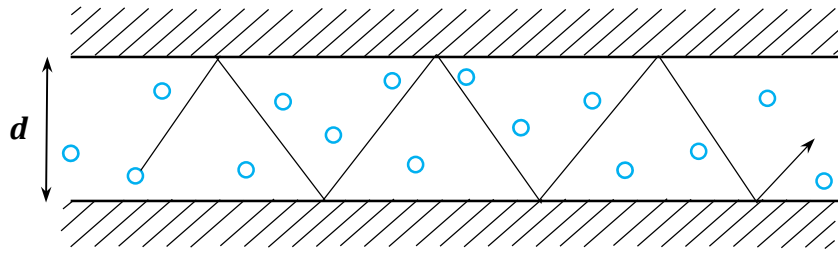


Figure I-11. Représentation schématique de la diffusion de Knüdsen.

c) Diffusion de surface

C'est le mouvement des molécules de la vapeur d'eau adsorbées au niveau de la surface des pores (Figure I-12). Le mouvement de ces molécules nécessite une certaine énergie d'activation qui permet la libération et le saut des molécules adsorbées [17].

La densité de flux de la vapeur d'eau j_{sv} [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$] dans ce cas s'exprime en fonction de la concentration de la phase adsorbée C_μ :

$$j_{sv} = -D_s \times \nabla C_\mu \quad (I-20)$$

Où D_s [m^2/s] est le coefficient de diffusion au niveau de la surface.

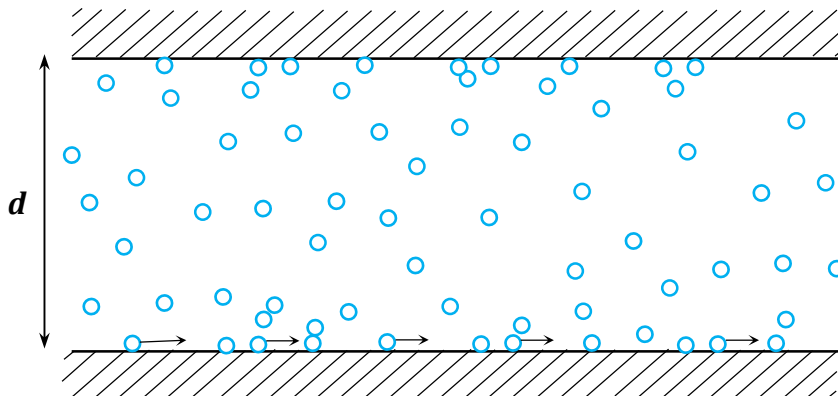


Figure I-12. Représentation schématique de la diffusion de surface.

En supposant un équilibre local entre la phase adsorbée et la phase libre, l'équation (I-20) peut être exprimée en termes de concentration de la phase gazeuse. Cette hypothèse reste acceptable car le taux d'adsorption est beaucoup plus important que les cinétiques de diffusion dans les deux phases [15]. Dans le cas où l'équilibre local entre la phase adsorbée et la phase liquide prend la forme $C_\mu = f(C)$, alors l'équation (I-21) devient comme suit :

$$j_{sv} = -D_s \cdot f'(C) \cdot \nabla C \quad (I-21)$$

Avec, la fonction (f) représente l'isotherme d'adsorption.

Dans les milieux poreux, le coefficient de diffusion effectif est égal à la multiplication d'une constante inférieure à l'unité, au coefficient de diffusion défini précédemment (moléculaire, Knüdsen et surfacique) [15]. L'expression de ce coefficient est donnée dans le Tableau I-1:

Tableau I-1 Coefficients de diffusion effectifs dans les milieux poreux [15]

Diffusion moléculaire	Diffusion de Knüdsen	Diffusion de surface
$D_v^* = \left(\frac{\varepsilon}{\tau}\right) D_a$	$D_v^* = \left(\frac{\varepsilon}{\tau}\right) D_k$	$D_v^* = (1 - \varepsilon) D_s$
ε et τ représentent respectivement la porosité et la tortuosité		

La Figure I-13 résume les différents modes de diffusion de la vapeur d'eau dans les milieux poreux :

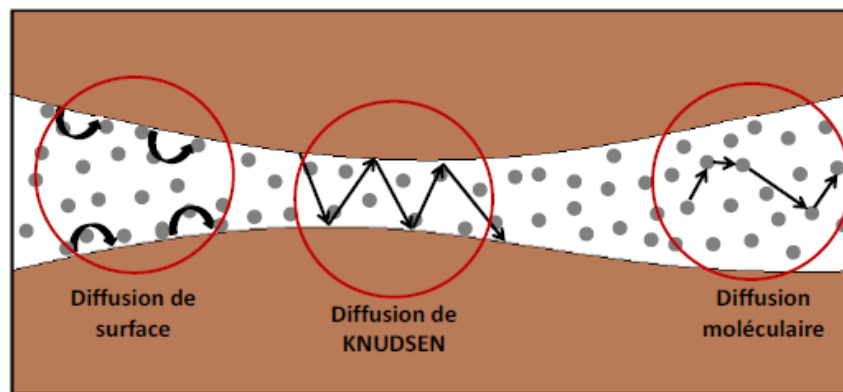


Figure I-13. Modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore [18].

Un autre type de transfert de la vapeur d'eau dans les milieux poreux peut se manifester dans le cas non-isotherme. Ce mode est provoqué par un gradient de température. Vu que la diffusion thermique est basée sur la différence entre la masse volumique de l'air sec et celle des molécules de vapeur d'eau, par conséquent, un mouvement des particules de vapeur d'eau se fait du froid au chaud [18].

1.3.2. Transfert de la phase liquide

L'eau présente dans les pores sous forme liquide résulte soit de l'adsorption des molécules d'eau, soit de la condensation capillaire. L'écoulement de cette eau est dû à un gradient de pression liquide au sein de l'eau dont le sens est suivant les pressions décroissantes.

Philip and De Vries [14] admettent que le déplacement d'eau à l'intérieur d'un pore se fait avec un faible débit plutôt sous l'effet d'un gradient d'humidité relative que d'un gradient de masse volumique.

Le débit massique j_l d'un écoulement laminaire au sein d'un tube de rayon r , en supposant que les forces gravitaires sont négligeables est donné par la loi de Poiseuille (I-22) :

$$j_l = -\rho_l \frac{\pi \times r^4}{8\mu} \frac{\partial P_l}{\partial x} \quad (\text{I-22})$$

Où P_l la pression liquide [Pa] et μ la viscosité dynamique [N.s.m⁻²].

I.4. Modes de fixation d'humidité

Dans la pratique, il existe deux mécanismes fondamentaux de fixation d'humidité, à savoir, l'adsorption de surface et la condensation capillaire.

Ce phénomène est étroitement lié à la dimension des pores. Pour cela, il est important de différencier les pores de petites tailles (inférieure à 100 nm) où la fixation d'humidité par adsorption et capillarité est importante, des pores de grandes tailles (supérieure à 100nm). Ces derniers sont peu sensible à ce phénomène [12].

Le Tableau I-2 décrit les deux domaines d'un milieu poreux :

Tableau I-2 Description des domaines hygroscopique et non hygroscopique d'un milieu poreux [12]

Domaine hygroscopique	Domaine non hygroscopique
Rayon des pores < 100nm	Rayon des pores > 100 nm
Adsorption et condensation capillaire importantes	Adsorption et condensation capillaire faibles

I.4.1. Adsorption de surface

Si on fixe la température et on varie l'humidité relative d'un milieu dans lequel est placé un échantillon de matériau poreux, on remarque une relation de proportionnalité entre le poids de l'échantillon et l'humidité relative. Cela est dû au phénomène d'adsorption où les molécules d'eau se fixent physiquement sur la surface totale des pores (surface spécifique) sous l'effet des forces de VAN DER WAALS. Elles se fixent pour former une, puis plusieurs couches successives de molécules d'eau.

Donc, il existe deux étapes distinctes d'adsorption, à savoir :

- ✓ **Adsorption mono-moléculaire** définie par la fixation d'une seule couche de molécule d'eau à la surface des pores. Dans ce cas, la phase liquide est discontinue tandis que la phase gazeuse est continue.
- ✓ **Adsorption pluri-moléculaire** où se fixent plusieurs couches sur la première, mais à chaque fois avec une surface inférieure à celle de la couche précédente [12]. L'énergie de liaison à partir de la deuxième couche est égale à la chaleur latente de vaporisation [19].

L'objectif des théories d'adsorption est la détermination de la teneur en eau adsorbée en fonction de l'humidité relative. L'équilibre des échanges de molécules d'eau entre la vapeur au-dessus de la surface et la phase condensée, donne l'expression de la teneur en eau volumique [19].

$$\theta = \frac{C \cdot e_m \cdot S_0 \cdot HR}{(1 - HR)(1 + (C - 1)HR)} \quad (I-23)$$

Avec,

θ [m³/m³] : la teneur en eau volumique,

HR [%] : l'humidité relative,

S_0 [m²] : la surface spécifique du solide,

e_m [m] : l'épaisseur d'une couche de molécule,

C [.]: Un coefficient qui dépend de la température et de l'énergie de liaison des molécules au solide, il est donné par l'expression (I-24) :

$$C = \exp\left(\frac{E_l - L_{vm}}{R \cdot T}\right) \quad (I-24)$$

L_{vm} [J/mol] est la chaleur latente molaire de vaporisation,

R [J/mol] est la constante des gaz parfaits,

E_l [J/mol] est l'énergie de liaison de la première couche de molécules,

T [K] est la température absolue,

1.4.2. Condensation capillaire

Ce phénomène explique pourquoi un matériau poreux en équilibre avec le milieu extérieur, se remplit progressivement d'eau lorsque l'humidité relative augmente de manière isotherme.

En effet, quand l'humidité relative augmente, on peut distinguer la différence entre l'adsorption pluri-moléculaire et la condensation capillaire dont laquelle les couches poly-

moléculaires se rejoignent pour former un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque (voir Figure I-14 et Figure I-15).

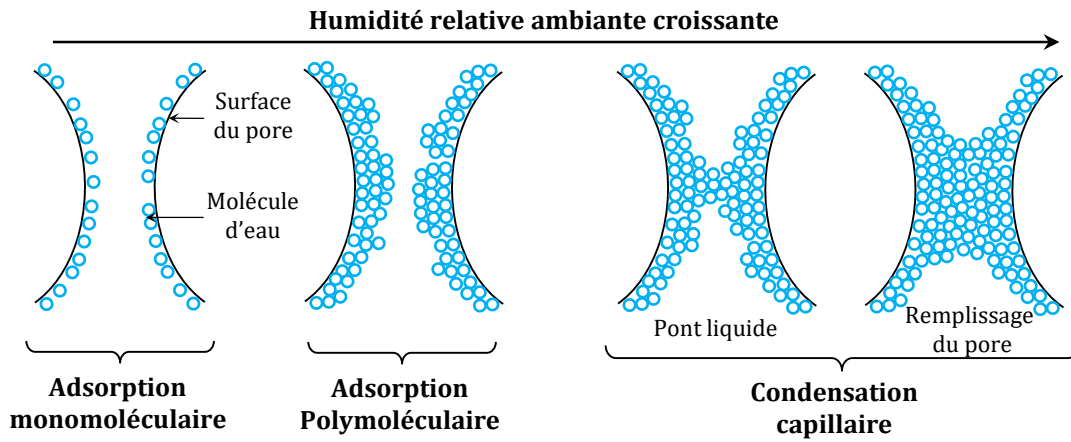


Figure I-14. Représentation schématique des phénomènes d'adsorption et de condensation moléculaire dans un pore [20].

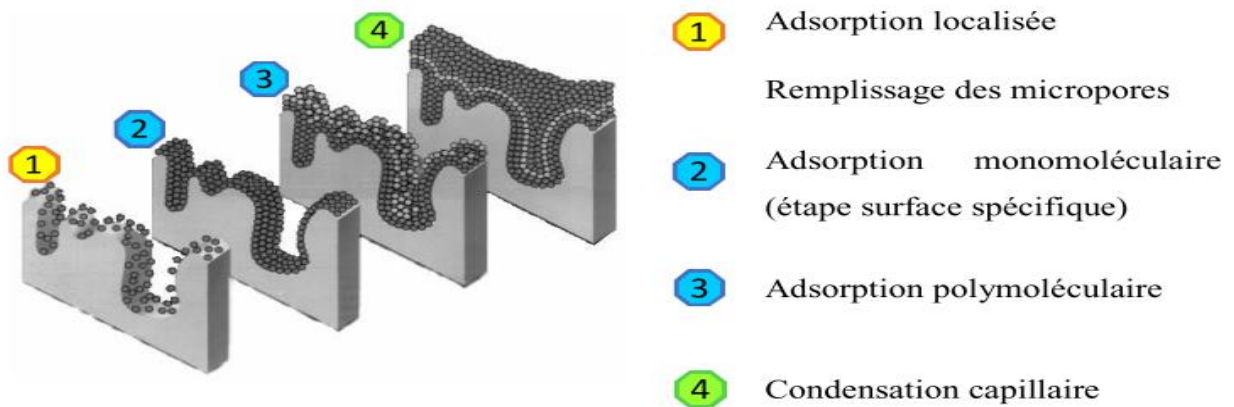


Figure I-15. Etapes de remplissage d'un pore [5]

Lorsque ce phénomène se présente, l'eau capillaire se trouve en équilibre avec l'atmosphère ambiante, ce qui se traduit par la loi de Kelvin comme suit [13] :

$$P_c = P_l - P_0 = \frac{R \cdot T \cdot \rho_e \cdot \ln(HR)}{M_e} \quad (I-25)$$

Avec,

P_c : Pression capillaire [Pa],

P_l : Pression liquide [Pa],

P_0 : Pression atmosphérique [Pa],

ρ_e : Masse volumique de l'eau [Kg/m³]

M_e : Masse molaire de l'eau [Kg/mol]

La loi de Laplace s'écrit de la manière suivante :

$$P_l - P_0 = - \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{r_k} \quad (\text{I-26})$$

Avec,

σ : La tension superficielle (dans le cas de l'eau, elle vaut 0,075 kg.s⁻²),

α : L'angle de mouillage ($< \pi/2$),

r_k : Rayon de courbure du ménisque,

La combinaison entre les équations conduit à la relation de Kelvin-Laplace :

$$r_k = r - e_a = \frac{-M_e \cdot 2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{R \cdot T \cdot \rho_e \cdot \ln(HR)} \quad (\text{I-27})$$

Avec,

r : Rayon du pore [m],

e_a : Epaisseur de la couche adsorbée [m],

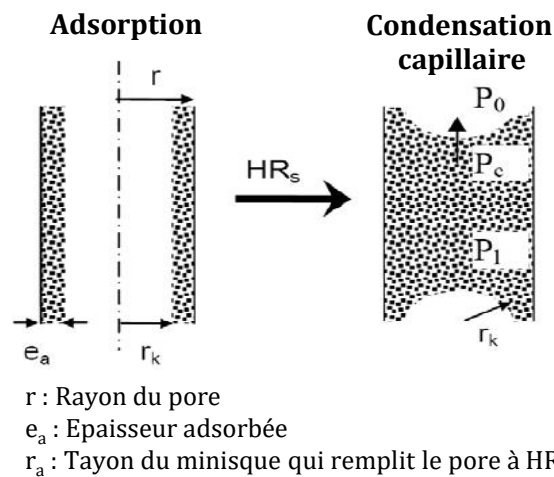


Figure I-16. Condensation capillaire dans un pore [20].

I.5. Isotherme d'adsorption/désorption

La courbe traduisant le développement de la teneur en eau d'un matériau en équilibre avec l'humidité relative de l'air pour une température donnée, est appelée isotherme d'adsorption si elle a été mesurée expérimentalement en partant d'un échantillon sec, et isotherme de désorption si la variation de la teneur en eau part d'un état saturé en eau [21].

Ces dernières sont déterminées de façon discontinues par paliers d'humidité relative croissantes puis décroissantes (ou inversement). Elles sont indispensables car elles fournissent une véritable carte d'identité hydro-structural du matériau poreux [13].

Généralement, les isothermes d'adsorption/désorption présentent trois zones (Figure I-17). Chaque zone correspond à un mode de fixation particulier d'humidité sur le produit [21].

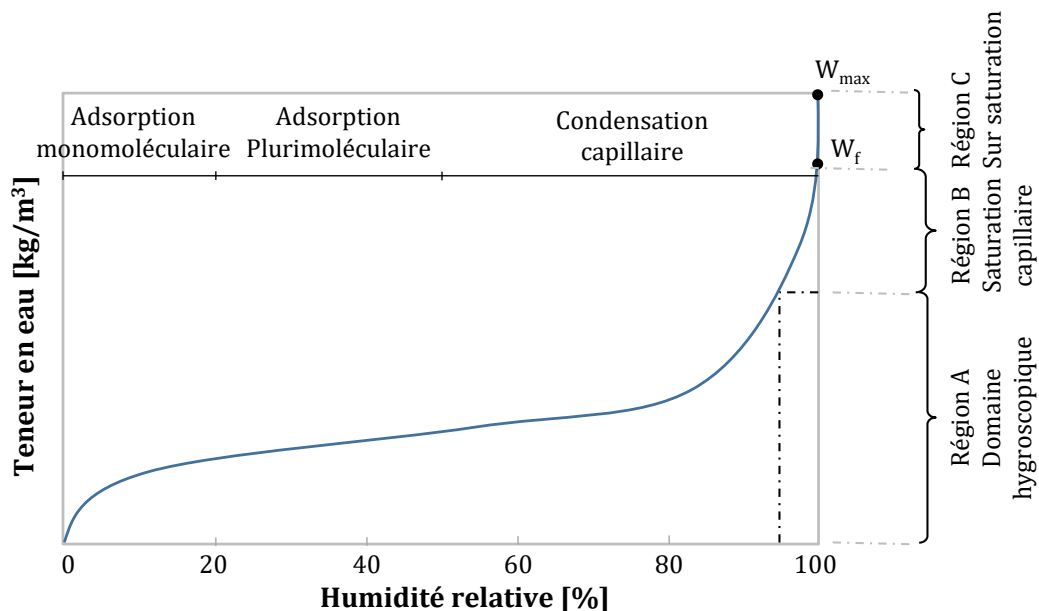


Figure I-17. Différentes zones des isothermes de sorption [12].

- ✓ **Zone 01 :** pour de faible humidité relative ($HR < 20\%$), on constate la constitution d'une monocouche moléculaire recouvrant la surface des pores. Dans ce cas, l'eau se trouve dans un état rigide vu l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Une fois que toute la surface est saturée, on note le passage à la zone suivante.
- ✓ **Zone 02 :** pour une humidité relative comprise entre 20% et 50%, l'adsorption des molécules s'effectue sur la première couche, donc il se produit une adsorption multimoléculaire. L'isotherme est linéaire et l'eau se trouve dans un état intermédiaire entre solide et liquide.

- ✓ **Zone 03** : pour une humidité relative comprise entre 50% et 100%, il y a condensation capillaire. Dans ce cas, l'eau se trouve dans un état liquide dans les pores du matériau.

L'allure de ces isothermes dépend essentiellement de la géométrie et de la distribution des pores du matériau étudié. D'après Sing *et al.* [2], la plus part des isothermes peuvent être regroupés en six types comme il est montré dans la Figure I-18.

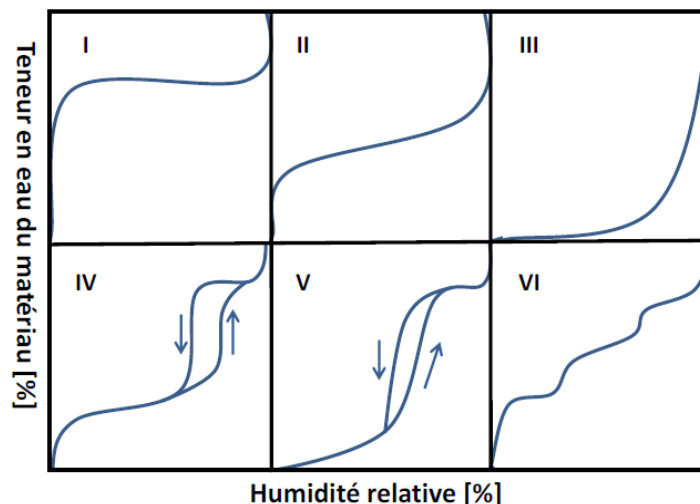


Figure I-18. Types d'isothermes suivant la classification de l'IUPAC [2].

- ✓ **Type I** : Le matériau ne contient que des micropores qui ont tendance à se saturer pour de faibles hygrométries. Le palier horizontal confirme qu'aucune adsorption ne se produit pour des valeurs plus élevées d'humidité relative.
- ✓ **Type II** : Milieu non poreux ou macroporeux. Augmentation progressive de l'adsorption avec l'augmentation de l'humidité relative. Le début de la ligne droite indique généralement la fin de l'adsorption mono-moléculaire et le début d'adsorption multimoléculaire, donc il y a épaisseur progressive de la couche adsorbée.
- ✓ **Type III** : La microstructure du milieu est identique que celle du type 2, seulement dans ce type, l'adsorption est très faible. Ce type d'isotherme est rarement rencontré.
- ✓ **Type IV** : Initialement, pour des faibles pressions, l'isotherme est identique à celle du type 2. Une condensation capillaire se produit pour des hautes pressions de vapeur. Elle correspond à un milieu méso poreux. Dans ce cas, le phénomène est irréversible, on observe une hystérèse entre les phases d'adsorption et de désorption.
- ✓ **Type V** : La microstructure du milieu est la même que celle du type 4 avec une faible interaction entre la partie solide et le fluide adsorbé. Ce type d'isotherme est rarement rencontré.

- ✓ **Type VI :** Cette isotherme correspond à un milieu poreux dans lequel les couches adsorbées se forment les unes après les autres, caractérisées par un point d'inflexion qui explique le passage d'une couche à une autre. La hauteur du pas représente la capacité monocouche pour chaque couche adsorbée.

Dans le cas pratique, l'interprétation d'une isotherme réelle s'effectue pour chaque portion de cette dernière en fonction des isothermes types puisque les isothermes obtenues expérimentalement ne correspondent que rarement à l'un des types précités.

Baroghel-Bouny [22] a étudié les deux premières isothermes de désorption de plusieurs échantillons différents de pâte de ciment durci. Il a remarqué que certains des échantillons ont eu des changements de microstructure qui se traduisent par des teneurs en eau plus élevées mesurées durant la seconde isotherme de sorption dans les gammes d'humidité relative faibles (en particulier entre 33% et 12%). Ils ont conclu que ces changements de microstructure causés par le séchage sont réversibles. Ces résultats ont été confirmés récemment par Wu *et al.* [23].

En effet, la température affecte considérablement les isothermes de sorption. L'étude menée par Radjy *et al.* [24] entre 20°C et 55°C a montré que la température est inversement proportionnelle à la quantité d'eau absorbée à une humidité relative donnée. Ce qui a été également observé par Aït Oumeziane *et al.* [25] sur le béton de chanvre dans la gamme de température allant de 10°C à 23°C. Ce constat a été également confirmé par Ferroukhi *et al.* [26]. Ces différences entre les isothermes de sorption sous différentes températures sont causées principalement par les propriétés d'eau dépendant de la température [23]. Par ailleurs, Tran *et al.* [27] préconise la nécessité de tenir compte de l'influence de la température sur les isothermes de sorption afin d'améliorer la qualité de la prédiction du comportement hygrothermique des matériaux étudiés. D'autre part, Colinart *et al.* [28] ont étudié expérimentalement le séchage du béton de chanvre. Ils ont remarqué que le processus de fabrication influence la teneur en eau initiale, ce qui influence par conséquent le temps de séchage et la densité finale. Donc, le comportement hygrothermique des matériaux au cours de séchage dépend étroitement de la formulation du matériau.

1.6. Phénomène d'hystérésis

Pour une humidité relative donnée, le matériau poreux va tendre vers une teneur en eau en adsorption, différente de celle obtenue en désorption. Cet écart est dû au phénomène d'hystérésis [6,29]. Plusieurs formes de boucles d'hystérésis peuvent être schématisées selon

la nature du matériau et sa structure poreuse. Elles sont classées par l'IUPAC [2] en quatre types (Figure I-19) :

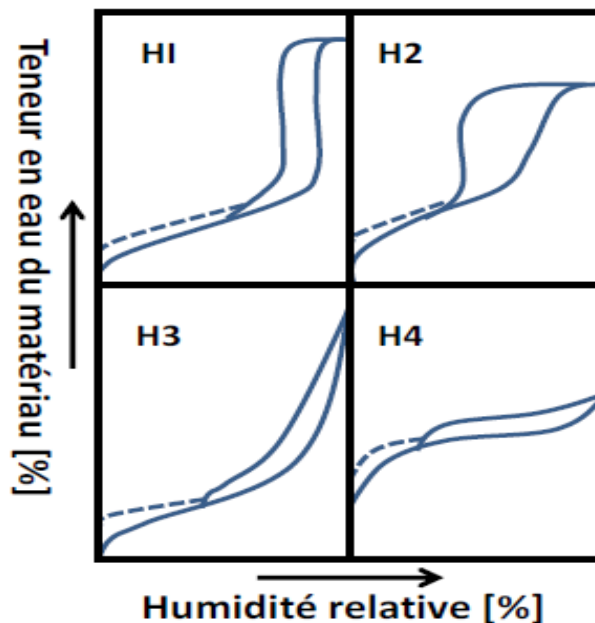


Figure I-19. Classification des boucles d'hystérésis d'après l'IUPAC [2].

- ✓ **Type H1** : observée dans le cas où le matériau possède une distribution très étroite de mésopores.
- ✓ **Type H2** : généralement obtenues dans le cas d'un matériau ayant des mésopores en intercommunication.
- ✓ **Type H3** : obtenue dans le cas où le matériau poreux forme des agrégats. Elle peut être attribuée à une condensation capillaire s'effectuant dans une texture non rigide et qui n'est pas caractéristique d'une mésoporosité définie.
- ✓ **Type H4** : observée avec un matériau microporeux ayant des feuillets liés entre eux de façon plus ou moins rigides et entre lesquels peut se produire une condensation capillaire.

Bellini et *al.* [30] ont expliqué ce phénomène par deux causes principales :

- La première interprétation est le fait que le rayon de courbure d'une surface sphérique représente la moitié de celui d'une surface cylindrique de même rayon. Lors de l'adsorption, l'évolution de l'interface fluide-vapeur se fait à partir d'une surface cylindrique limitée par les parois du pore. En désorption, elle se fait à partir d'un ménisque sphérique, par conséquent, le rayon de courbure de l'adsorption est plus grand que celui de la désorption, autrement dit, on aura deux rayons de courbures

associés à deux teneurs en eaux différentes (Figure I-20). C'est ce qu'on appelle parfois par le problème d'amorçage [19].

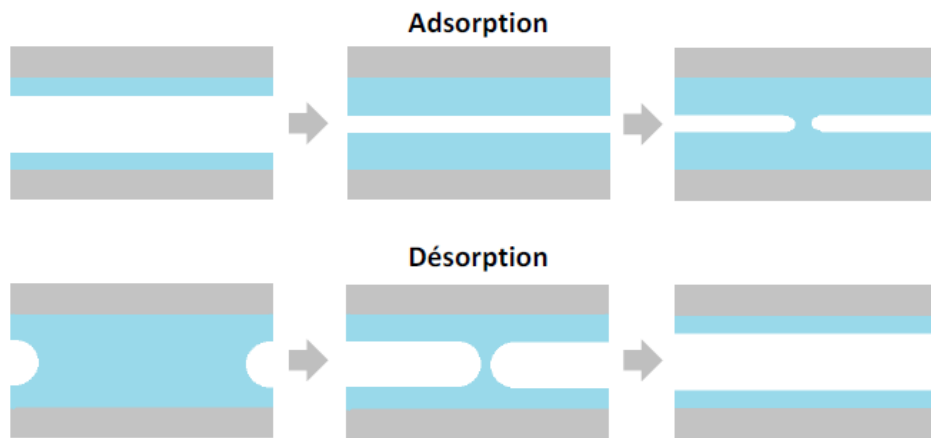


Figure I-20. Adsorption et désorption dans un pore [30]

- La deuxième cause interprétant ce phénomène d'hystérésis est la distribution irrégulière de la taille des pores (Figure I-21). Le remplissage d'un pore de faible diamètre empêche le remplissage d'un pore adjacent ayant un diamètre supérieur entraînant un piégeage d'air. Lors de la désorption, la vidange d'un pore de diamètre important ne commence qu'à partir d'une certaine valeur d'humidité relative assez faible pour permettre au pore de diamètre inférieur de se vider. C'est ce qu'on appelle effet «bouteille d'encre».

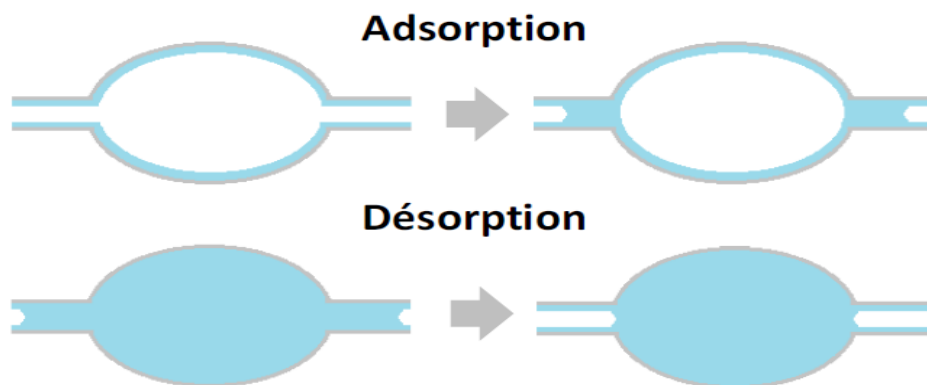


Figure I-21. Adsorption et désorption d'eau dans un pore «bouteille d'encre» [30].

La plupart des modèles de prédiction du comportement hygrothermique négligent l'effet d'hystérésis [31–34]. Hens *et al.* [35] ont développé 37 modèles de prédiction du comportement hygrothermique, seulement deux parmi eux tiennent compte de ce phénomène (MATCH et CHEoH).

Plusieurs recherches ont été menées dans ce sens afin de prendre en compte le phénomène d'hystérésis dans la modélisation du comportement hygrothermique des matériaux [36–42]. Ait Oumeziane et *al.* [43] ont montré que la prise en compte des courbes de sorption intermédiaires du béton de chanvre donne de meilleurs résultats que le fait de ne considérer que le cycle principal de sorption. Dans le même sens, Kwiatkowski et *al.* [44] ont montré que la prise en compte d'une seule des équations de l'isotherme de sorption conduit à des écarts significatifs entre les résultats numériques et expérimentaux. De plus, dans le cas des conditions climatiques réalistes, la négligence du phénomène d'hystérésis conduit à une surestimation des propriétés de tampon d'humidité des matériaux en contact avec l'air intérieur [44], ce qui peut conduire à une sous-estimation des risques de croissance des moisissures et/ou de condensation, d'où les problèmes de durabilité [45]. Cela a été également confirmé par Arfvidsson et *al.* [46] en concluant que les risques de durabilité peuvent être sous-estimés en cas d'omission d'hystérésis.

En effet, il existe trois types de modèle d'hystérésis dans la littérature [47,48], à savoir : des modèles physiques comme le modèle de Carmeliet (2005) [49] basé sur le modèle de Mualem (1974) [50], des modèles mathématiques tels que le modèle de Huang [36] basé sur le modèle de Kool et Parker (1987) [51] qui, à son tour basé sur le modèle de Scott (1983) [52] et enfin, des modèles empiriques tel que le modèle de Pederson (1990) [53]. Chacun de ces modèles est fondé sur des hypothèses. Le modèle de Huang [36] a été développé sur une hypothèse considérant que la teneur en eau résiduelle (correspondant à $HR=0$) est la même en adsorption et en désorption. Ce qui en est de même pour la teneur en eau de saturation [54]. Quant au modèle de Kool et Parker [51], il suppose que la forme des courbes principales et des courbes intermédiaires est analogue. Par ailleurs, le modèle physique II de Mualem est basé sur deux hypothèses principales à savoir : l'hypothèse de similarité et l'hypothèse des domaines indépendants [55,56] considérant qu'il n'y a pas d'interaction entre les pores d'un matériau poreux [54]. Ce modèle physique explique l'allure des courbes intermédiaires par des propriétés physiques telles que la distribution du rayon des pores [47,50]. En générale, les modèles physiques et mathématiques sont des modèles prédictifs. Leur utilisation requiert uniquement la connaissance des courbes d'adsorption et de désorption principales, tandis que le modèle empirique de Pederson nécessite de connaître en plus des courbes principales, au moins une courbe intermédiaire pour pouvoir déterminer les paramètres d'ajustement du modèle.

La qualité de la prédiction du comportement hygrothermique des matériaux est étroitement liée à la pertinence du modèle d'hystérésis choisi. Ait Oumeziane [47] a comparé la pertinence de quelques modèles d'hystérésis. Il a montré que contrairement aux modèles physiques et mathématiques, quelques soient les paramètres d'ajustement choisis pour les modèles empiriques, ces derniers ne respectent pas la condition de fermeture des courbes d'adsorption/désorption. Cet auteur a également rajouté que le modèle de Pederson conduit à une surestimation de la teneur en eau lors du bouclage. De plus, l'étude comparative menée par Zhang *et al.* [57] a conclu que les modèles empiriques permettent d'assurer de meilleures prédictions. Cependant, les erreurs de pompage (EP) ne peuvent pas être évitées. Dans une autre étude, Zhang *et al.* [58] ont mené une étude comparative entre un modèle physique (Mualem II) et empirique (Robien). Ils ont conclu que le modèle conceptuel donne de meilleurs résultats à cause des effets de pompes du modèle empirique liés à la non fermeture des boucles. Ces auteurs ont donc recommandé le modèle II de Mualem pour le cas de la modélisation des transferts hygrothermique dans les matériaux cimentaires exposés à des conditions climatiques dynamiques. L'une des voies permettant donc de proposer un modèle d'hystérésis consiste soit à proposer un modèle mathématique, à améliorer la qualité et la précision des modèles physiques ou à développer des modèles empiriques sans erreurs de pompage. Cette dernière a été récemment suivie par Romain *et al.* [59] qui ont proposé un modèle qui introduit le concept de la boîte rigide (gripped-box). L'avantage de ce modèle c'est qu'il nécessite que deux paramètres à ajuster et permet d'assurer la fermeture des boucles de balayage (sans effet de pompage) de chaque cycle d'humidification/séchage.

1.7. Caractérisation expérimentales des matériaux de construction

1.7.1. Caractérisation hydrique

a) Isothermes d'adsorption/désorption

La mesure des isothermes d'adsorption/désorption se fait généralement par deux méthodes différentes : méthodes gravimétriques et méthodes volumétriques.

- **Méthodes gravimétriques**

Pour ces méthodes, le principe étant de suivre régulièrement l'évolution de la masse apparente du matériau étudié en fonction du temps pour différents paliers d'humidité relative, et ce, jusqu'à ce que sa masse ne varie plus (équilibre matériau-air à (T, HR)).

Connaissant la masse humide et sèche de l'échantillon, on peut facilement déduire sa teneur en eau. Dans ce cas, le couple humidité relative-teneur en eau représente un point de l'isotherme d'adsorption/désorption.

✓ **Méthode basée sur des solutions salines saturées**

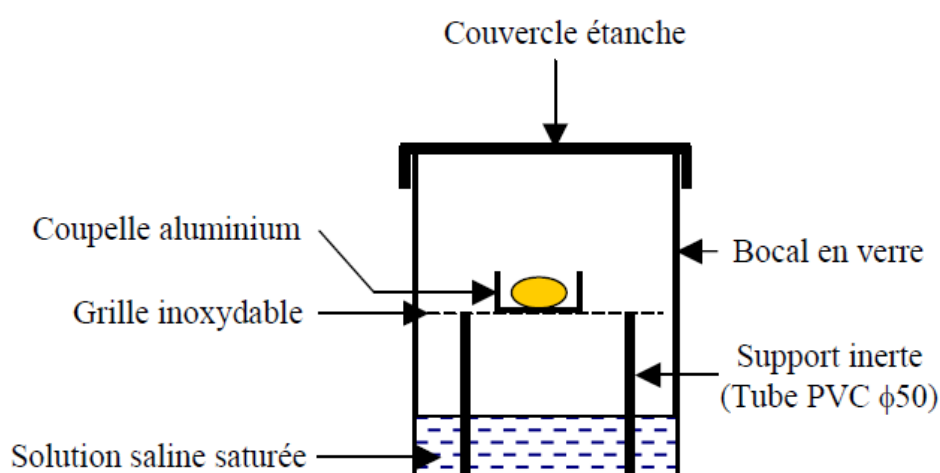
Cette méthode consiste à placer le matériau dans un récipient étanche à l'intérieur duquel se trouve une solution saline saturé en sel. Le rôle de cette solution saline est de maintenir une humidité relative constante (Figure I-22). L'isotherme d'adsorption/désorption s'obtient en assurant un suivi régulier de masse en fonction du temps pour chaque palier d'humidité relative.

L'inconvénient de cette méthode est le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre air/matériau qui peut varier selon la nature et les dimensions du matériau étudié d'un moi jusqu'à plus de deux ans [15]. Malgré les critiques sur la lenteur de cette méthode, elle reste la méthode la plus réaliste et la plus fiable vu le respect de la représentativité des échantillons [60].

Le Tableau I-3 représente les humidités relatives de l'air au-dessus des solutions salines saturées pour une température allant de 20°C à 25°C préconisées pour la mise en œuvre de cette méthode :

Tableau I-3 Solutions salines saturées contrôlant l'humidité relative de l'air.

Nom du sel	HR (%) à une température ambiante (20-25°C)
Gel de silice	3
Chlorure de lithium	11,3
Chlorure de magnésium	33
Nitrate de magnésium	53,5
Chlorure de sodium	75,5
Chlorure de baryum	90,4

**Figure I-22.** Schéma de montage explicatif de la méthode basée sur des solutions salines saturées [21].

✓ Méthode dynamique DVS (Dynamic Vapor Sorption)

Le DVS est un dispositif de mesure des isothermes de sorption de la vapeur d'eau (Figure I-23). Le principe est basé sur la détermination de la masse de l'échantillon pour différents paliers d'humidité relative, et ce, en plaçant un échantillon de quelques grammes dans une nacelle calibrée reliée à une balance de précision de l'ordre de 0,1 μg . L'humidité relative à l'intérieur de l'incubateur est générée en enrichissant de l'air sec avec de la vapeur d'eau jusqu'à atteindre l'humidité relative de consigne [15].



Figure I-23. Dispositif de mesure des isothermes de sorption (DVS) [19].

Le protocole adapté consiste à broyer des échantillons pour pouvoir prélever des spécimens de quelques grammes, puis à les conditionner dans une étuve à 45°C pour une durée minimum de 15 jours afin d'accélérer le processus de séchage. Pour chaque palier d'humidité relative, une acquisition automatique de la masse est effectuée jusqu'à atteindre l'équilibre qui est adopté par le critère $\frac{dm}{m_{sec}} \leq 5 \times 10^{-6} \%$, avec dm est l'écart de masse qui correspond à un écart de temps entre deux mesures successives [19,61].

Ce dispositif permet de réduire considérablement le temps de l'essai en le comparant à la méthode utilisant des solutions salines saturées. Cela est dû aux mesures qui se réalisent sur des échantillons de masses très faibles. Autrement dit, la quantité d'eau adsorbée est encore plus faible et par conséquent, le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre se réduit. De plus, l'air humide s'écoule autour de l'échantillon à une vitesse de 0,4 m/s (convection forcée) [15].

Abahri *et al.* [60] ont effectué une comparaison entre les différentes méthodes de mesure des isothermes de sorption. Ils ont remarqué que la méthode DVS ne permet pas de mesurer les teneurs en eau pour des plages supérieures à 90%, d'où la limite de cette méthode (voir Figure I-24).

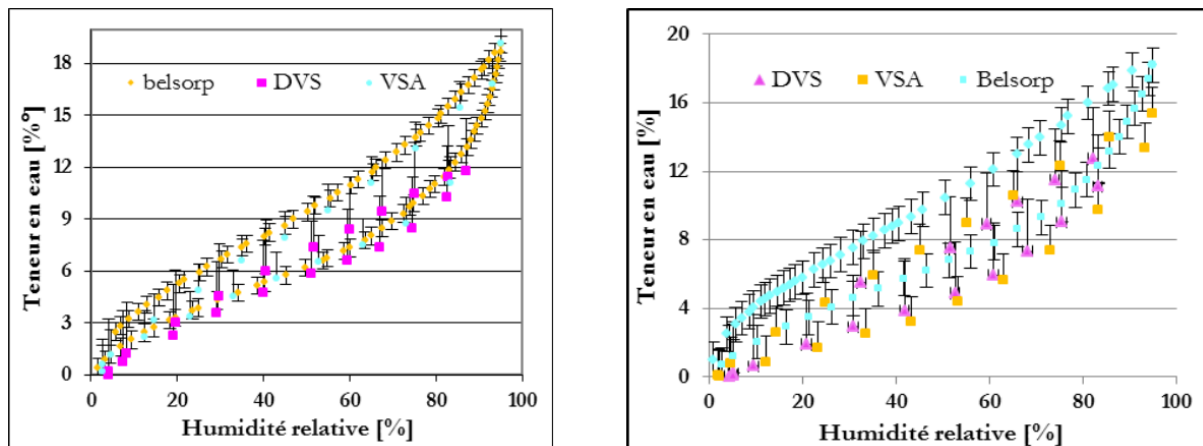


Figure I-24. Comparaison des isothermes sorption de l'isolant de fibre en bois (à gauche) et de l'OSB (à droite) à 20 °C obtenues par différentes méthodes [60].

✓ VSA (Vapor Sorption Analyser)

Le VSA est un dispositif de mesure des isothermes d'adsorption/désorption. Il a pratiquement le même principe de fonctionnement que le DVS, seulement avec le VSA, on peut prendre des échantillons de dimensions plus grandes (cylindre de 40 mm de diamètre et 6 mm d'épaisseur). Cependant, sa balance est moins sensible ($\pm 0,1$ mg).

• Méthodes volumétriques

Ces méthodes consistent à mesurer la variation de volume de la vapeur d'eau adsorbée ou libérée par le matériau. En plaçant un échantillon dans un volume contrôlé, une quantité de vapeur d'eau est injectée jusqu'à atteindre la pression voulue. Une fois l'équilibre est atteint, on détermine le volume de vapeur adsorbé par le matériau. Ces méthodes permettent de réduire considérablement le temps des essais, mais en travaillant sur des échantillons de faibles dimensions combinés avec un débit dynamique de la vapeur d'eau [19].

✓ BELSORP Aqua3

Le BELSORP Aqua3 est l'un des dispositifs de mesure automatique des isothermes d'adsorption/désorption reposant sur le principe des méthodes volumétriques (Figure I-25). Le principe de mesure consiste à déterminer une quantité de gaz adsorbée par l'échantillon moyennant l'utilisation du nombre de mole du gaz. Initialement, le volume est rempli d'un certain nombre de mole initial donné par la loi des gaz parfaits. Après la détente de ce gaz dans la cellule contenant l'échantillon, ce dernier se met à absorber une partie du gaz jusqu'à atteindre un état d'équilibre donné. Connaissant la basse pression dans le système, on détermine le nombre de mole restant dans la phase gazeuse [19].



Figure I-25. Photo d'un dispositif de mesure des isothermes de sorption par la méthode volumétrique : BELSORP Aqua3.

b) Mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau caractérise l'aptitude d'un matériau à transférer l'humidité sous un gradient de pression de vapeur une fois que l'état d'équilibre est atteint. Elle représente une caractéristique indispensable dans la caractérisation des matériaux de construction, ce qui a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs dans le domaine [26,62–64].

Cette propriété se mesure généralement par la méthode de la coupelle en utilisant un dispositif conçu pour cet effet nommé GraviTest (Figure I-26) selon la norme NF EN ISO 12572 [65]. L'avantage de ce dernier est l'automatisation de l'essai notamment pour le suivi de la masse.

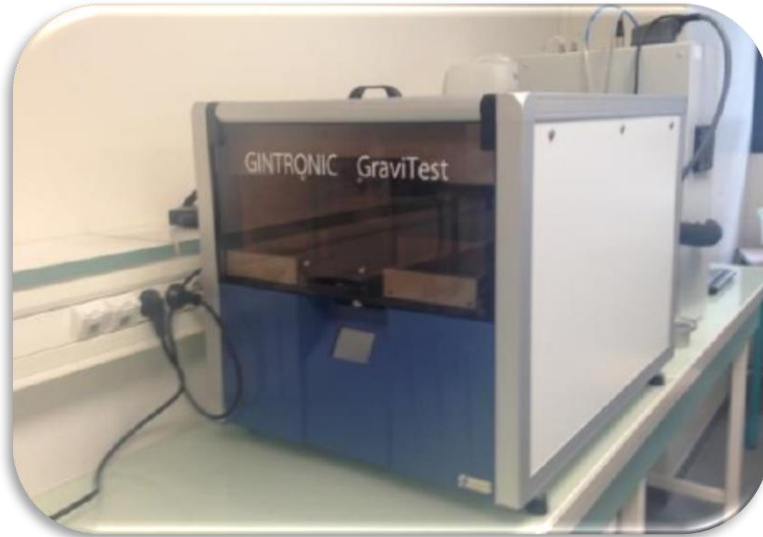


Figure I-26. Photo d'un dispositif de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau : GraviTest.

La méthode consiste à conditionner un échantillon de dimensions définies à un gradient de pression de vapeur d'eau. Ce gradient de pression de vapeur sera maintenu constant grâce à une solution saline saturée et une chambre climatique placées respectivement au-dessous et au-dessus de l'échantillon. La différence de pression engendre un flux de vapeur allant de la haute à la basse pression. L'évaluation de ce flux se fait par des pesées régulières de l'assemblage afin de déterminer le taux de transmission de la vapeur d'eau à l'équilibre.

Pour éviter d'éventuelles fuites de la vapeur d'eau entre la coupelle et le matériau, on doit bien sceller le couple matériau/coupelle en utilisant un produit de scellement.

Le taux de variation de masse entre deux pesées successives des échantillons est donné par la relation (I-28) :

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{I-28})$$

Avec,

Δm_{12} [kg/s] est le taux de variation de la masse par unité de temps ; m_1, m_2 en [kg] est la masse de l'assemblage d'essai respectivement aux temps t_1, t_2 [s].

La pente de la droite de l'évolution de la masse au cours du temps représente le débit de vapeur d'eau G [kg/s].

La densité de flux de vapeur est calculée comme suit :

$$j_v = \frac{G}{A} \quad (\text{I-29})$$

Avec A [m²] est la surface de l'échantillon exposée.

La perméabilité à la vapeur d'eau est définie par la loi de diffusion de Fick :

$$\delta_p = \frac{j_v \times e}{\Delta p_v} \quad (\text{I-30})$$

Avec, Δp_v [Pa] est la différence de pression de vapeur d'eau ; e [m] est l'épaisseur de l'échantillon.

En effet, la perméabilité à la vapeur d'eau mesurée doit être corrigée, car le flux de vapeur mesuré peut être affecté par la formation d'une couche d'air située dans la coupelle d'essai entre la base de l'échantillon et la solution saline saturée qui provoque une résistance au flux de vapeur (Figure I-27). Dans ce cas, la perméabilité corrigée devient comme suit :

$$\delta_p = \frac{e}{\frac{\Delta p_v}{j_v} - (Z_a + Z_{s,int} + Z_{s,sup})} \quad (\text{I-31})$$

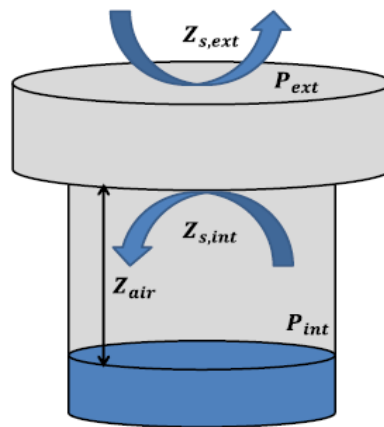


Figure I-27. Schéma montrant les résistances des couches d'air.

Avec,

$Z_a = d/\delta_a$ [s/m] est la résistance de la couche d'air séparant le matériau et la solution saline et d [m] est l'épaisseur de la couche d'air,

δ_a [kg/(m.s.Pa)] représente la perméabilité de la vapeur d'eau dans l'air,

$$\delta_a = \frac{2,306 \times 10^{-5} \times P_0}{R_v \times T \times P} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (\text{I-32})$$

$P_0 = 101325$ Pa est la pression atmosphérique normale,

P [Pa] est la pression atmosphérique au moment de l'essai,

$R_v = 462$ N.m/(kg.K) représente la constante des gaz de la vapeur d'eau,

$Z_{s,int/ext} = 1/h_{m,int/ext}$ [s/m] est la résistance à la diffusion surfacique de la vapeur d'eau,
 h_m [kg/(m².s.Pa)] est le coefficient de transfert massique par convection,

Abahri *et al.* [60] ont montré que la perméabilité à la vapeur d'eau est très sensible aux variations hydriques, notamment les matériaux hygroscopiques à forte porosité comme il est montré dans la Figure I-28.

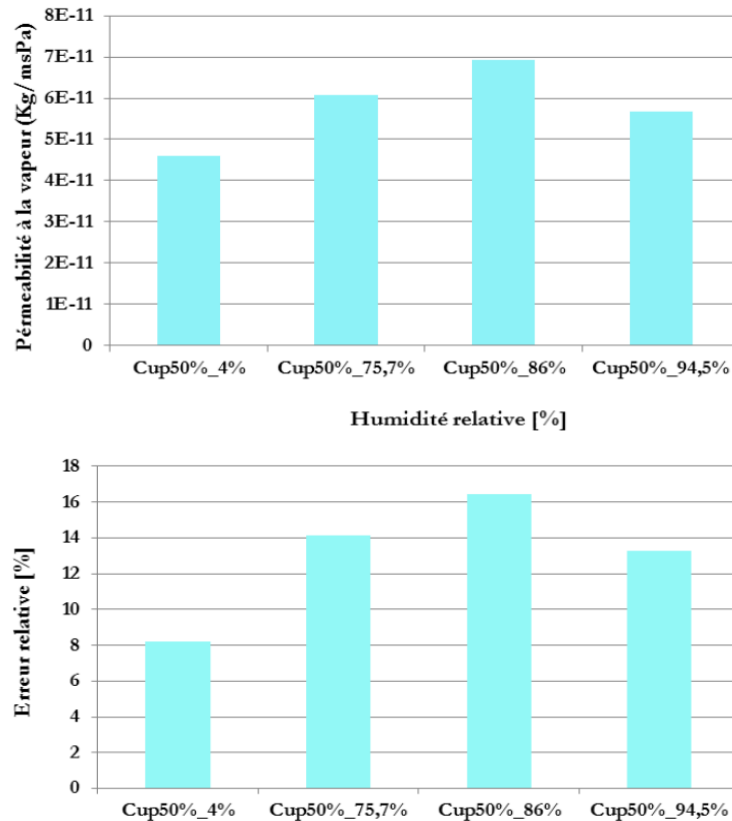


Figure I-28. Perméabilité à la vapeur d'eau (en haut) et l'erreur relative due à la non prise en compte des corrections de résistance à la vapeur (en bas) de l'isolant fibreux mesurées à différents états hydriques [60].

En effet, la perméabilité à la vapeur d'eau et l'isotherme de sorption sont les propriétés les plus importantes du matériau puisqu'elles ont une influence significative sur le comportement hygrothermique des composants du bâtiment [66,67]. De plus, les matériaux qui tamponnent la vapeur d'eau ont tendance à diminuer considérablement le risque de croissance des moisissures [68], comme ils peuvent également être utilisés pour modérer l'amplitude de l'humidité relative à l'intérieur vu qu'ils adsorbent et désorbent parfaitement la vapeur d'eau. Ils participent donc à la fois à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur et à l'économie d'énergie [69,70].

Plusieurs chercheurs dans ce domaine se sont intéressés à étudier l'influence de certains paramètres sur la perméabilité à la vapeur d'eau. Tran Le *et al.* [71] qui se sont référés à

Grelat *et al.* [72] ont observé que la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre est fortement influencée par le type de liant ; tandis que les résultats de Walker *et al.* [73] ont montré le contraire. C'est-à-dire le type de liant n'a pas d'influence statistiquement significative sur la perméabilité à la vapeur d'eau. Par ailleurs, les résultats d'Issaadi *et al.* [64] ont révélés que cette propriété diminue avec l'âge du matériau et que l'ajout du laitier de haut fourneau à la formulation de ce matériau permet de réduire la capacité de stockage d'humidité et la perméabilité à la vapeur d'eau. Dans le même sens, Bennai *et al.* [63] ont montré que la capacité de stockage d'humidité et la perméabilité à la vapeur d'eau diminuent avec le vieillissement (dû à l'âge) du béton de chanvre. Ils ont également rajouté que cette propriété est sensible aux variations hydriques. La perméabilité à la vapeur d'eau d'une coupelle sèche est inférieure à celle d'une coupelle humide (Figure I-29).

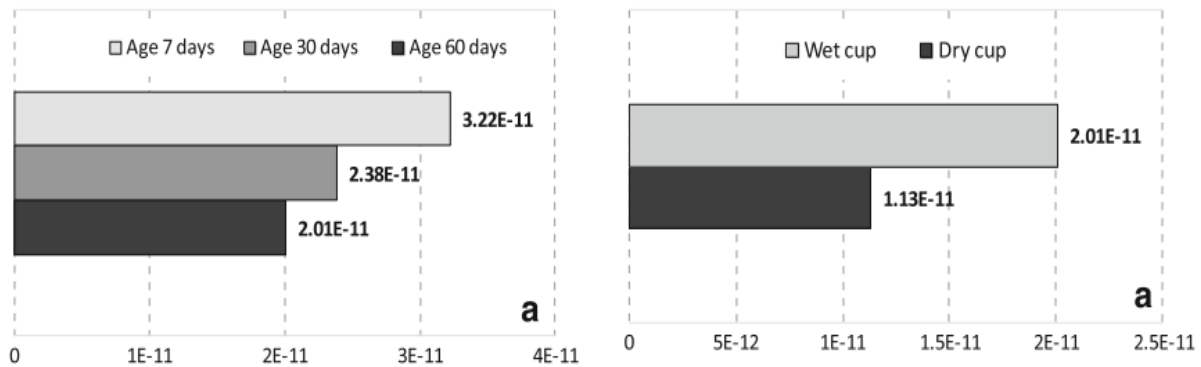


Figure I-29. Evolution de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre en fonction de l'âge (à gauche) et de l'état hydrique (à droite) [63]

c) Mesure de la capacité de stockage d'humidité

La capacité d'humidité d'un matériau représente sa capacité à adsorber et à libérer de l'humidité lorsque les conditions d'humidité de l'environnement sont modifiées [6]. Cette propriété est très importante puisqu'elle constitue l'un des paramètres d'entrée des modèles de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité.

Mathématiquement, la capacité de stockage d'humidité est définie par la pente de la courbe d'isotherme d'adsorption d'eau :

$$C_m = \frac{\partial w}{\partial HR} \quad (\text{I-33})$$

Avec, w [kg/kg] est la teneur en eau massique ;

Cette propriété est généralement influencée par la température et l'existence d'une hystérésis, c'est-à-dire différera, selon que le matériau est sec ou mouillé.

L'étude menée par Abahri *et al.* [19] sur l'isolant fibreux a montré que ce coefficient n'est pas affecté par la variation de la température pour les hygrométries inférieures à 80%. Il est par contre inversement proportionnel à l'âge du matériau comme il est montré dans la Figure I-30 [63,64].

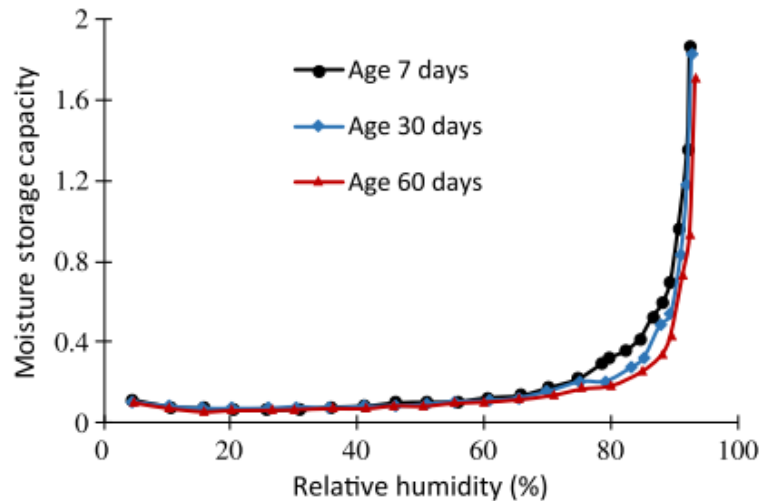


Figure I-30. Evolution de la capacité d'humidité en fonction de l'âge [63].

d) Courbe de rétention d'eau

Graphiquement, la courbe de rétention d'eau présente la relation entre la teneur en eau à l'équilibre du matériau et la succion mesurée dans un pore. Elle caractérise l'aptitude d'un matériau à stocker de l'eau liquide pour une température constante. Cette courbe présente un moyen efficace qui permet de bien appréhender le comportement hydrique d'un milieu poreux, notamment dans les zones super hygroscopiques. En effet, cette courbe de rétention d'eau complète l'isotherme de sorption qui atteint généralement sa limite technique vers les 95% d'humidité relative du fait des risques de condensation et de l'imprécision des capteurs dans cette zone (voir Figure I-31) [18,61].

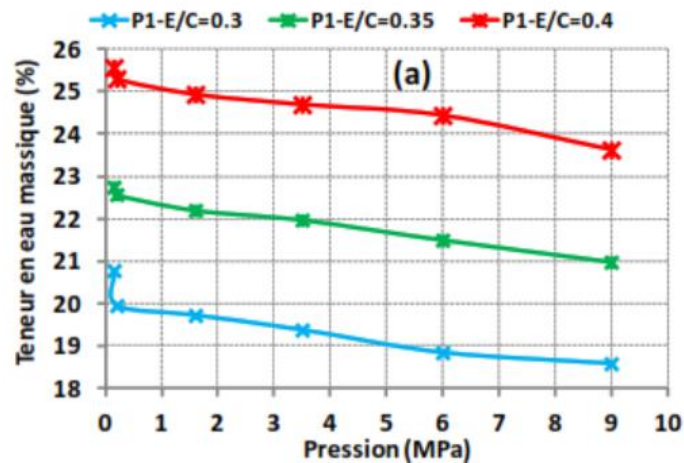


Figure I-31. Courbe de rétention d'eau d'une pâte de ciment en fonction du rapport E/C à l'âge de 28 jours [61].

Cette propriété est très affectée par la microstructure du matériau, à savoir : la taille, la forme et la distribution des pores ainsi que la surface spécifique des grains, comme elle est également affectée par la composition chimique de la solution interstitielle.

Expérimentalement, il existe plusieurs méthodes pour l'élaboration de la courbe de rétention d'eau, parmi lesquelles on trouve la méthode d'extraction par presse à membrane (Figure I-32). Le principe de cette dernière consiste à poser des échantillons saturés en eau sur une membrane microporeuse en cellulose qui est préalablement humidifiée afin d'assurer un contact parfait avec le matériau. Ensuite, l'ensemble sera placé dans une chambre sous pression alimentée en azote. L'augmentation de la pression à l'intérieur de la chambre provoque l'évacuation de l'eau présente dans les pores du spécimen à travers la membrane microporeuse pour s'écouler dans la burette extérieure. Une fois l'écoulement s'arrête, cela veut dire que l'état d'équilibre est atteint pour une pression donnée.



Figure I-32. Photo d'un extracteur à membrane [18].

Pour chaque palier de pression, on mesure la masse de chaque échantillon afin de déterminer sa teneur en eau, d'où la courbe de rétention d'eau (voir Tableau I-4).

Tableau I-4 Valeur de la succion et de l'humidité relative issues de la relation de Kelvin [61]

Succion (MPa)	Humidité relative (%)
0	100
0.15	99.89
0.2	99.85
0.4	99.71
0.9	99.34
1.6	98.84
3.5	97.49
6.0	95.74
9.0	93.67

Remarque : à chaque fois qu'on passe d'une pression à une autre, on doit changer l'échantillon et la membrane [61].

e) Pouvoir tampon à l'humidité (MBV : Moisture Buffer Value)

Le pouvoir tampon à l'humidité caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air avoisinant. Il indique la quantité d'eau adsorbée ou libérée par un matériau qui est soumis à une variation d'humidité relative extérieur.

Le projet Nordtest [74] présente une méthode expérimentale pour le calcul de la capacité de tampon hydrique des matériaux. Il propose de placer des échantillons rectangulaires à des cycles d'humidifications et de séchage bien définis en maintenant la température constante (température de référence). Pour ce faire, l'humidité relative doit se fixer à 75% pendant 8 heures s'ensuit de 16 heures à 33%.

Avant de procéder à l'exposition des matériaux aux différents cycles d'humidification et de séchage, un pré-conditionnement à une humidité relative de 50% et une température de 25°C est exigé. L'humidité relative et la température sont généralement contrôlées à l'aide d'une enceinte climatique (Figure I-33).



Figure I-33. Photo d'une chambre climatique [19].

Le pouvoir tampon à l'humidité MBV [$\text{kg.m}^{-2}.\%\text{HR}$] est donné par la formule empirique (I-34) :

$$MBV = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{A(HR_{\text{humidification}} - HR_{\text{séchage}})} \quad (\text{I-34})$$

Avec,

$m_{\max}, m_{\min} [\text{kg}]$	représente respectivement la masse d'eau maximum et minimum accumulée dans l'échantillon,
$A [\text{m}^2]$	est la surface de l'échantillon exposée,
$HR_{\text{humidification}}, HR_{\text{séchage}} [\%]$	est l'humidité relative appliquée respectivement lors du cycle de d'humidification et de séchage,

Les différentes classes des valeurs de la capacité tampon hydrique des matériaux sont présentées dans la Figure I-34:

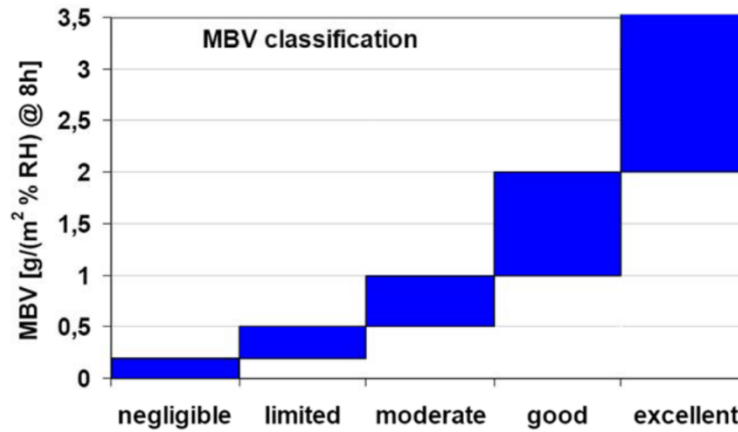


Figure I-34. Présentation graphique des classes pratiques des valeurs de tampon d'humidité (MBV) [74]

Le pouvoir de tampon à l'humidité des matériaux peut être exprimé par analogie à la diffusivité thermique, par la capacité d'accumulation d'humidité (b_m) :

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot C_m \cdot \rho_s}{P_{sat}}} \quad (I-35)$$

Avec,

b_m [$kg/(m^2 \cdot Pa \cdot s^{0,5})$] est la capacité d'accumulation d'humidité

δ_p [$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$] est la perméabilité à la vapeur d'eau,

ρ_s [kg/m^3] est la masse volumique sèche du matériau,

P_{sat} [Pa] est la pression de saturation,

$C_m = \frac{\partial w}{\partial HR}$ est la pente de l'isotherme de sorption,

En effet, le mieux est de proposer un matériau d'isolation avec une meilleure capacité de tampon à l'humidité afin de diminuer les risques liés à la croissance des moisissures. L'étude menée par Colinart *et al.* [75] a montré que l'utilisation d'un revêtement moins perméable sur le béton de chanvre réduit les transferts d'humidité et, par conséquent, sa capacité de tampon à l'humidité diminue. Ces résultats ont été également confirmés par d'autres auteurs [76,77]. D'après Mazhoud *et al.* [78], les enduits à base de chaux/chanvre sont des matériaux hygroscopiques et de bons régulateurs hydriques. Leurs résultats ont montré que la température dans la gamme de 11°C à 23°C influence légèrement leur capacité de tampon à l'humidité. De plus, ils ont remarqué que les matériaux formulés en utilisant de petite taille de

chènevotte présentent un meilleur comportement vis-à-vis de la régulation d'humidité comparé à ceux formulés avec la plus grande taille de chènevotte (Figure I-35).

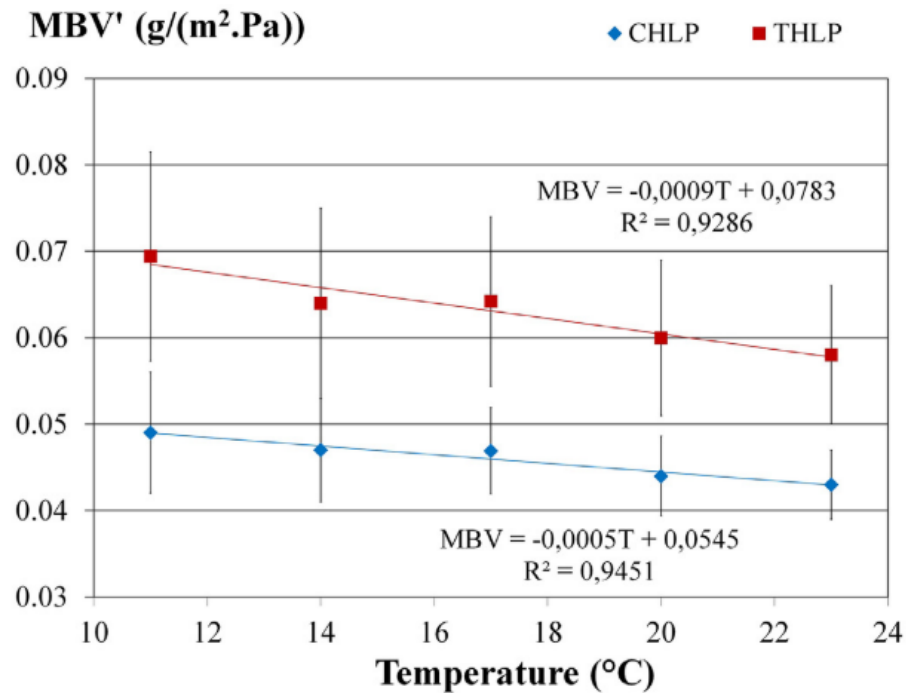


Figure I-35. Effet de la température et de la taille de la chènevotte sur le MBV du béton de chanvre (rouge : petite chènevotte, bleu : grande chènevotte) [78].

1.7.2. Caractérisation physique

Les méthodes d'investigation de la structure poreuse des matériaux à base de ciment sont nombreuses et variées. Les principales d'entre elles sont regroupées dans le Tableau I-5:

Tableau I-5 Principales techniques d'investigation de la structure poreuse des matériaux à base de ciment [79]

Catégorie	Technique
Analyse d'image	✓ Microscopie optique ✓ Microscopie Electronique à Balayage (MEB)
Diffraction	✓ Diffusion des rayons X aux petits angles (SAXS) ✓ Diffusion des neutrons aux petits angles (SANS)
Dynamique des fluides	✓ Perméamétrie (exemple : à air, méthode de BLAINE)
Hydrostatique	✓ Porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique ✓ Intrusion de mercure ✓ Pycnométrie aux gaz (Hélium) et aux liquides
Calorimétrie	✓ Thermoporométrie ✓ Microcalorimétrie d'adsorption
Adsorption/condensation	✓ Adsorption de gaz ou de vapeur (N₂, H₂O, He, Ar, Kr, etc)

a) Porosité par intrusion de mercure

Parmi les méthodes d'investigation précitées (Tableau I-5), on trouve la technique d'intrusion de mercure. C'est l'une des méthodes les plus simples et rapides de caractérisation de la texture des matériaux poreux. Elle permet de remonter à la porosité totale ainsi que la distribution des pores d'un milieu poreux inclus dans le domaine de mesure de l'appareil utilisée. Par exemple, le porosimètre Micromeritics de type Autopore (Figure I-36), couvre une gamme de pores allant de 0,003 μm à 360 μm où la pression pouvait atteindre 414 MPa.

Avant de commencer cet essai, un séchage préalable des échantillons est nécessaire afin de se débarrasser de l'eau liquide ou vapeur contenue dans les pores et de libérer la totalité du réseau poreux au mercure injecté [79]. Cette méthode consiste donc à sécher le matériau dans une étuve sous vide à 40°C jusqu'à la stabilisation de masse, puis à introduire du mercure progressivement dans le réseau poreux initialement vide à l'aide d'un porosimètre. En raison de la tension superficielle élevée du mercure, ce dernier se comporte comme un liquide non-mouillant. Pour cela, on l'injecte par paliers de pression croissantes afin d'assurer sa pénétration à l'intérieure de l'échantillon (intrusion) jusqu'à l'équilibre. Ensuite, l'échantillon sera vidangé par paliers de pressions décroissantes (extrusion).



Figure I-36. Photo d'un porosimètre au mercure [19].

Pour chaque palier de pression, on mesure le volume du mercure injecté. Cela permet de remonter à certains nombres d'informations comme la distribution de la taille des pores (Figure I-37). La distribution de la taille des pores est obtenue par le calcul du diamètre correspondant à chaque palier de pression, et ce, en utilisant la loi de Washburn qui reste valable sous l'hypothèse d'un tube cylindrique de diamètre D :

$$D = \frac{4\sigma}{P_c} \cos \alpha \quad (\text{I-36})$$

Où, P_c [Pa] est la pression nécessaire pour l'injection du mercure ; σ [N/m] est la tension superficielle du mercure et α représente l'angle de contact entre le mercure et la paroi solide interne du pore.

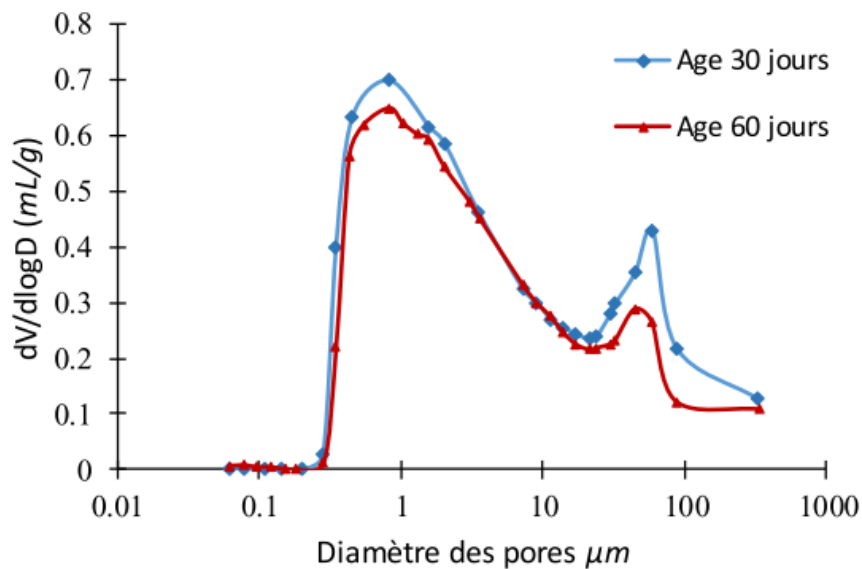


Figure I-37. Distribution de la taille des pores du béton de chanvre par intrusion au mercure à 30 et 60 jours d'âge [5].

En effet, la méthode de porosité au mercure est limitée. Elle présente des imperfections qui sont liées généralement au séchage préalable des échantillons, à la gamme de pores mesurée par le porosimètre, et à l'effet « bouteille d'encre » [13,80] qui tend à surestimer les petits pores au détriment des plus grands sans qu'il soit possible d'évaluer dans quelle proportion.

b) Porosité accessible à l'eau

La porosimétrie à l'eau est une méthode simple et rapide pour la caractérisation de la porosité globale d'un matériau. Elle est basée sur la technique de la pesée hydrostatique qui est fondée sur le principe de la poussée d'Archimède.

La procédure décrite ici, suit la norme AFPC-AFREM modifiée [61,80]. Elle consiste d'abord à saturer l'échantillon sous vide au moyen d'un banc de saturation (en utilisant une pompe à vide par exemple). Ensuite, l'échantillon sera pesé une première fois dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique pour avoir la masse de l'échantillon sous l'eau notée M_{eau} . L'échantillon sera ensuite extrait de l'eau pour effectuer une deuxième pesée à l'air, on aura donc la masse M_{air} . Pour finir, on passe au séchage de l'échantillon dans une étuve à une température fixée pendant une période connue. Durant cette étape, un suivi de masse est nécessaire jusqu'à l'équilibre selon le critère $(\Delta M_{24h}/m) \leq 0,1\%$ où ΔM_{24h} désigne la perte de masse sur un intervalle de 24 heures et m représente la masse de l'échantillon à la première borne de cet intervalle.

Après équilibre, on réalise une troisième pesée pour avoir la masse sèche de l'échantillon notée M_{sec} . La porosité accessible à l'eau est alors calculée suivant la formule (I-37) :

$$\varepsilon_p = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 (\%) \quad (I-37)$$

1.7.3. Caractérisation Thermique

a) Conductivité thermique

La conductivité thermique représente la facilité de propagation de la chaleur dans un matériau en fonction d'une différence de température donnée. C'est l'une des propriétés intrinsèques les plus influentes sur le comportement hygrothermique du bâtiment.

Aujourd'hui, il existe une multitude de méthode pour l'évaluation de la conductivité thermique expérimentalement. Ces méthodes peuvent être regroupées généralement selon deux critères de mesure :

- ✓ **Selon le régime thermique :** on distingue d'une part, des mesures en régime permanent où le milieu est soumis à un flux indépendant du temps (stationnaire). Dans ce cas, on peut citer la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode de la boîte chaude gardée, et d'autre part, des mesures en régime variable (transitoire) comme la méthode du fil chaud, méthode Hot Disk, méthode Flash et la méthode de sonde à choc. Ces deux dernières méthodes sont les plus utilisées [81].
- ✓ **Selon le type de mesure (relative ou absolue) :** dans ce cas, la mesure est dite relative lorsque la conductivité thermique d'un matériau est déterminée par rapport à une éprouvette de référence dont la conductivité thermique est connue, et est dite absolue dans le cas contraire.

Mazhoud *et al.* [78] ont étudié l'impact de la taille de la chènevotte sur les propriétés thermiques et hydriques des enduits à base de la chaux et du chanvre. Ils ont remarqué que la conductivité thermique de ces échantillons contenant la plus petite taille de chènevotte est légèrement supérieure à ceux ayant la plus grande taille (Figure I-38). De plus, ils ont montré que la température n'affecte pas la conductivité thermique à l'état sec, tandis qu'à l'état humide, cette propriété thermique décroît simultanément avec la teneur en eau lorsque la température augmente. Walker *et al.* [73] ont étudié l'effet du type de liant sur les propriétés du béton de chanvre. Leurs résultats ont montré que la conductivité thermique et la capacité calorifique de ces échantillons ne sont pas vraiment affectées par le type de liant. Toutefois, une tendance suggère que l'hydraulicité du liant provoque la diminution de la conductivité thermique et l'augmentation de la capacité calorifique, et la présence de retenues d'eau permet d'augmenter à la fois ces deux propriétés.

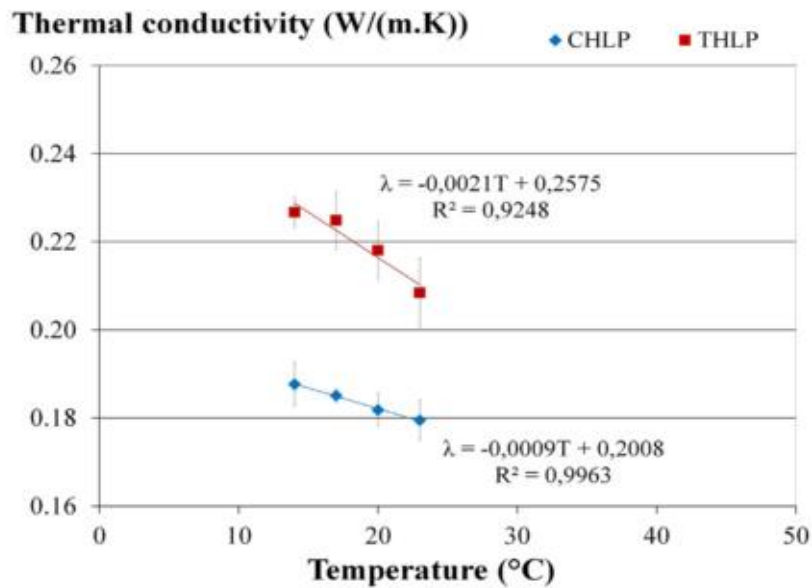


Figure I-38. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température à 50 % d'humidité relative de deux types de béton de chanvre [78].

En effet, le liant est le composant le plus thermiquement conducteur [82]. Donc, la teneur et la qualité de ce dernier peut gouverner la conductivité thermique finale du matériau en question.

b) Chaleur spécifique

La chaleur spécifique C_p [$J.K^{-1}.g^{-1}$], aussi appelée capacité thermique massique ou chaleur massique, définit la quantité d'énergie nécessaire en J pour élever d'un degré Celsius, un gramme de matière. Elle dépend de la structure moléculaire et de l'état de la substance considérée. Pour mieux comprendre cette notion, il faut comprendre pourquoi l'eau est vraiment difficile à chauffer, la réponse est parce que cette dernière possède une chaleur spécifique très élevée.

Les méthodes de mesure de la chaleur spécifique sont nombreuses et variées. Elles peuvent être regroupées en deux catégories : (i) des méthodes de mesure dynamiques qui se basent sur la variation de la température comme l'analyse calorimétrique différentielle à flux de chaleur et à compensation de puissance, (ii) et des méthodes de mesure statiques parmi lesquelles on trouve comme dispositif de mesure le microcalorimètre kalvet.

Mesure de la chaleur spécifique par DSC (Differential Scanning Calorimetry) : la calorimétrie différentielle à balayage est une technique qui permet de mesurer le flux de chaleur absorbé ou libéré par l'échantillon en fonction du temps pour une évolution de la température programmée dans une atmosphère contrôlée.

Une cellule DSC est équipée d'un four et d'un capteur intégré avec des positions définies pour les creusets échantillons et référence. Les capteurs sont branchés à des thermocouples permettant d'enregistrer avec précision la différence de température entre l'échantillon et la référence [61]. La valeur de la chaleur spécifique est calculée grâce à la différence de flux de chaleur mesuré entre le creuset contenant l'échantillon et celui de référence qui peut être vide ou contenant un produit inerte thermiquement.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'étude de cette propriété. En effet, Robert *et al.* [83] ont remarqué qu'un enduit à base de la chaux et d'adjuvants pouzzolaniques a une capacité calorifique supérieure à celle d'un enduit sans adjuvants. Cela s'explique par le fait que les produits d'hydratation augmentent cette propriété thermique. Cela est en accord avec les résultats de Walker *et al.* [73] qui ont remarqué que les hydrates contenues dans le béton de chanvre augmentent sa capacité calorifique et que les bétons à base de la pouzzolane les moins hydratés, présentent la plus faible capacité calorifique. Par ailleurs, Bennai *et al.* [63] ont montré que le vieillissement dû à l'âge augmente la conductivité thermique et la chaleur spécifique du béton de chanvre (Figure I-39). De plus, il a été également montré que cette propriété augmente avec l'augmentation de l'humidité relative [84].

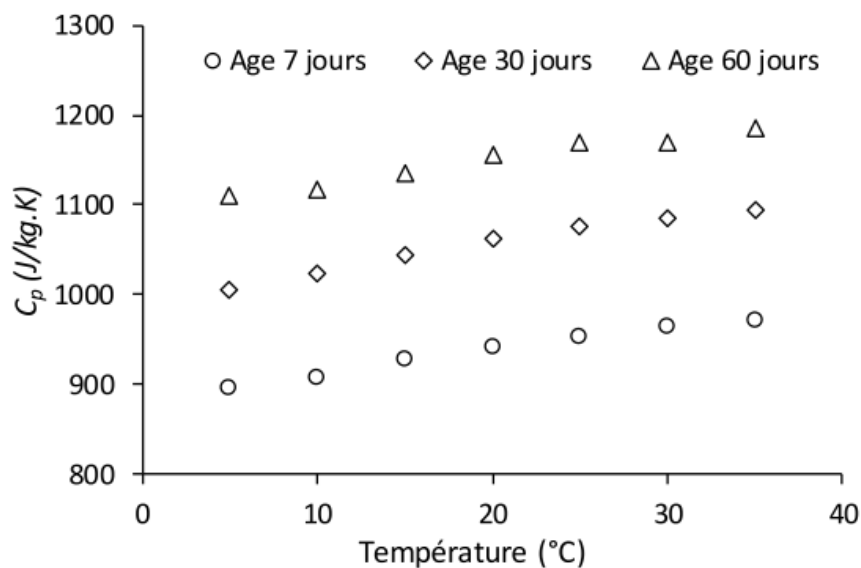


Figure I-39. Effet de la température sur la chaleur spécifique du béton de chanvre en fonction de la température à 7, 30 et 60 jours [5].

I.8. Modèles de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité

Il existe dans la littérature, de nombreux modèles qui permettent de prédire et de décrire correctement les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux

de construction. Ces derniers se différencient les uns des autres dans le choix des hypothèses et des moteurs de transfert. Dans la partie qui suit, nous allons présenter les principaux modèles de références pour la prédiction du comportement hygrothermique des matériaux poreux, à savoir : le modèle de **Luikov**, modèle de **Philip et De Vries** et le modèle de **Künzel**. Ces modèles sont basés sur les principes de conservation de masse et d'énergie.

1.8.1. Modèle de Luikov

Luikov *et al.* [85], est l'un des premiers chercheurs à avoir développé un modèle mathématique de transfert thermo-hydrique dans les matériaux poreux de construction. Dans ce modèle, l'humidité que ce soit en phase vapeur ou liquide est transportée sous l'influence des gradients de température, de teneur en eau massique et de pression totale. Il propose toutefois de séparer le flux liquide et le flux de vapeur puisque le premier est induit par un gradient de concentration, et le second par un gradient thermique.

$$\text{Flux de vapeur : } j_v = -D_v \cdot \gamma_s (\nabla u + K_v \nabla T + \lambda_{pv} \nabla P) \quad (\text{I-38})$$

$$\text{Flux de liquide : } j_l = -D_l \cdot \gamma_s (\nabla u + K_l \nabla T + \delta_l \nabla P) \quad (\text{I-39})$$

Avec,

D_v et D_l : Coefficients de diffusion de la vapeur d'eau et de l'eau liquide respectivement ;

γ_s : Poids volumique sec du matériau ;

K_v et K_l : Coefficient de gradient thermique respectivement pour le transfert de la vapeur d'eau et de l'eau liquide ;

λ_{pv} : Conductivité de transfert molaire de vapeur ;

δ_l : Perméabilité à l'eau ;

L'équation de conservation de masse s'écrit dans ce cas comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -D_m (\nabla^2 u + K \nabla^2 T + \delta_a \nabla^2 P) \quad (\text{I-40})$$

Avec,

D_m : Coefficient de diffusion d'humidité ;

K : Coefficient de gradient thermique ;

δ_a : Perméabilité apparente à l'air ;

En ce qui concerne l'équation de conservation de la chaleur, *Luikov* a négligé les transferts convectifs et radiatifs. L'apport en chaleur ne dépend que des deux autres modes :

$$C_q \cdot \gamma_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \nabla T) + L_{vl} \text{div}(j_v) \quad (\text{I-41})$$

En faisant un bilan de masse uniquement sur la phase vapeur et en ne considérant que la différentielle en pression, *Luikov* a proposé une équation supplémentaire afin de présenter la variation de la pression totale :

$$C_a \cdot \gamma_s \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\delta_v \nabla P) + I_v \quad (\text{I-42})$$

Avec,

C_a : Capacité d'humidité du corps capillaire poreux ;

δ_v : Perméabilité à la vapeur ;

I_v : Terme source de la vapeur d'eau ;

Vu que la teneur en eau massique a été choisie comme moteur de transfert de ce modèle, cela pose un problème de discontinuité dans le cas d'une paroi multicouches. En effet, cette propriété ne prend pas une seule valeur aux interfaces entre les différentes couches du matériau. Pour cela, *Luikov* a introduit par analogie au transfert de chaleur, la notion de potentiel de transfert de masse qui aurait la particularité d'être continu tout en long de l'épaisseur et de varier dans le même sens que la teneur en eau massique.

Le système d'équations aux dérivées partielles est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = D_q \cdot \nabla^2 T + \varepsilon_{vl} \cdot L_v \frac{C_m}{C_q} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{C_{pq} \cdot \delta_v}{C_q \cdot \gamma_s} \nabla P \cdot \nabla T \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = D_m (\nabla^2 \theta + K \nabla^2 T + \delta \nabla^2 P) \\ \frac{\partial P}{\partial t} = D_{vg} \nabla^2 P + \varepsilon_{vl} \cdot \frac{C_m}{C_a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \end{cases} \quad (\text{I-43})$$

Avec,

D_q : Diffusivité thermique du matériau ;

D_{vg} : Coefficient de diffusion du mélange vapeur d'eau-gaz ;

$D_m = D_v + D_l$: Coefficient de diffusion d'humidité ;

K : Coefficient de gradient thermique ;

δ : Rapport de transfert de masse ;

ε_{vl} : Facteur de conversion de phase ;

L_v : Chaleur latente d'évaporation ;

$C_m ; q ; pq$: Représente respectivement, la capacité d'humidité, la capacité thermique massique et la capacité thermique massique du mélange vapeur d'eau-gaz ;

1.8.2. Modèle de Philipe et De Vries (1957)

Pour le développement de ce modèle, Philipe et De Vries ont décrit le flux diffusif comme étant une fonction de la température et de la teneur en eau. Ce couplage est obtenu grâce à l'utilisation de la loi de Kelvin qui leur a permis d'exprimer la masse volumique de la phase vapeur en fonction de l'humidité relative. Ainsi, moyennant la loi de Laplace, ils ont pu exprimer le flux de la phase liquide en fonction des gradients de teneur en eau volumique et de la température en tenant compte de l'effet de la gravité [15].

$$\text{Flux de vapeur : } j_v = -\gamma_l(D_{\theta v}\nabla\theta + D_{Tv}\nabla T) \quad (\text{I-44})$$

$$\text{Flux de liquide : } j_l = -\gamma_l(D_{\theta l}\nabla\theta + D_{Tl}\nabla T - \delta_l) \quad (\text{I-45})$$

Avec,

$D_{\theta v}$ et $D_{\theta l}$: Coefficient de diffusion isotherme de la vapeur d'eau et de l'eau liquide ;

D_{Tv} et D_{Tl} : Coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur d'eau et de l'eau liquide ;

δ_l : Perméabilité à l'eau liquide ;

γ_l : Masse volumique de l'eau ;

θ : Teneur en eau volumique ;

Comme Luikov, Philipe et De Vries [14] ont décrit l'équation de l'énergie en considérant uniquement les transferts de chaleur par conduction par changement de phase. Enfin, Le système d'équations différentielles décrivant le mouvement d'humidité selon Philipe et De Vries est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(D_{\theta}\nabla\theta) + \nabla(D_T\nabla T) + \nabla K \\ \rho C_q \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda\nabla T) + L_v\nabla(D_{\theta v}\nabla\theta) \end{cases} \quad (\text{I-46})$$

Avec,

D_{θ} : Coefficient de diffusion d'humidité isotherme ;

D_T : Coefficient de diffusion d'humidité non isotherme ;

C_q : Chaleur spécifique du matériau ;

λ : Conductivité thermique ;

Comme on peut le remarquer, ce modèle utilise comme moteur de transfert la teneur en eau volumique, ce qui pose un problème de discontinuité lors de l'étude des parois multicouches. De plus, ce modèle contrairement à celui de Luikov ne prend pas en compte l'évolution de la pression totale. Ce modèle est utilisé dans la plus part des cas, pour la modélisation du séchage [19,61].

1.8.3. Modèle de Künzle (1995)

Ce modèle a été développé par H.M. Künzle en 1995. Il a considéré que le flux de la vapeur d'eau est gouverné par un gradient de pression de vapeur et le flux liquide par un gradient d'humidité relative (HR). Les moteurs de transferts utilisés dans ce modèle sont la température et l'humidité relative. Le système d'équations aux dérivées partielles traduisant ce modèle est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_l \frac{\partial HR}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_v \frac{\partial HR \cdot P_{vsat}}{\partial x} \right) \\ \rho C_q \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \frac{\partial HR \cdot P_{vsat}}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (I-47)$$

Avec,

D_l : Coefficient de diffusion liquide ;

L_v : Chaleur latente d'évaporation ;

$\partial w / \partial HR$: Pente de l'isotherme de sorption ;

δ_v : Perméabilité à la vapeur d'eau ;

P_{vsat} : Pression de vapeur saturante ;

ρC_q : Capacité thermique volumique ;

En effet, ce modèle appartient à Fraunhofer Institut Für Bauphysic (IBP). Ensuite, il a été intégré dans le logiciel WUFI (**W**ärme **U**nd **F**euchte **I**nstationär) qui représente l'un des outils commerciaux les plus utilisés dans la modélisation des transferts de chaleur et d'humidité. Ce logiciel permet de modéliser le comportement hygrothermique des éléments de construction multicouches exposés au climat naturel [44]. L'inconvénient majeur de ces logiciels, est la difficulté voire même l'impossibilité de modifier ou de manipuler les équations qui définissent le modèle implémenté. Ce modèle a été utilisé par plusieurs chercheurs [47,80,86], et en générale, les résultats ont été toujours satisfaisants.

1.8.4. Synthèse sur quelques modèles de prédiction du comportement hygrothermique

En plus des modèles de références précités, il existe d'autres modèles dans la littérature. Belarbi *et al.* [87] et Qin *et al.* [88] ont développé un modèle de prédiction du comportement hygrothermique non isotherme. Dans leurs travaux, ils ont proposé une méthode expérimentale qui permet de calculer le coefficient de gradient thermique. Ce coefficient a été ensuite introduit dans leurs modèles afin de prendre en compte l'apport du transfert

d'humidité dû au gradient thermique. Le choix des moteurs de transferts de chaleur et de masse s'est porté dans ce cas respectivement sur la température et la teneur en vapeur. le but étant de s'affranchir aux problèmes de discontinuité des transferts hygrothermique aux niveau des interfaces des parois multicouches. Dans le même sens, ces auteurs ont proposé une méthode analytique afin de calculer le processus couplé de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction [88–90]. L'avantage de cette méthode est la facilité d'utilisation et surtout la précision des résultats. Pareillement, Trabelsi *et al.* [15,91,92] ont proposé un autre modèle macroscopique basé sur les travaux de Luikov ayant la température et la teneur en vapeur comme moteurs de transfert. Les résultats de ce modèle ont montré un bon accord entre les résolutions numériques et analytiques. Dans les mêmes travaux, ils ont étudié la sensibilité de ce modèle vis-à-vis le coefficient de gradient thermique. Cette étude a montré la nécessité de tenir compte de la thermo diffusion vu que son impact sur le transfert global de masse est non négligeable.

La plupart des modèles de transfert hygrothermique négligent et sous-estiment l'effet de la pression totale et ne considèrent que deux moteurs de transferts [88,93–95]. Cela peut mener à une sous-estimation ou surestimation d'humidité et de température dans les enveloppes. Autrement dit, ce gradient de pression totale peut modifier considérablement la cinétique et les propriétés des transferts dans le matériau [96]. Pour ce fait, Abahri *et al.* [19,96] ont proposé un modèle de prédiction du comportement hygrothermique qui repose sur la théorie de Luikov. Les moteurs de transferts considérés sont la température, la teneur en eau ainsi que la pression totale. L'avantage de ce modèle réside dans le fait qu'il considère à la fois l'effet du phénomène de la thermo diffusion et celui de la pression totale de l'air s'exerçant sur les parois du bâtiment. Pour étudier la contribution des infiltrations massiques sur les transferts hydriques des matériaux poreux, ils ont mis en place une plateforme expérimentale en développant un banc d'essai dans l'intention de remonter au coefficient d'infiltration d'humidité. Ce dernier constitue l'un des paramètres d'entrées les plus important du modèle développé (Figure I-40).

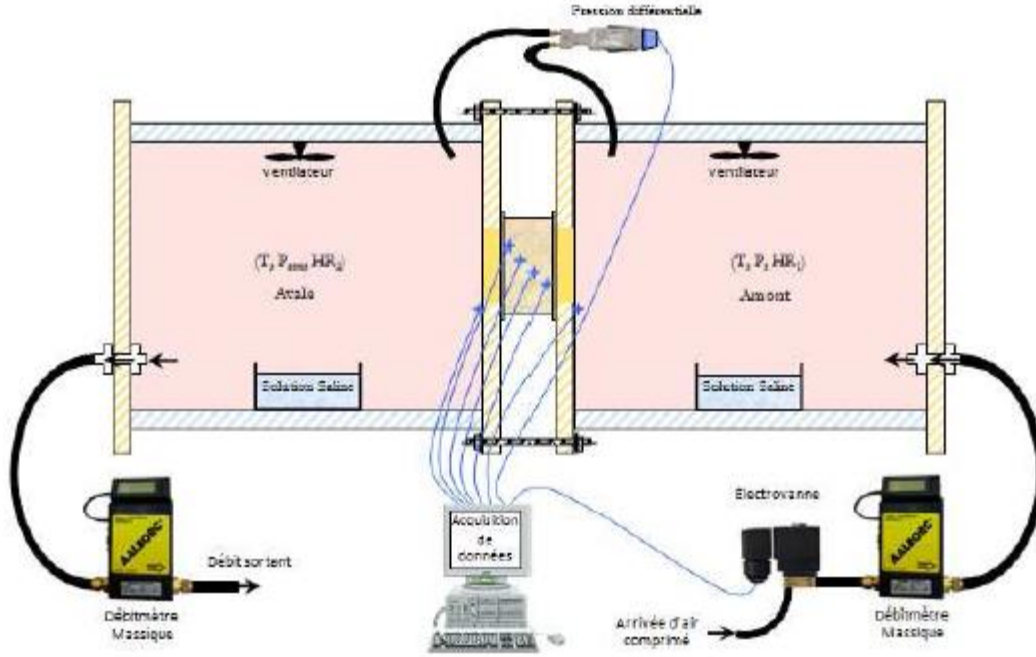


Figure I-40. Schéma du banc expérimental développé pour la mesure des infiltrations d'humidité pour des différences de pression totale extrêmement faible [97].

Afin de montrer l'incidence de ce gradient de pression, des simulations numériques ont été effectuées. Les résultats obtenus ont été ensuite comparés avec d'autres résultats qui négligent l'effet de la pression totale. D'une manière générale, les résultats ont été satisfaisants et suggèrent de tenir compte de cet effet. Ils ont montré que cette incidence de pression sur le taux d'infiltration est inversement proportionnelle au gradient de pression totale et que le coefficient d'infiltration massique dépend fortement de la nature du matériau. Comme ils ont ainsi observé que pour des matériaux à forte porosité, comme l'isolant fibreux, les infiltrations sont supérieures par rapport aux matériaux moins poreux. Le système d'équation aux dérivées partielles traduisant le modèle développé est donné comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial t} = \text{div}[D_m(\nabla w + \delta \nabla T + \alpha \nabla P)] \\ \rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla u + \alpha_t \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial w}{\partial t} \\ h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial w}{\partial t} \end{cases} \quad (\text{I-48})$$

Avec :

- | | |
|----------------------|---|
| $D_m [m^2/s]$ | est le coefficient de diffusion de l'humidité (vapeur d'eau et eau liquide) ; |
| $\delta [kg/m^3.s]$ | est le coefficient de thermo gradient ; |
| $\alpha [kg/m.s.Pa]$ | est le coefficient traduisant l'infiltration d'eau due à un gradient de pression totale ; |
| $a_t [W/m.K]$ | est la conductivité thermique modifiée ; |

$\delta_t [kg/m \cdot s]$	est le coefficient traduisant l'advection thermique due au gradient d'humidité ;
$\alpha_t [m^2/s]$	est le coefficient traduisant l'advection thermique due au gradient de pression totale ;
$\lambda_f [kg/m \cdot s \cdot Pa]$	est le coefficient d'infiltration d'air ;
$h_a [kg \cdot s^2/m^2 \cdot mol]$	est la capacité d'air humide ;
$\chi [-]$	est le rapport entre le flux de vapeur et le flux massique totale ;

Par ailleurs, un autre modèle de transfert couplés de chaleur, d'air et d'humidité basé ainsi sur la théorie de Luikov a été développé et validé par Ferroukhi *et al.* [18,98]. Pour ce modèle, le choix des moteurs de transferts s'est porté sur des paramètres d'état continus afin d'assurer la continuité aux niveaux des interfaces multicouches. Il s'agit notamment de la pression de vapeur d'eau, la température et de la pression totale. Les équations mathématiques traduisant ce modèle sont les suivantes :

$$\begin{cases} C_{mi}\rho_{si}\frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}[k_{mi}\nabla P_v + k_{Ti}\nabla T + k_{fi}\nabla P] \\ \rho_{si}C_{pi}\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_i^*\nabla T + \alpha_i\nabla P_v + \gamma_i\nabla P) + L_v\rho_{si}\sigma_i C_{mi}\frac{\partial P_v}{\partial t} \\ C_a\frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(K_f\nabla P) \end{cases} \quad (I-49)$$

De plus, ces chercheurs ont élargi leur travail en développant une plateforme de co-simulation HAM-BES (HAM : Heat, Air and Moisture transfer ; BES : Building Energie Simulation) afin de prédire finement le comportement hygrothermique de la paroi et de l'ambiance habitable des bâtiments [99–101]. Cela a permis, d'une part, de mettre en évidence l'incidence des transferts hygrothermiques sur la prédiction de la consommation énergétique et d'autre part, d'étudier l'efficacité de différentes méthodes de ventilation (extraction ou insufflation) sur le contrôle et la diminution des risques de désordres causés par l'humidité.

Généralement, les paramètres d'entrées de ces modèles sont considérés constants en adoptant une approche déterministe. Cependant, le caractère morphologique hétérogène des matériaux cimentaires comme le béton, rend leurs propriétés physiques, hydriques et thermiques variables. Pour cela, Issaadi *et al.* [61] ont proposé une démarche qui permet de prendre en compte la variabilité de ces propriétés en développant une approche probabiliste basée sur des résultats expérimentaux obtenus sur un voile en béton armé. Afin de montrer et de confirmer l'importance de la prise en compte de la variabilité de ces propriétés, ils ont quantifié la différence de comportement hygrothermique dû à cet effet. Pour cela, ils ont comparé les résultats de l'approche probabiliste considérant la variabilité spatiale des paramètres d'entrées à d'autres simulations qui considèrent ces dernières uniformes et constantes (Figure I-41).

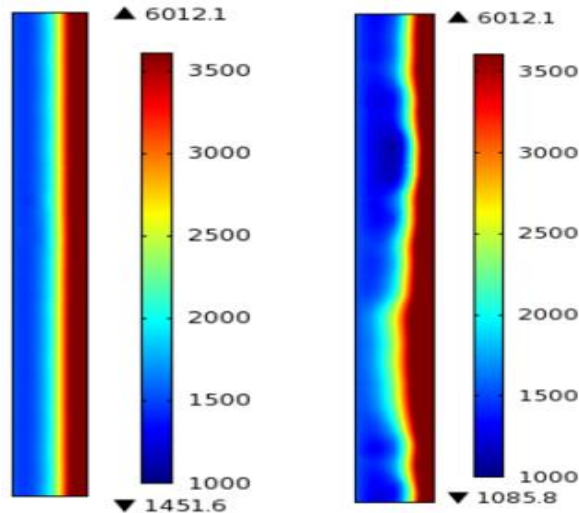


Figure I-41. Evolution de la pression de vapeur d'eau suivant une coupe selon l'épaisseur du voile avec l'approche déterministe (à gauche) et l'approche probabiliste (à droite).

Par ailleurs, la majorité des matériaux de construction présentent une géométrie homogène à l'échelle macroscopique, tandis qu'en réalité, c'est-à-dire à l'échelle microscopique, ils présentent une microstructure très hétérogène. Pour pallier ce problème, Bennai *et al.* [5,102,103] ont développé un modèle macroscopique pertinent des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à partir des équations écrites à l'échelle microscopique. Cela a été fait en faisant appel à la méthode d'homogénéisation périodique multi-échelle. Les moteurs de transferts considérés sont la température, la teneur en eau et le gradient de la pression totale. Les équations mathématiques définissant le modèle sont les suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_l}{\partial t} - \text{div}_x (D_\theta \text{grad}_x \theta_l + D_T \text{grad}_x T - D_P \text{grad}_x P) = 0 \\ C^{hom} \frac{\partial T^0}{\partial t} - \text{div}_x (a_T \text{grad}_x T + \delta_t \text{grad}_x \theta_l - \alpha_t \text{grad}_x P) - h_{lv} m_g = 0 \\ h_a \frac{\partial P}{\partial t} - \text{div}_x (K_{p,p} \text{grad}_x P + K_{\theta,p} \text{grad}_x \theta_l + K_{T,p} \text{grad}_x T) - m_g = 0 \end{cases} \quad (\text{I-50})$$

Avec,

m_g est le taux massique d'évaporation de la phase liquide à l'interface liquide-gaz.

Cette méthode est basée sur une analyse adimensionnelle des équations de conservation de masse et d'énergie à l'échelle microscopique. De plus, elle suppose que le milieu macroscopique est périodique grâce à la répétition d'une cellule élémentaire appelée cellule de base (Figure I-42).

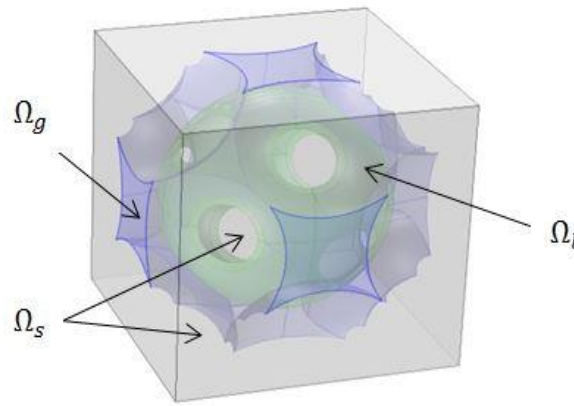


Figure I-42. Cellule élémentaire en 3D d'un milieu poreux [5].

Le choix de cette cellule élémentaire a permis de déduire numériquement les expressions des tenseurs de conductivité thermique et de diffusion d'humidité homogénéisés. La confrontation des résultats numériques aux résultats expérimentaux a montré une bonne concordance. De plus, l'étude de sensibilité du coefficient de diffusion homogénéisé vis-à-vis de la variation de la teneur en eau et de la porosité a montré que ce paramètre est sensible aux variations de l'état hydrique et de la morphologie du matériau, d'où la nécessité de tenir compte de la variation de ce paramètres d'entrée lors des simulations afin d'assurer une meilleure qualité de prédiction du comportement hygrothermique.

I.9. Choix des matériaux de rénovation

Le secteur du bâtiment est considéré comme étant le premier consommateur d'énergie et responsable d'une émission de CO₂ qui dépasse les 36 milliards de tonnes (Figure I-43).

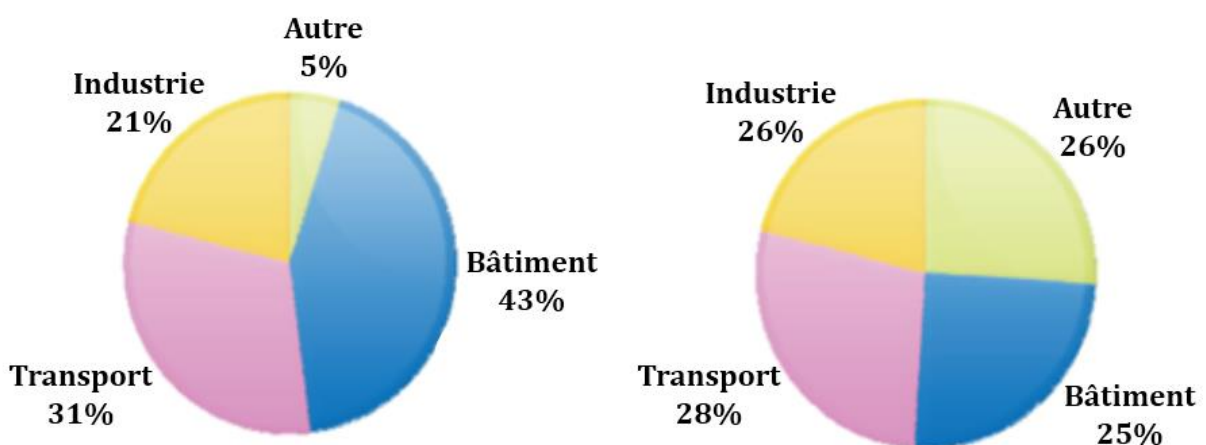


Figure I-43. Consommation d'énergie dans le monde (à gauche), et émission de GES (à droite) [104].

Ce secteur est donc responsable de part et d'autre, de la dégradation de l'environnement à cause de ces émissions de gaz à effet de serre qui sont nocifs pour la couche d'ozone [105]. En effet, ces différents enjeux conduisent à l'épuisement des ressources naturelles et à l'augmentation de la pollution. C'est pourquoi, un choix adéquat des matériaux de construction joue un rôle très important pour la réussite d'un projet à Haute Qualité Environnementale (HQE). A titre d'exemple, si on prend un matériau biosourcé comme le béton de chanvre, on trouve que ce dernier est négatif en carbone. Un mètre carré de ce matériau ayant 25 cm d'épaisseur nécessite entre 370 et 394 MJ d'énergie pour sa production. De plus, il permet de stocker jusqu'à 0.35 Kg de CO₂ par an. Contrairement à un mur équivalent en béton cellulaire qui requière jusqu'à 560 MJ d'énergie pour sa production afin de libérer au final jusqu'à 52,3 Kg de CO₂ [28,73,106–108]. Cela revient à dire que la quantité de CO₂ libérée pendant la production de ces matériaux biosourcés est compensée par celle absorbée durant leurs cycles de vie, ce qui donne une contribution positive pour l'environnement [107].

1.9.1. Matériaux Biosourcés

Les matériaux biosourcés sont des matériaux provenant de la biomasse animale ou végétale. Ils sont issus soit de l'agriculture, de la sylviculture ou du recyclage. Ces matériaux se caractérisent par une faible densité et une structure poreuse complexe. Une faible densité est associée à une faible résistance, mais également à une faible conductivité thermique. Ils permettent de limiter d'une part, l'impact environnemental en absorbant du CO₂, et d'autre part, l'impact énergétique grâce à leurs propriétés thermiques et hydriques intéressantes qui assurent un meilleur confort à l'intérieur de l'ambiance habitable. De plus, ils nécessitent peu d'énergie pour leur transformation et leur mise en œuvre, ce qui se traduit par une énergie grise négative.

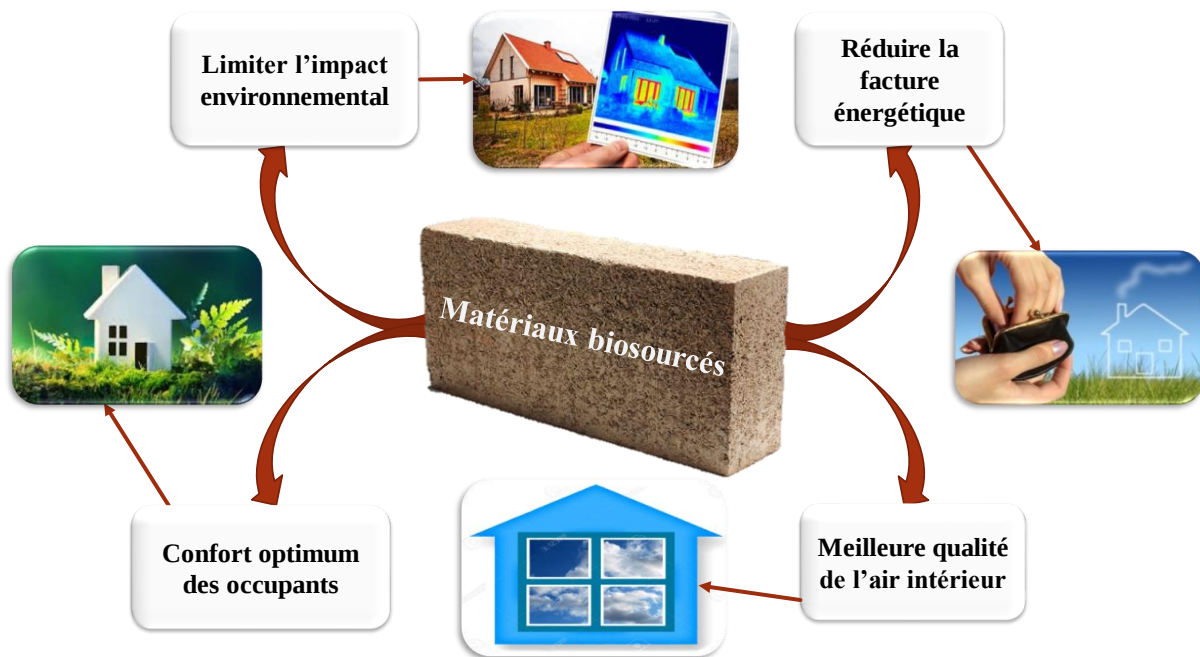


Figure I-44. Avantage des matériaux biosourcés.

1.9.2. Liant utilisé pour la formulation des bétons végétaux

Les granulats végétaux ont une capacité d'absorption très importante à court terme, et ce grâce à la forte porosité des particules végétales. Si on prend le cas de la chènevotte par exemple, elle peut absorber quatre fois sa masse sèche au bout de quelques minutes [109]. Ces particules absorbent donc une quantité importante d'eau lors du gâchage, ce qui provoque une mauvaise prise et une dessiccation. Par ailleurs, le liant a un effet direct sur la conductivité thermique final du matériau. Il est donc nécessaire de bien choisir un liant qui a tendance à préserver les propriétés thermiques des particules végétales et de permettre d'assurer une hydratation complète. Pour pallier à ce problème, des chercheurs ont proposé d'utiliser un liant riche en chaux aérienne qui est moins sensible à l'eau lors de la prise. Parmi ces liants, on trouve la Tradical PF70 produit par la société Lhoist. Il est largement utilisé dans la littérature [110]. Sa composition volumique et ses performances sont données respectivement dans le Tableau I-6 et le Tableau I-7 :

Tableau I-6 Composition volumique du liant Tradical PF70 [111].

Constituants	Pourcentage volumique
Chaux aérienne (98% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$)	75 %
Liant hydraulique	15 %
Liant pouzzolanique	10 %

Tableau I-7 Performance de la chaux Tradical PF70 [112].

Coefficient de conductivité thermique	$\leq 0,2$
Densité	$0,62 \pm 0,02$
Silice soluble (hydraulicité)	$\leq 10 \%$
Teneur en CO ₂	$\leq 8 \%$
Adjuvants (colloïdes végétaux et surfactants)	$\leq 0,5 \%$
Rétention d'eau	$\geq 75 \%$
Granulométrie	$< 90 \mu\text{m}$
Traction/Flexion	$\geq 1,4 \text{ N/mm}^2$
Compression	$\geq 4,3 \text{ N/mm}^2$

1.9.3. Exemples des matériaux à base de fibres végétales

Le recours à un matériau de construction doit se justifier par son origine, sa disponibilité, son coût et son impact écologique. Parmi les nombreux matériaux biosourcés qui existent, on cite le béton de chanvre et le béton de lin.

a) Béton de lin

Le béton de lin est un matériau biosourcé qui présente de bonnes propriétés hygrothermiques. L'utilisation de ce dernier est moins importante comparé au béton de chanvre.

➤ Provenance de la plante végétale

La plante de lin atteint en moyenne un mètre de long pour un diamètre de tige de 0,5 à 1 centimètre. Elle est cultivée massivement dans plusieurs pays du monde, dont la France est le premier producteur mondial [113] (Figure I-45).

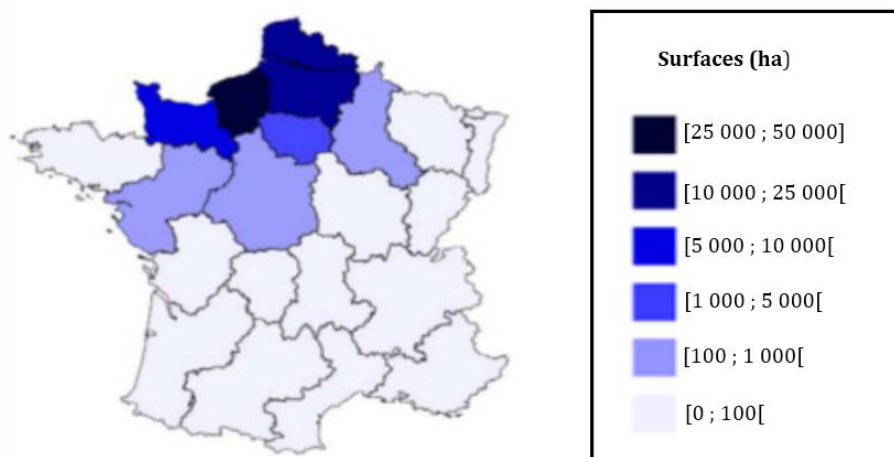
**Figure I-45.** Surfaces des cultures de lin en France [113].

Tableau I-8 Formulation du béton de lin selon les travaux de [117].

Ordre d'insertion des composants	
1. Eau	22 %
2. Chaux	10 %
3. Granulats végétaux	68 %

Comme nous l'avons mentionné en haut, il y a peu d'études qui ont été réalisées sur ce matériau. Khazma *et al.* [118] ont étudié l'effet du traitement des particules végétales de lin sur les propriétés du béton de lin. Pour cela, ils ont utilisé un mélange de pectine/polyéthylénimine pour enrober les tiges de lin dans un béton à matrice cimentaire. Ils ont observé que ce traitement a permis la diminution du temps d'absorption de l'eau et du temps de prise avec une augmentation de l'enthalpie d'hydratation de ciment. De plus, ils ont enregistré une augmentation de la résistance mécanique et une réduction significative des variations dimensionnelles. Cependant, ils ont noté une légère augmentation de la conductivité thermique et de la masse volumique apparente. Dans une autre étude, Rahim *et al.* [117] ont étudié les propriétés hydriques du béton de lin. Dans cette étude, ils ont pris le béton de chanvre comme matériau de référence afin de pouvoir comparer les résultats obtenus. Ils ont montré que les deux matériaux présentent des performances hygrométriques élevées avec une excellente capacité de tampon d'humidité selon la classification proposée par le projet Nordtest (Figure I-47).

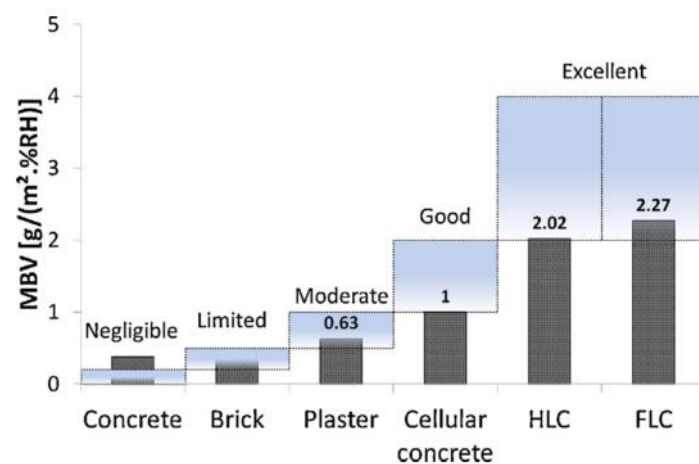


Figure I-47. MBV du béton de lin (FLC) et du béton de chanvre (HLC) comparé à d'autres matériaux testés dans le projet Nordtest [117].

b) Béton de chanvre

Le béton de chanvre est l'un des matériaux biosourcés les plus utilisés dans la construction. Il est développé en France depuis le début des années 1990 [73]. En effet, il existe trois types de ce matériau qui diffèrent selon la formulation et la technique de mise en œuvre. Le premier est le béton de chanvre banché qui consiste à déverser et à compacter manuellement le béton entre deux banches (Figure I-48).



Figure I-48. Béton de chanvre banché¹

Le deuxième type est le béton de chanvre projeté (Figure I-49). Dans ce cas, la mise en œuvre est réalisée par projection à l'aide d'une machine adaptée.



Figure I-49. Béton de chanvre projeté²

¹<http://www.terrevivante.org/600-construire-en-chanvre>

²<http://www.gremy-construction.fr/construction-logements-locaux-activites-sens-89/beton-de-chanvres>

Enfin, le troisième type est le béton de chanvre préfabriqué (Figure I-50). Comme son nom l'indique, cette technique consiste à construire des blocs en béton de chanvre préfabriqués. L'avantage de cette dernière est la rapidité de mise en œuvre.



Figure I-50. Béton de chanvre préfabriqué³

➤ **Règles professionnelles d'exécution des ouvrages en chanvre**

Afin de répondre à la forte demande de la construction en chanvre, l'inscription de ce dernier dans un cadre normatif était sans doute une nécessité. A l'issue d'un processus initié en 2004, les règles professionnelles d'exécution des ouvrages en chanvre (version 2) ont été définitivement acceptées et validées en janvier 2012. Aujourd'hui, elles constituent le seul texte de référence sur la construction en béton de chanvre [119].

➤ **Provenance de la plante végétale**

Le chanvre (*Canabis Sativa*) est une plante annuelle cultivée en grandes quantités. La récolte arrive souvent jusqu'à 10 t/ha de paille. L'avantage de cette dernière c'est qu'elle présente un cycle culturel court (Mai-septembre) et peu exigeant. Autrement dit, elle s'adapte facilement à des sols et des climats variés [120]. En effet, la France occupe la place du premier producteur de chanvre en Europe. Ils produisent près de 65000 tonnes de pailles de chanvre pour une surface cultivée de 10000 hectares (Figure I-51).

³<https://www.build-green.fr/chanvre-un-eco-materiau-aux-multiples-usages>

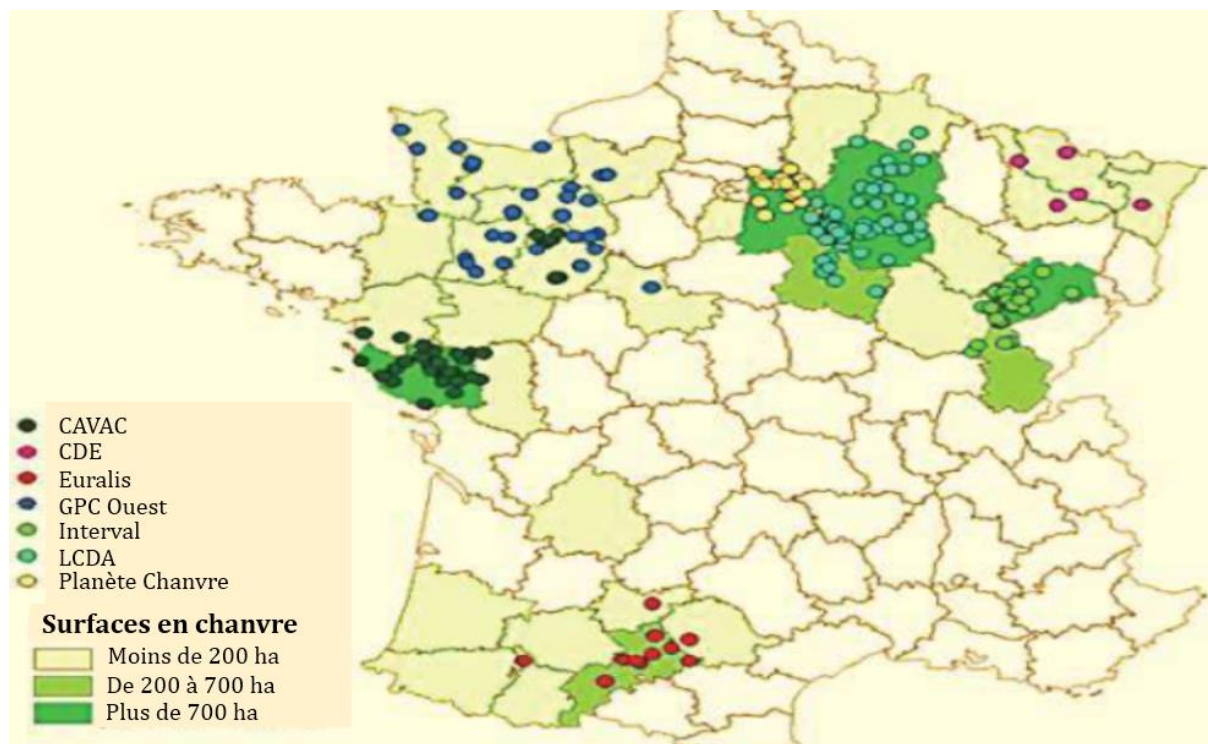


Figure I-51. Zones de production de chanvre en France⁴.

Pour une quantité de paille donnée, on distingue [120] :

- 30% de fibre corticale : papeterie, textiles (cordes, vêtements), etc.
- 60% de chènevotte : litière animale, matériaux de construction.
- 10% de poussière : amendement de terres agricoles, alimentation bétail, etc.

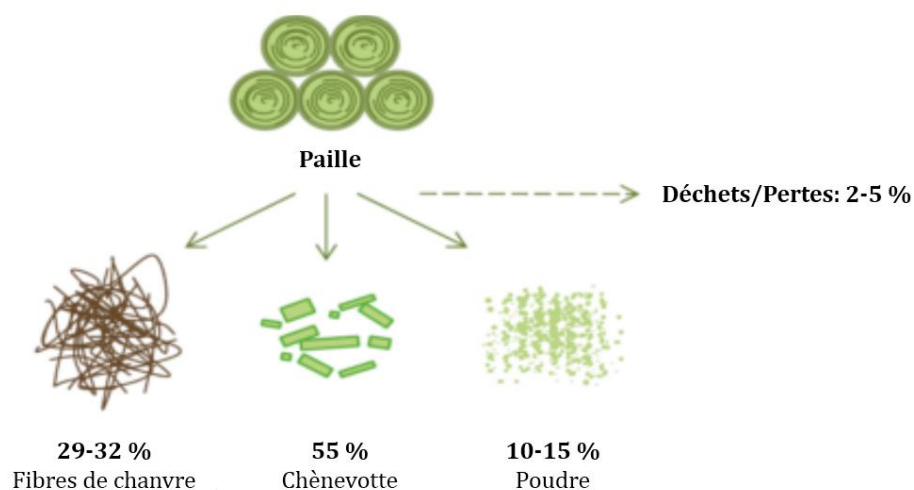


Figure I-52. Rendement obtenu après la première transformation du chanvre [113].

⁴<http://www.cetiom.fr> (2013)

La chènevotte qu'on utilise pour la formulation du béton de chanvre provient essentiellement de la partie bois (Xylème). Quant aux fibres de chanvre, elles sont utilisées généralement pour la fabrication de la laine isolante. Ces fibres proviennent de la partie cortex comme il est expliqué dans la Figure I-53:



Figure I-53. Images montrant la composition de la tige de chanvre [121–123].

➤ Propriétés de la chènevotte

- La chènevotte est constituée de 50 à 60 % de cellulose [54] ;
- Elle présente une structure très poreuse (60 à 80% de sa masse totale) : l'avantage de cette porosité en termes des propriétés hygrothermiques c'est qu'elle est répartie dans les deux sens de la chènevotte, c'est-à-dire dans le sens longitudinale et transversale (Figure I-54) ;
- Elle a une faible masse volumique en vrac : environ 110 kg/m^3 [122] ;
- Conductivité thermique très faible 0.048 W/(m.K) [124,125] ;
- Capacité d'absorption d'eau d'environ 450 % en 48 heures [109] ;
- Une forte perméabilité à la vapeur d'eau (un facteur de résistance à la vapeur d'eau d'environ 2,2) [126] ;

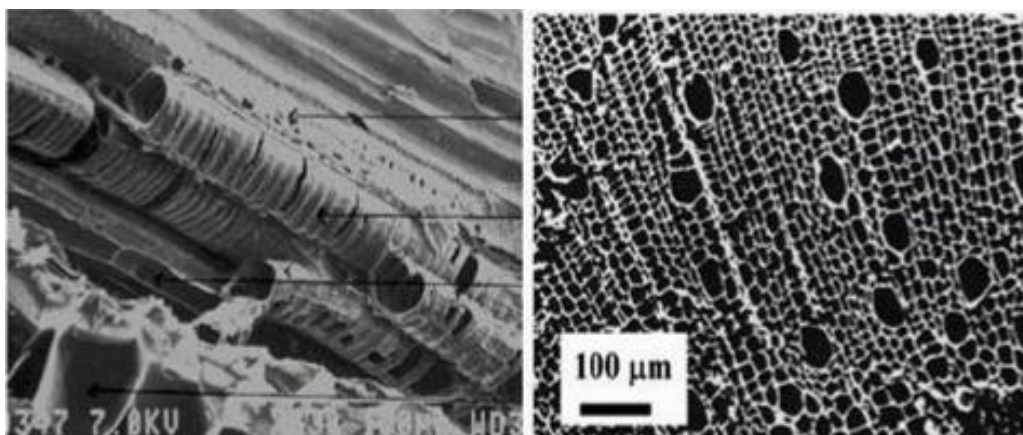


Figure I-54. Image au microscope électronique à balayage d'une particule de chanvre [127].

➤ Formulation du béton de chanvre

La formulation du béton de chanvre sous ses différentes applications (Mur, Dalle, Toit et Enduit) est une étape très importante, car les propriétés fonctionnelles du matériau confectionné vont dépendre de cette formulation. Pour cela, il est important de se référer aux règles professionnelles d'exécution des ouvrages en béton de chanvre.

Le Tableau I-9 et le Tableau I-10 présentent quelques formulations qui diffèrent l'une de l'autre selon l'application du matériau à confectionner⁵.

Tableau I-9 Description des formulations du béton de chanvre (Applications banchage & Dallage).

	Ordre d'insertion des composants	
Application Mur (Banchage)	1. Eau	35 à 45 L
	2. Chaux spécifique	25 kg
	2. Chaux hydraulique	17.5 kg
	Et chaux aérienne	17.5 kg
	3. Chanvre (Chènevotte C020)	100 L
	Ordre d'insertion des composants	
Application Dallage	1. Eau	35 à 45 L
	2. Chaux spécifique	25 kg
	3. Chanvre pour gros œuvre (C020)	100 L

Tableau I-10 Description des formulations du béton de chanvre (Application Enduit).

Application Enduit	Ordre d'insertion des composants			
		Préconisation 01 : C015	Préconisation 02 : C015	Préconisation 03 : C005
	1. Eau	30 à 55 L	35 à 50 L	40 à 60 L
	2. Chaux aérienne	25 kg	X	40 kg
	3. Chaux hydraulique	8 kg	X	X
	4. Chaux formulée	X	25 kg	X
	5. Chanvre	100 L	80 L	150L

1.9.4. Vieillessement du béton de chanvre

Aujourd'hui, malgré les propriétés intéressantes de ces matériaux biosourcés (comme le béton de chanvre), leur utilisation reste limitée en raison du manque de base de donnée des propriétés

⁵<http://www.technichanvre.com/techniques/isolation-fiches-techniques/>

vieillies et du manque de garantie en terme de leur durabilité [128]. Le vieillissement peut causer des modifications sur les propriétés finales du matériau suite à l'évolution de sa microstructure dans le temps. Peu d'études sont menées dans ce sens, et la plus part d'entre elles ne décrivent que la réaction du béton de chanvre vis-à-vis des tests de vieillissement accélérés [129]. Marceau *et al.* [128] ont étudié l'effet des cycles d'humidification/séchage sur les propriétés physiques du béton de chanvre et la croissance des moisissures à haute hygrométrie. Ils ont remarqué que ce type de vieillissement influe la microstructure du matériau et modifie sa porosité et sa densité. Cependant, ils ont montré que l'évolution de la microstructure ne suffit pas pour modifier leurs performances thermiques et acoustiques. Dans le même sens, Walker *et al.* [130] ont étudié l'influence du type de liant sur la durabilité du béton de chanvre. Pour cela, ils ont analysé la résistance de ce matériau face aux cycles de gel/dégel, à l'exposition au sel et à la biodégradation. Ils ont remarqué dans un premier temps, que l'hydraulicité du liant améliore le développement précoce de la résistance à la compression. Cependant, au bout d'une année, tous les bétons formulés ont atteint la même résistance à la compression quel que soit le type de liant. Ils ont également observé que les formulations ayant la plus grande hydraulicité présentent une résistance importante au gel/dégel malgré la présence des petits pores (entre 0.1 and 1 μm). Le test d'exposition au sel a montré la précipitation des couches de sel dans le béton, mais cela n'a pas eu d'effet néfaste sur la résistance à la compression du béton à un an. De plus, les analyses MEB ont révélé que le sel s'est cristallisé principalement en couches et qu'il ne s'est pas pénétré dans les pores (Figure I-55).

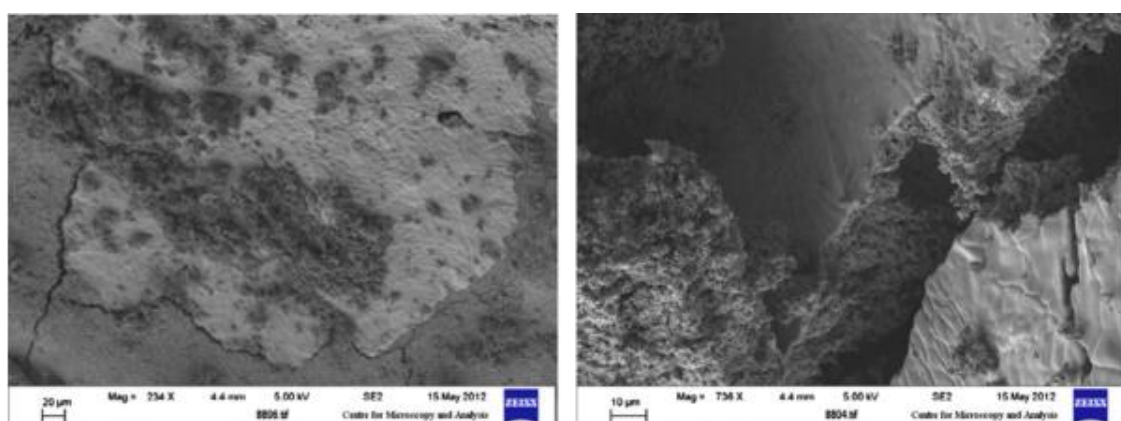


Figure I-55. Image de gauche : couche de sel typique sur la surface du liant. Image de droite : vue latérale d'une fissure de couche de sel montrant que le sel ne s'est pas pénétré dans le liant [130].

Par ailleurs, Walker *et al.* [73] ont étudié les transferts de masse et les propriétés thermiques en comparant des bétons de chanvre fabriqués avec de la chaux hydratée et des pouzzolanes à

ceux incluant la chaux hydratée et le ciment. Vu la forte capacité d'absorption de la chènevotte, cette dernière peut tenir une grande quantité d'eau du mélange requise pour l'hydratation, ce qui affecte les propriétés et la durabilité du béton de chanvre. Pour cela, ils ont utilisé pour certains des bétons étudiés, un dispositif de retenue d'eau afin de compenser cet effet néfaste. Ils ont remarqué que le type de liant influe sur l'absorption capillaire et que l'augmentation de l'hydraulicité du liant et l'ajout d'un dispositif de retenue d'eau réduisent l'absorption capillaire (Figure I-56). De plus, ils ont conclu que la conductivité thermique et la capacité calorifique de ces matériaux ne sont pas vraiment affectées par le type du liant. Toutefois, une tendance suggère que l'hydraulicité du liant provoque la diminution de la conductivité thermique et l'augmentation de la capacité calorifique, et que la présence de retenus d'eau permet d'augmenter à la fois ces deux propriétés.

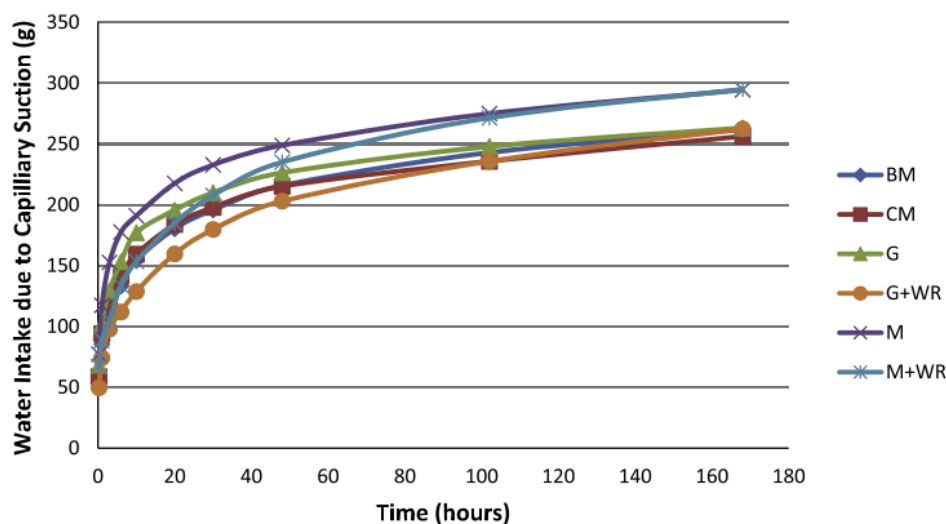


Figure I-56. Absorption d'eau par capillarité dans le temps en fonction de plusieurs types de liant [73].

Glass *et al.* [107] ont étudié les performances mécaniques et la durabilité du béton de chanvre en analysant l'influence du type de liant et les paramètres de la composition du mélange sur la carbonatation, l'absorption capillaire, le rétrécissement dû au séchage ainsi que l'altération de ce matériau suite aux conditions climatiques. Ils ont montré que les cycles d'immersion/séchage influent négativement sur la résistance à la compression. Ils ont enregistré une diminution de la résistance allant de 50 à 70%. Toutefois, l'effet du retrait dû au séchage était minime vis-à-vis des propriétés physiques. Ils ont également montré que la composition du mélange influe sur l'absorption capillaire plus que le type de liant (Figure I-57).

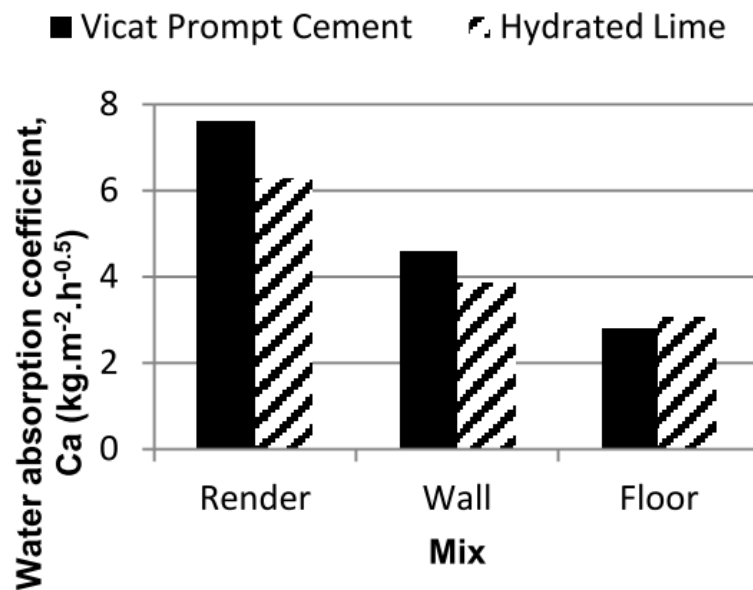


Figure I-57. Comparaison des coefficients d'absorption capillaires à 28 jours, de trois formulations avec deux liants différents [107].

Dans une autre étude menée par Arizzi *et al.* [129], ils ont reproduit au laboratoire les conditions environnementales de trois climats (climat méditerranéen, climat tropical et climat semi-aride) (Figure I-58).

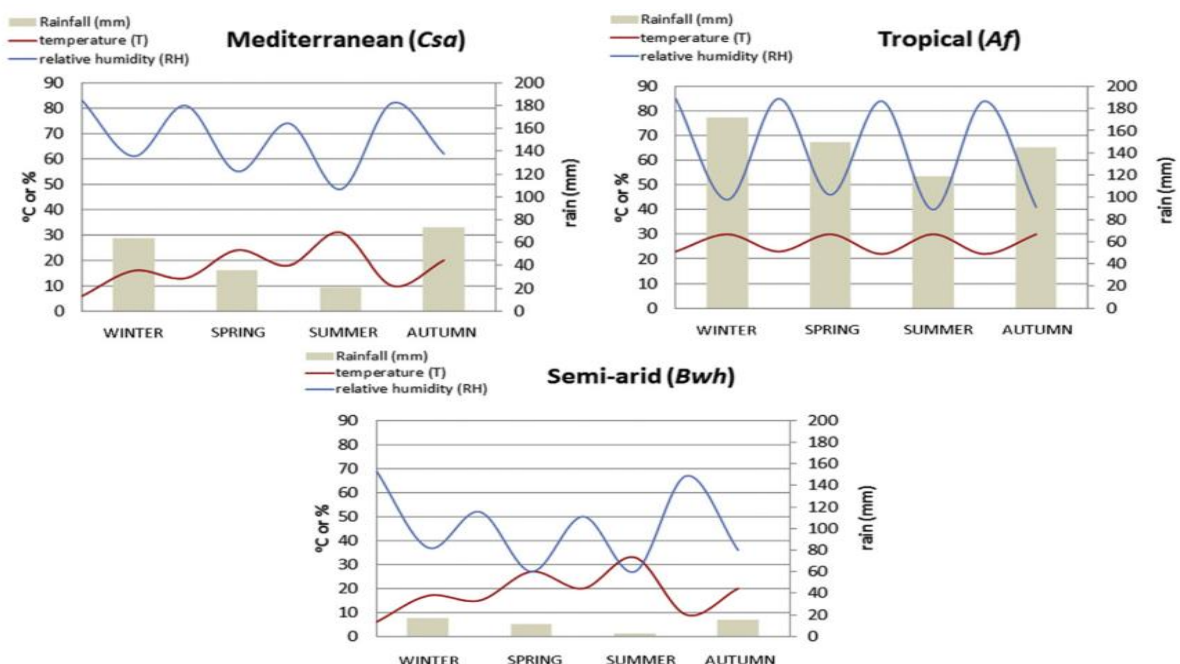


Figure I-58. Conditions moyennes de température, d'humidité relative et de précipitation enregistrées durant l'année 2012 dans quatre villes ou pays différents dans les mêmes zones climatiques [129].

Le but étant de suivre l'évolution des propriétés macroscopiques (masse, volume et les variations chromatiques) avant, pendant et après les cycles de vieillissement accélérés. Ils ont montré que les bétons de chanvre étudiés ont une bonne durabilité vis-à-vis des différentes

sollicitations et conditions climatiques. Cependant, ils ont suggéré de prendre certaines mesures spécifiques de prévention et d'entretien pour assurer une plus grande durabilité de ces matériaux. Par ailleurs, l'exposition au sel (NaCl) n'a révélée aucune dégradation physique, car le sel a été observé uniquement sur la surface des échantillons. Cela est en accord avec les résultats de Walker *et al.* [130]. Concernant la croissance microbienne, ils ont trouvé que cette dernière était plus élevée sous le climat tropical en raison des précipitations abondantes.

Viel *et al.* [131] ont étudié la résistance des matériaux biosourcés aux développements fongiques. Pour cela, les matériaux testés ont été régulièrement pesés et photographiés afin de suivre l'évolution de masse et de mesurer la surface contaminée par les moisissures. Ils ont montré à travers des analyses chimiques, que le pH est un facteur important pour prédire la sensibilité du matériau au développement des moisissures. En effet, les matériaux ayant un pH d'environ 10 ont été résistants au développement fongique. Cependant, ceux dont le pH est égal ou inférieur à 6 présentent un développement fongique important. Delannoy *et al.* [132] ont étudié l'évolution des propriétés fonctionnelles (microstructure, propriété acoustique, et isotherme de sorption) du béton de chanvre pendant deux ans dans trois conditions différentes, à savoir : un environnement de référence statique, des conditions d'humidification/séchage et un vieillissement externe (*in situ*). Ils ont observé des changements dans les propriétés des matériaux ayant subi les deux types de vieillissement, mais aucune variation n'a été enregistrée sur les matériaux de référence. Par ailleurs, Bennai *et al.* [5] se sont intéressés à la caractérisation hygromorphique du béton de chanvre. Pour cela, ils ont réalisé plusieurs essais tomographiques à différentes résolutions et différents états hydriques (Figure I-59) afin de reconstruire le volume 3D réel du matériau étudié. Ils ont montré que le béton de chanvre est un matériau à double porosité, ce qui souligne la complexité de sa microstructure. D'autre part, Ils ont observé que la chènevotte présente des déformations très importantes comparée au liant. Cela s'explique par la forte hygroscopicité de la particule végétale. En effet, l'humidification du matériau provoque le gonflement des granulats végétaux en causant ainsi une diminution de la porosité inter-particulaire. De plus, ils ont montré que le séchage hydrique provoque le retrait des granulats végétaux.

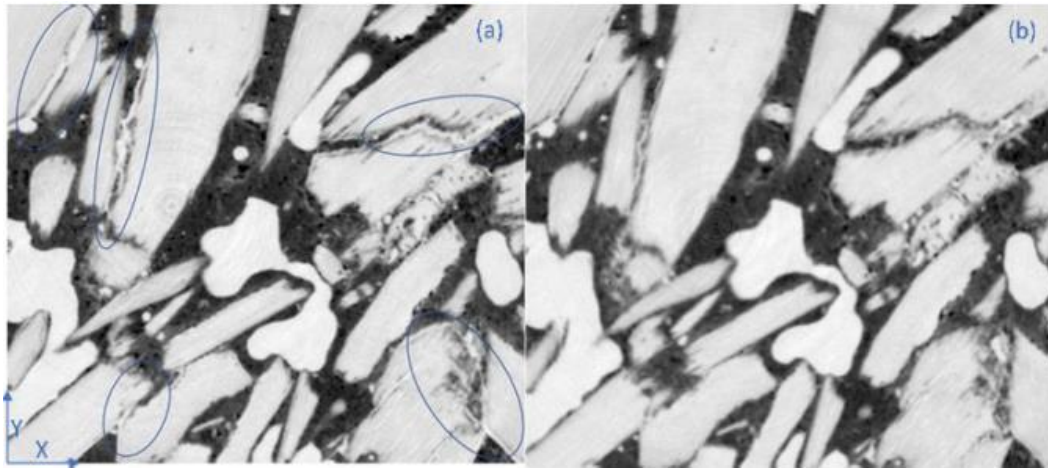


Figure I-59. Microstructure du béton de chanvre obtenue par tomographie aux rayons X, (a) 0% HR et (b) 85 % HR [5].

I.10. Conclusion

L'étude réalisée dans ce premier chapitre nous a permis d'établir un état de l'art dans lequel nous avons synthétisé les travaux de la littérature dédiés à cette thématique de recherche. Nous avons effectué dans un premier temps, une étude phénoménologique sur les transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans les milieux poreux dans l'intention de comprendre d'une part, les différents modes de fixation d'eau à l'échelle microscopique et d'autre part, de mieux appréhender les mécanismes mis en jeu lors de ces transferts. Par ailleurs, une partie de ce chapitre a été dédié pour synthétiser les différentes méthodes expérimentales permettant de mesurer les propriétés intrinsèques des matériaux de construction. Ces propriétés constituent les paramètres d'entrées des modèles des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité. De plus, un aperçu sur les différents modèles de prédiction du comportement hygrothermiques a été réalisé. A la fin de ce chapitre, nous avons montré l'importance de partir sur un choix adéquat des matériaux de construction afin de réduire les impacts énergétiques et environnementaux tout en assurant un meilleur confort à l'intérieur de l'ambiance habitable.

Dans la suite, le chapitre II du présent manuscrit de thèse est consacré pour la présentation des matériaux étudiés ainsi que la procédure expérimentale suivie.

Chapitre II : Choix des matériaux et protocoles expérimentaux

II.1. Introduction

La connaissance des propriétés intrinsèques des matériaux poreux est une étape indispensable pour l'étude des phénomènes de transfert de chaleur, d'air et d'humidité. Nous présentons d'abord dans ce chapitre, les matériaux étudiés en montrant la méthode de formulation et de pré conditionnement. Ensuite, nous décrivons les différentes méthodes de caractérisation expérimentales de ces matériaux. Enfin, nous terminons ce chapitre en présentant les protocoles de vieillissement accélérés que nous avons choisi et réalisé au laboratoire (LaSIE) dans le cadre de cette thèse.

II.2. Matériaux étudiés

Les matériaux biosourcés provenant soit de la biomasse animale ou végétale, constituent aujourd'hui une solution incontournable pour réduire les impacts énergétiques et environnementaux. C'est pourquoi il est important de s'intéresser à leur comportement et leur durabilité afin d'encourager davantage leur utilisation et de donner une garantie sur leurs propriétés fonctionnelles à long terme. Parmi ces matériaux, on trouve le béton de chanvre et le béton de lin qui se composent généralement de granulats végétaux, de liant et de l'eau. Ils peuvent couvrir plusieurs utilisations dans les bâtiments selon la formulation utilisée [80]. Ces deux matériaux biosourcés font donc l'objet des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse.

II.2.1. Etudes à réaliser sur chaque matériau

Dans ces travaux, l'objectif ne consiste pas à effectuer une étude comparative entre les deux matériaux choisis, mais plutôt à combler le manque de données et d'informations de chacun des deux matériaux après une étude approfondie dans la littérature. Sur ce contexte, nous avons envisagé d'orienter notre étude comme suit :

a) Béton de lin

Dans la littérature, très peu de travaux ont été réalisés sur le béton de lin, ce qui souligne la méconnaissance du comportement de ce matériau. Afin d'encourager davantage son

utilisation, une investigation expérimentale qui vise à étudier le comportement de ce matériau a été proposée et réalisée dans nos travaux de thèse. L'idée consiste à mettre en évidence l'effet de la taille et de la teneur en anas de lin sur les propriétés hydriques, thermiques et mécaniques de ce matériau. Cela va permettre non seulement d'enrichir les bases de données en termes de ses propriétés fonctionnelles, mais d'ouvrir également de nouvelles perspectives permettant d'avoir une meilleure maîtrise de ce matériau, ce qui peut contribuer à son inscription dans un cadre normatif.

b) Béton de chanvre

Contrairement au béton de lin, le béton de chanvre est un matériau normalisé depuis 2012. Plusieurs études ont été effectuées sur ce matériau. Cependant, la plupart de ces études se concentrent sur le comportement du béton de chanvre à l'état sain. C'est pourquoi son utilisation dans le domaine de la construction reste limitée en raison du manque de garantie quant à l'évolution de ses propriétés et de son comportement dans le temps. L'idée consiste donc à dépasser cette barrière grâce à une étude expérimentale et numérique approfondie sur le vieillissement de ce matériau. Le but étant de comprendre le lien entre les modifications microstructurales provoquées par le vieillissement et leurs impacts sur le comportement du béton de chanvre afin de mieux appréhender sa durabilité et les mécanismes de dégradations qui en résultent. Sur le volet numérique, un couplage entre le modèle hygrothermique et mécanique a été réalisé afin de prédire les déformations du béton de chanvre, notamment de la chènevotte, issues des sollicitations hygrothermiques. Cela va nous permettre donc non seulement de remonter aux propriétés vieilles et saines du béton de chanvre, mais aussi de mieux appréhender son comportement à plusieurs échelles. La prise en compte du phénomène d'hystérésis est également envisagée afin d'assurer une meilleure qualité de prédiction du modèle numérique et de voir son incidence sur la consommation énergétique à l'échelle du bâtiment.

II.2.2. Composants du béton de chanvre et du béton de lin

Si on se limite à une formulation classique, le béton de chanvre et le béton de lin sont obtenus en mélangeant des quantités bien définies de chènevotte (ou d'anas de lin), de liant et de l'eau (voir Figure II-1).

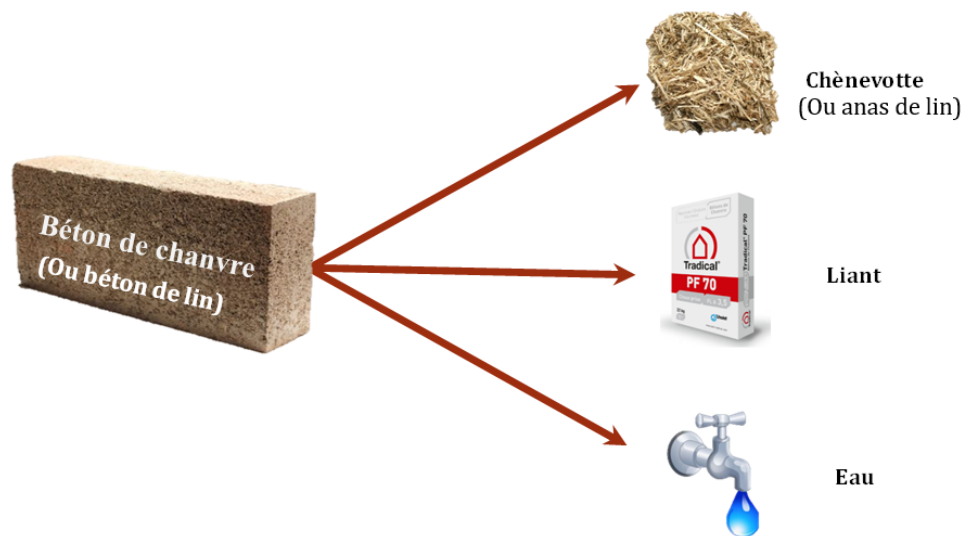


Figure II-1. Composants du béton de chanvre.

a) Chènevotte

La chènevotte utilisée dans ce travail est la Chanvribat (Figure II-2) qui est compatible avec le liant Tradical® PF70. Elle a été fournie par l'entreprise Ecohabitat⁶ (Matériaux écologique pour l'habitat). La densité apparente moyenne de ces particules végétales est d'environ 100 Kg/m³.



Figure II-2. Photo de la chènevotte utilisée.

⁶<http://www.ecohabitat.fr/>

La taille et la géométrie de la chènevotte peuvent influencer les propriétés finales du béton de chanvre. Il s'avère donc nécessaire de montrer les dimensions de ces particules végétales à travers une analyse granulométrique. Toutefois, le recours à une analyse granulométrique classique par tamisage ne peut surement pas être efficace dans notre cas vu la géométrie et la nature de la chènevotte. C'est pourquoi dans cette étude, l'analyse granulométrique a été effectuée par traitement d'image sous le logiciel « Imagej ». Pour ce faire, nous avons sélectionné une famille composée de 713 particules de chènevottes prélevées d'une manière aléatoire. Les particules ont été ensuite déposées sur une feuille de papier noir au format A3 tout en évitant le chevauchement entre particules afin de faciliter les opérations de segmentation (voir Figure II-3).



Figure II-3. Disposition de la chènevotte sur une feuille de papier A3 pour l'analyse granulométrique.

Après segmentation et traitement d'images, nous avons pu remonter aux dimensions des particules végétales étudiées. La distribution des longueurs et des largeurs sont données respectivement sur les Figure II-4 (a) et Figure II-4 (b).

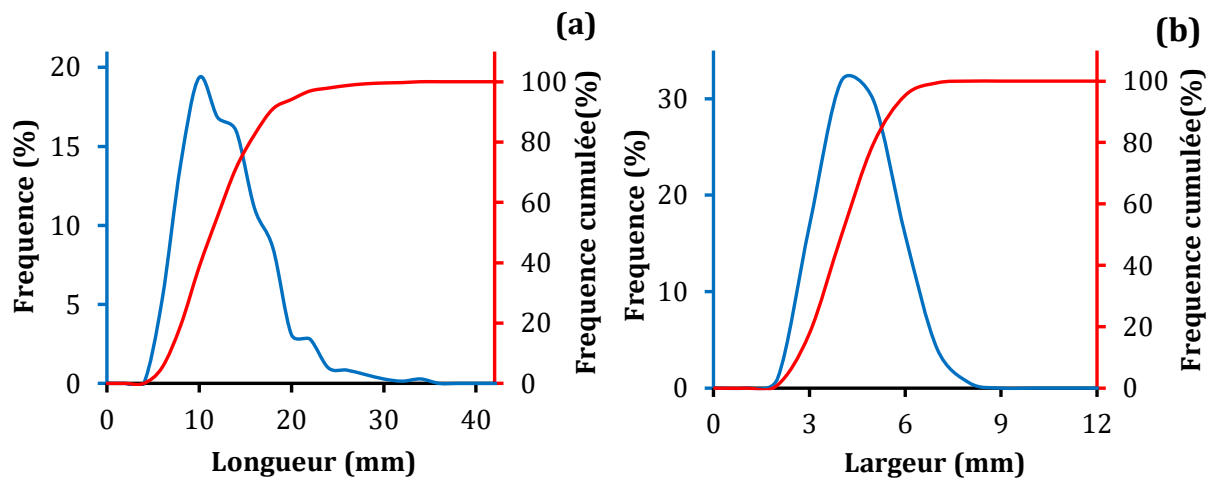


Figure II-4. Analyse granulométrique de la chènevotte par traitement d'image : (a) distribution de la longueur et (b) distribution de la largeur.

Les dimensions maximale, minimale et moyenne de la chènevotte utilisée sont récapitulées dans le Tableau II-1.

Tableau II-1 Minimum, maximum et moyenne de la longueur et de la largeur de la chènevotte utilisée.

	Minimum	Maximum	Moyenne
Longueur (mm)	4,06	32,45	11,99
Largeur (mm)	1,69	7,62	4,06
Longueur/Largeur (-)	1,28	9,13	2,98

b) Anas de lin

Les anas de lin utilisés dans ce travail ont été fournis par la société coopérative agricole C.A.L.I.R.A.⁷ (Coopérative Agricole Linière de la Région d'Abbeville, France). La masse volumique moyenne de ces particules végétales est de 110 kg/m³. Leurs dimensions varient de 1 mm jusqu'au 35 mm. Cette partie sera détaillée dans le chapitre III.

c) Liant Tradical PF70

Le liant utilisé dans cette étude est la chaux Tradical® PF70 de SA Lhoist Recherche et Développement (voir Figure II-5) fourni par le même fournisseur (Ecohabitat). Il est composé de 75 % de chaux aérienne, 15 % de liant hydraulique et 10 % de liant pouzzolanique. Le choix de ce type de liant a été fait dans le but de préserver les propriétés thermiques de ces matériaux. De plus, vu que les granulats végétaux ont une capacité d'absorption importante, elles absorbent une quantité plus importante d'eau lors du gâchage. Cela provoque une mauvaise prise et une dessiccation, d'où la nécessité d'utiliser un liant riche en chaux aérienne qui est moins sensible à l'eau lors de la prise.

⁷ <https://www.societe.com/societe/coop-agricole-liniere-region-d-abbeville-780650024.html>

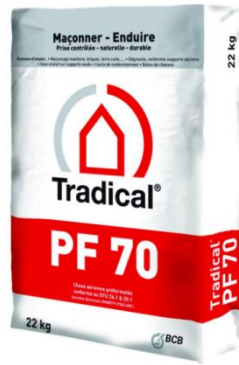


Figure II-5. Photo de la chaux Tradical PF70

d) Eau

Pour mélanger les particules végétales (chènevotte ou anas de lin) et le liant, nous avons utilisé l'eau du robinet ayant une température d'environ 20°C.

II.2.3. Formulation des matériaux

La formulation du béton de chanvre et du béton de lin étudiés a été réalisée conformément aux règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre. Les pourcentages massiques sont donnés dans le Tableau II-2.

Tableau II-2 Pourcentages massiques de la formulation utilisée.

Chènevotte (Chanvribat)	Liant (Tradical PF70)	Eau
16 %	34 %	50 %

Concernant le béton de lin, la formulation a été fixée en se référant au béton de chanvre qui est inscrit dans un cadre normatif. Les différentes formulations étudiées en variant la taille et la teneur en particules végétales seront présentées dans le chapitre III.

II.2.4. Malaxage et pré-conditionnement

Pour le malaxage des matériaux étudiés, nous avons utilisé un malaxeur à axe vertical de capacité de 30 L (voir Figure II-6). L'eau et le liant (Tradical PF 70) ont été mélangés en premier jusqu'à l'apparition des bulles d'air dans le mélange. Cette étape prend généralement 2 à 3 minutes avec une vitesse de rotation du malaxeur de 90 tr/min. Ensuite, les particules végétales (chènevotte ou anas de lin) ont été progressivement rajoutées au mélange sans interrompre le malaxage jusqu'à ce qu'on obtient une pâte bien homogène.



Figure II-6. Malaxage du béton de chanvre

Une fois le mélange est préparé, on procède au remplissage manuel des éprouvettes selon les dimensions voulues avec un léger compactage de manière à avoir la même masse volumique. Le but étant de pouvoir justifier la répétabilité dans la fabrication des échantillons.

Après avoir rempli les éprouvettes, ces dernières ont été conservées dans leurs moules et stockées pendant 5 jours dans une chambre climatique régulée en température et en humidité relative (20°C et 50% d'HR). Ces conditions ont été fixées en se référant à l'étude menée par Arnaud *et al.* [108]. Les moules ont été ensuite démontés afin de permettre le séchage des éprouvettes sur leurs 5 facettes (Figure II-7).



Figure II-7. Pré-conditionnement des matériaux dans une chambre climatique ($T=20^{\circ}\text{C}$; $\text{HR}=50\%$).

Afin d'obtenir la cinétique de séchage de nos matériaux, un suivi de masse a été réalisé avec une période de 24 heures entre deux pesées successives (Figure II-8). Les essais de caractérisation ont été commencés après la stabilisation de masse des éprouvettes. Autrement dit, après avoir obtenu une variation de masse inférieure à 0,1% entre deux pesées successives.

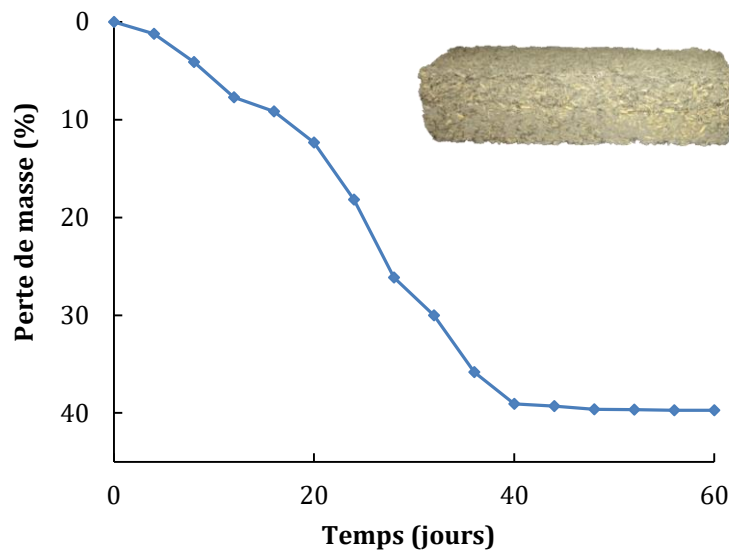


Figure II-8. Perte de masse des échantillons du béton de chanvre.

II.2.5. Répétabilité dans la fabrication des échantillons

Vu la quantité importante des éprouvettes du béton de chanvre que nous avons fabriqué pour la campagne expérimentale et la capacité limitée du malaxeur, les matériaux ont été formulé

en plusieurs gâchées. Pour cela, nous avons contrôlé la répétabilité dans la fabrication des échantillons à travers un suivi de la masse volumique des éprouvettes. Cette étape s'avère nécessaire et indispensable afin de pouvoir assurer une comparaison fiable entre les différents résultats. Les mesures effectuées sont récapitulées dans le Tableau II-3 :

Tableau II-3 Masse volumique et écart type des éprouvettes du béton de chanvre fabriquées par le même opérateur et dans les mêmes conditions.

Nombre d'éprouvettes	Masse volumique (kg/m ³)	Ecart type (kg/m ³)
31	485,14	± 14,77

On voit bien à travers les résultats montrés dans le Tableau II-3 que les masses volumiques sont peu dispersées avec un écart type relatif à la masse volumique moyenne de 3.69%. Cela revient à dire que le procédé de fabrication est répétable et la comparabilité des résultats est possible.

II.3. Méthode de caractérisation expérimentales des matériaux étudiés

II.3.1. Essai de porosité

La porosité accessible à l'eau permet de nous informer sur la quantité des vides contenus dans un matériau. Le principe de cette méthode est basé sur la technique de la pesée hydrostatique qui est fondée sur le principe de la poussée d'Archimède. La caractérisation a été effectuée suivant la procédure de l'AFPC-AFREM [133]. La saturation des échantillons sous vide a été assurée à l'aide d'un banc de saturation composé d'un dessiccateur relié à une pompe sous vide (Figure II-9). Pour chaque cas du béton de chanvre, trois échantillons de 5x5x5 cm ont été testés afin de vérifier la répétabilité des mesures. La porosité à l'eau a été déterminée par l'Eq. (II-1):

$$\varepsilon_p = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 (\%) \quad (II-1)$$

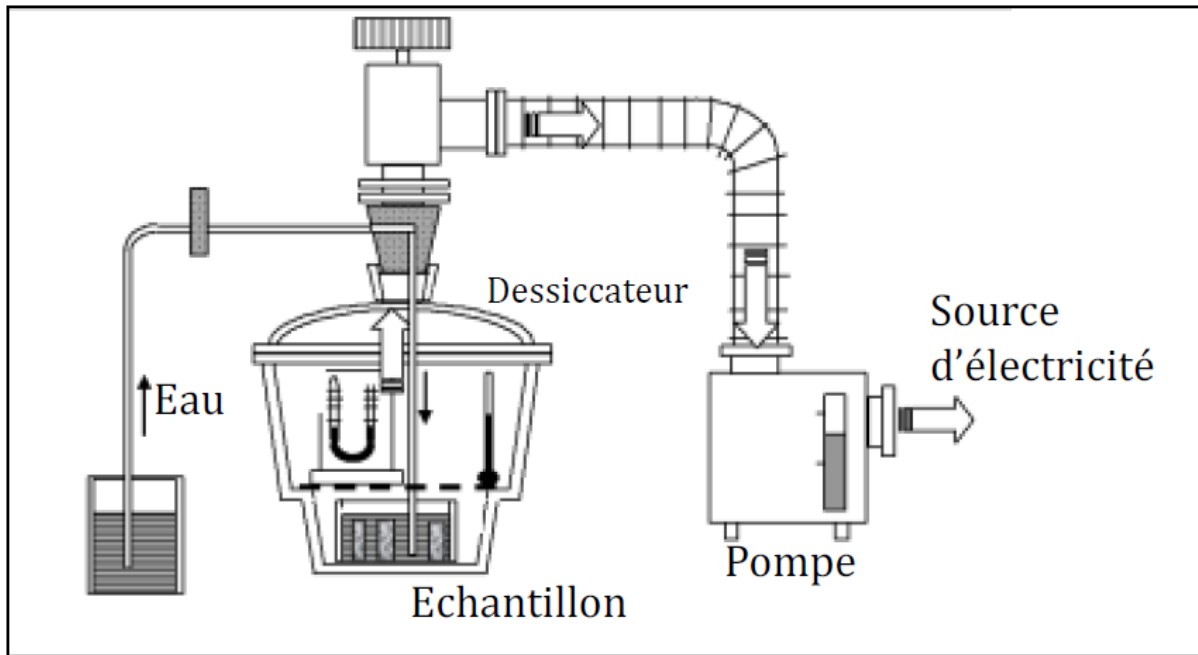


Figure II-9. Principe de la porosimétrie à l'eau [134].

II.3.2. Microscope Electronique à Balayage en mode Environnemental (MEB)

La microscopie électronique à balayage en mode environnementale (voir Figure II-10) est une technique qui permet d'observer des échantillons non conducteurs et/ou hydratés sans avoir besoin à un traitement et une préparation préalable de la surface de l'échantillon. Cela est rendu possible grâce à la présence d'une faible pression d'un gaz inerte et/ou de vapeur d'eau dans la chambre d'échantillon permettant d'éviter les contraintes sous vide [135]. Cette technique est donc utilisée comme alternative à la microscopie électronique conventionnelle qui, quant à elle, nécessite un prétraitement de la surface d'échantillon. Ce dispositif fournit une résolution et un contraste suffisamment élevés, ce qui permet d'assurer une meilleure investigation. De plus, il permet de remonter à deux types d'images, à savoir : (i) images de type SE obtenues avec des électrons secondaires qui donnent des informations sur la topographie de la surface et (ii) images de type BSE obtenues avec des électrons rétrodiffusés qui donnent des informations de contraste chimique de la surface.



Figure II-10. Photo du Microscope Electronique à Balayage en mode Environnemental (MEB).

II.3.3. Résistance à la compression

Jusqu'à présent, il n'y a pas de méthode standard pour la mesure de la résistance à la compression des matériaux biosourcés. Cette dernière a été donc déterminée en se référant à des travaux de la littérature [107,130,136]. Dans notre cas, la résistance à la compression a été mesurée sur le point où la courbe contrainte/déformation s'écarte du premier palier élastique. Le test a été effectué sur des échantillons cubiques de 5 cm de côté avec une vitesse de charge de 5 mm/min à l'aide d'un appareil de mesure ZwickRoell (Figure II-11).



Figure II-11. Dispositif utilisé pour la mesure de la résistance à la compression du béton de chanvre.

II.3.4. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique définit la capacité d'un matériau à accumuler de l'énergie thermique. Autrement dit, c'est la quantité d'énergie nécessaire en J pour augmenter la température d'un gramme de matière, d'un degré Celsius.

La mesure de cette propriété a été réalisée à l'aide d'un Calorimètre Calvet®. L'avantage de ce dispositif réside dans le fait qu'il utilise des capteurs fluxmétrique 3D qui entoure entièrement l'échantillon et permet de donner des résultats plus précis (Figure II-12). Les échantillons testés sont cylindriques de 0.7 cm de diamètre et d'environ 5 cm de hauteur.

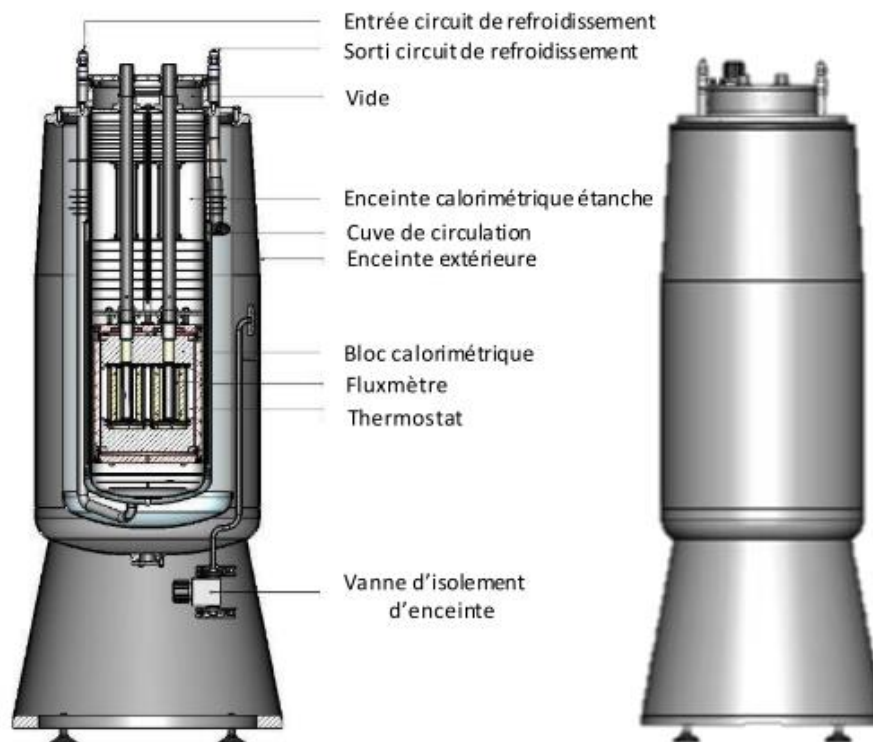


Figure II-12. Coupe du Calorimètre Calvet® utilisé pour la mesure de la chaleur spécifique du béton de chanvre.

II.3.5. Conductivité thermique

La conductivité thermique est l'une des propriétés les plus influentes sur le comportement thermique des bâtiments. Elle représente la facilité de propagation de la chaleur dans un matériau pour un gradient de température donné. Cette propriété a été mesurée dans des conditions stationnaires en utilisant un Lambda-meter Ep500e qui fonctionne sous le principe de la méthode normalisée de la plaque chaude gardée selon les normes NF EN12667 [137] et NF EN12664 [138]. Le principe de cette méthode consiste à placer une éprouvette de dimensions données entre deux plaques (l'une chaude et l'autre froide) où s'exerce un gradient de température constant (Figure II-13). La conductivité thermique du matériau sera ensuite calculée à partir de la puissance électrique de chauffe fournie par le dispositif. Trois échantillons de 15×15×5 cm de chaque matériau ont été caractérisés afin de vérifier la répétabilité des mesures. La caractérisation a été effectuée dans des conditions isothermes pour une température de 23°C.

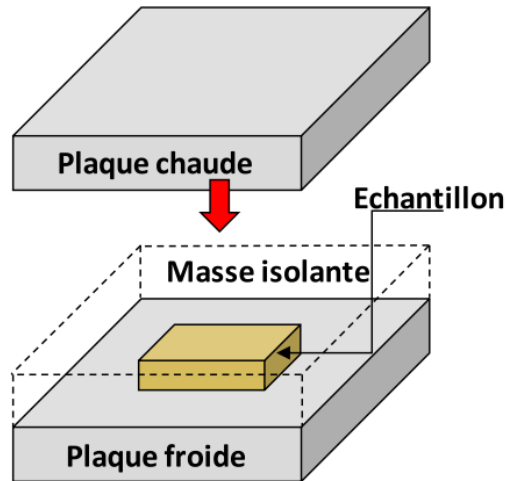


Figure II-13. Principe de mesure de la conductivité thermique

II.3.6. Isothermes d'adsorption/désorption

Les isothermes de sorption de la vapeur d'eau représentent l'évolution de la teneur en eau d'un matériau en fonction de l'humidité relative de l'air à l'équilibre pour une température donnée. La mesure de ces isothermes a été réalisée à l'aide d'un dispositif appelé proUmid (Figure II-14). Le principe de mesure de ce dernier repose sur une méthode gravimétrique et permet de caractériser jusqu'à 23 échantillons à la fois. L'essai consiste à exposer les échantillons à différents paliers d'humidité relative et à une température constante dans la chambre climatique de l'appareil. Les isothermes d'adsorption/désorption sont obtenues automatiquement grâce à la mesure continue du gain et de perte de masse des échantillons. Avant de commencer l'essai, les échantillons cubiques de 1 cm de côté ont été séchés dans une étuve à 40°C pendant 24 heures puis dégazés sous vide afin de compléter le séchage.

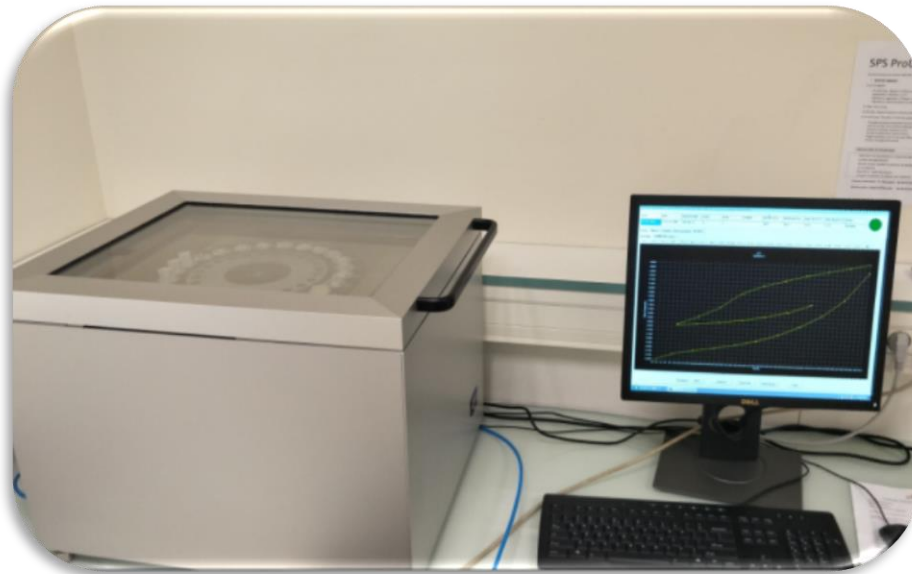


Figure II-14. Photo du proUmid utilisé pour la mesure des isothermes d'adsorption/désorption.

II.3.7. Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau caractérise l'aptitude d'un matériau à laisser passer de l'humidité à travers son épaisseur sous un gradient de pression de vapeur une fois l'état d'équilibre est atteint. C'est l'une des propriétés intrinsèque d'un matériau puisqu'elle ne varie pas avec la variation de son épaisseur. La mesure de cette propriété a été effectuée à l'aide du dispositif GraviTest® qui se base sur la méthode de la coupelle selon la norme ISO 12572 [65]. L'avantage de ce dispositif est l'automatisation de l'essai notamment pour le suivi de la masse grâce à une balance de haute précision (10^{-4} g). L'essai consiste à exposer les deux facettes de l'échantillon à deux humidités relatives différentes maintenues constantes grâce à une solution saline saturée et une chambre climatique placées respectivement au-dessous et au-dessus de l'échantillon (voir Figure II-15).

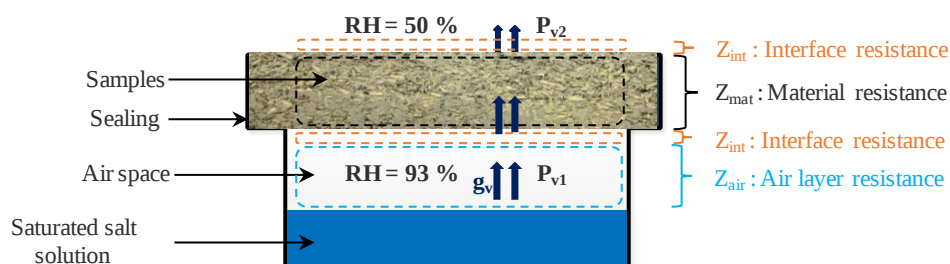


Figure II-15. Schéma descriptif de la méthode de la coupelle.

Le gradient d'humidité relative (ou gradient de pression de vapeur d'eau) engendre un flux de vapeur allant de la haute à la basse pression. Ce flux a été évalué en procédant à des pesées régulières de l'assemblage afin de déterminer le taux de transmission de la vapeur d'eau à l'équilibre. L'essai a été réalisé sur des coupelles humides où l'humidité relative à l'intérieur de la coupelle a été fixée à 93% et celle de l'extérieur à 50%. Les échantillons cylindriques testés ont 8 cm de diamètre et 2 cm d'épaisseur.

II.3.8. Capacité de tampon hydrique (MBV)

Le pouvoir tampon à l'humidité caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air ambiant. Il indique la quantité d'eau adsorbée ou libérée par un matériau qui est soumis à une variation d'humidité relative extérieure. Cet indice (MBV) permet donc de nous informer sur la qualité d'un matériau vis-à-vis de la régulation naturelle d'humidité relative dans l'ambiance habitable (Figure II-16). Ce paramètre a été mesuré en se référant au projet Nordtest qui propose de conditionner les échantillons dans une enceinte climatique pendant 8 heures à 75 % d'humidité relative, s'ensuit de 16 heures à 33 %, en maintenant une température constante à 23°C.

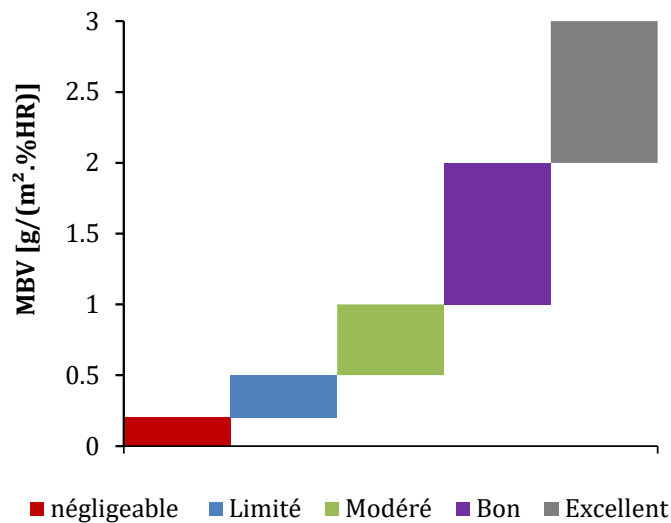


Figure II-16. Différentes classes de capacité de tampon à l'humidité des matériaux selon leurs indices MBV.

Le pouvoir tampon à l'humidité MBV [kg.m⁻².%.HR] est donné par la relation empirique Eq. (II-2):

$$MBV = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{A (HR_{\text{humidification}} - HR_{\text{séchage}})} \quad (\text{II-2})$$

Avec,

$m_{\max}$, $m_{\min}$ (kg) respectivement la masse d'eau maximale et minimale accumulée dans l'échantillon ;

A [m^2] la surface de l'échantillon exposée ;

$HR_{\text{humidification}}$, $HR_{\text{séchage}}$ (%) est l'humidité relative appliquée respectivement lors du cycle de d'humidification et de séchage ;

II.4. Protocoles de vieillissement accélérés : démarche et méthodologie

Le contact des matériaux de construction avec le milieu extérieur (pluie, neige, soleil, etc.) peut affecter leur microstructure, ce qui modifie par conséquent leur comportement hygrothermique. L'évaluation de la durabilité de ces matériaux peut se faire soit in-situ en exposant les matériaux aux conditions climatiques naturelles, ou en laboratoire en appliquant des tests de vieillissement accéléré. Dans notre cas, l'objectif est d'évaluer la durabilité du béton de chanvre au Laboratoire. Pour ce faire, nous avons sélectionné trois protocoles de vieillissement accéléré, à savoir : l'immersion/séchage, l'immersion/gel/séchage et l'humidification/séchage. Certes, ces deux premiers protocoles sont nettement plus sévères que les conditions climatiques réelles auxquelles sont soumis ces matériaux pendant leur durée de vie, mais l'avantage c'est qu'ils permettent de simuler leur cas extrême de dégradation et accélèrent significativement le processus de vieillissement. La démarche que nous avons proposé pour l'étude de l'effet du vieillissement sur les propriétés fonctionnelles du béton de chanvre est schématisée dans la Figure II-17.

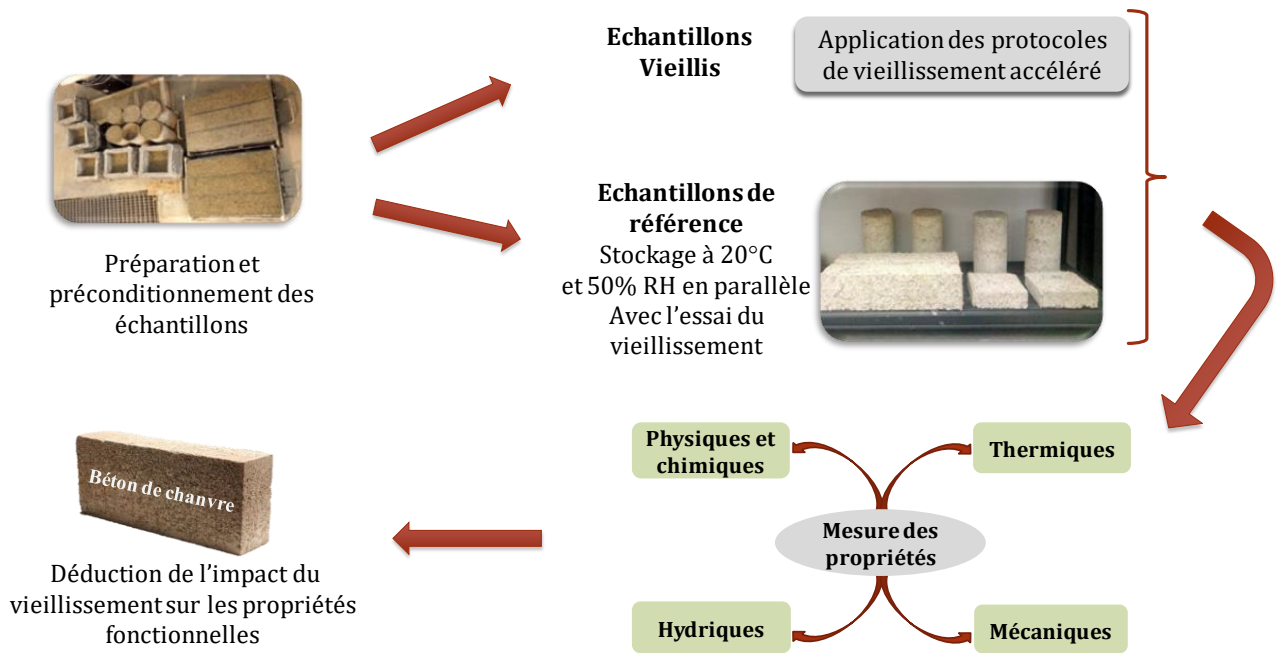


Figure II-17. Démarche suivie pour l'étude de l'effet vieillissement accéléré sur les propriétés fonctionnelles du béton de chanvre.

II.4.1. Protocole N°1 : Immersion/séchage

La simulation de ce vieillissement consiste en une succession de cycles d'immersion des matériaux dans l'eau pendant 48 heures, suivie d'un séchage dans une étuve à 50°C pendant 72 heures (voir Figure II-18). La durée totale de l'essai est de 40 jours. Ce type de vieillissement est nettement plus sévère que les conditions réelles auxquelles ces matériaux sont exposés pendant leur cycle de vie. Afin d'éviter le vieillissement dû à l'âge du matériau et de permettre une bonne comparabilité des résultats, nous avons stocké d'autres échantillons sains dans une enceinte climatique régulée en température et en humidité relative ($T=20^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=50\%$) afin de les caractériser le même jour que les échantillons vieillissants.

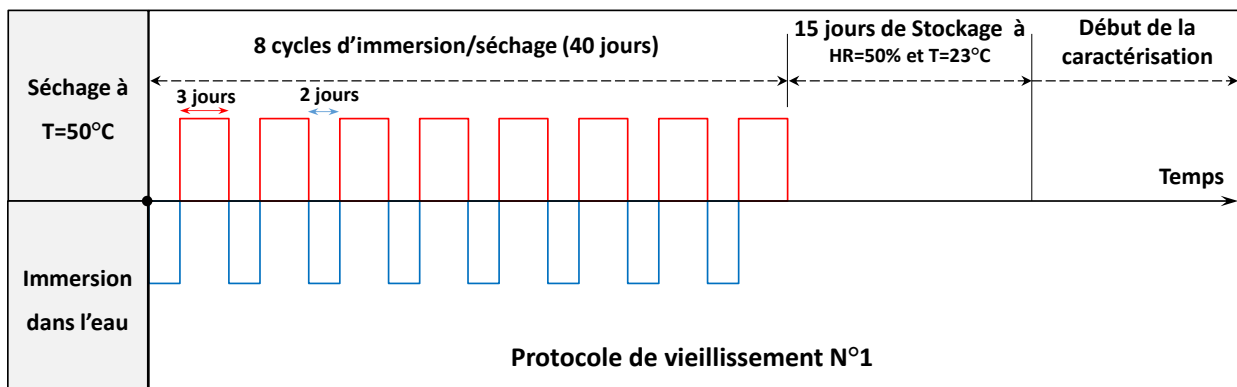


Figure II-18. Protocole de vieillissement N°1 : cycles d'immersion/séchage pendant 40 jours.

II.4.2. Protocole N°2 : Immersion/gel/séchage

Concernant le deuxième protocole de vieillissement accéléré (immersion/gel/séchage), une étape de gel à -18°C a été rajouté entre l'immersion et le séchage. L'essai consiste donc à exposer les matériaux du béton de chanvre à une succession de cycles d'immersion dans l'eau pendant 2 jours, suivi d'une journée de gel à -18°C et enfin à 3 jours de séchage à 50°C . Les différentes étapes de ce deuxième protocole de vieillissement sont schématisées dans la Figure II-19.

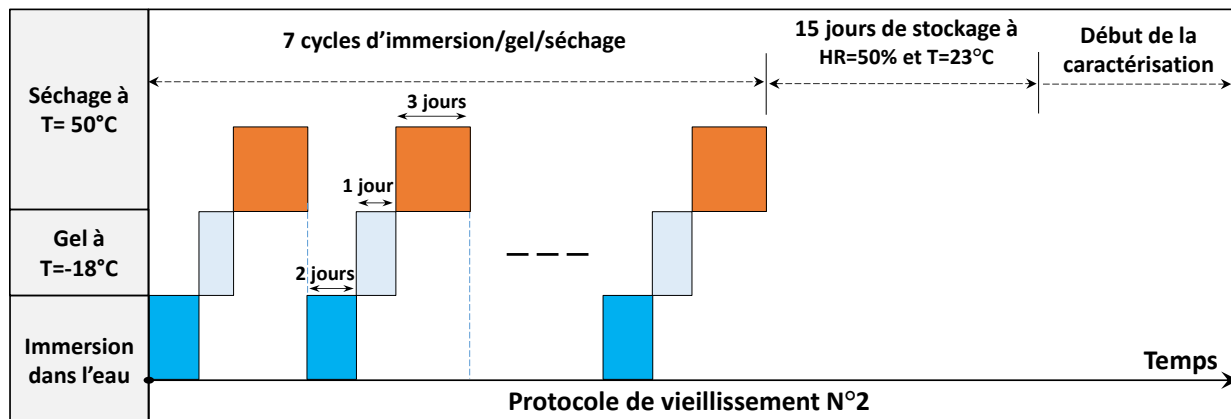


Figure II-19. Protocole de vieillissement N°2 : cycles d'immersion/gel/séchage pendant 42 jours.

II.4.3. Protocole N°3 : Humidification/séchage

Le dernier protocole de vieillissement accéléré (humidification/séchage) consiste en une succession de cycles d'humidification à 85% d'humidité relative pendant 5 jours, suivi d'un séchage à 20% d'humidité relative pendant 5 jours. Quant à la température, elle a été maintenue constante à 30°C dans le but de favoriser l'apparition des moisissures. Ce protocole a été réalisé dans une enceinte climatique afin de pouvoir contrôler avec précision les conditions climatiques appliquées (Figure II-20). Ce test semble réaliste et peu agressif, c'est pourquoi nous l'avons effectué sur une durée de 8 mois (240 jours).

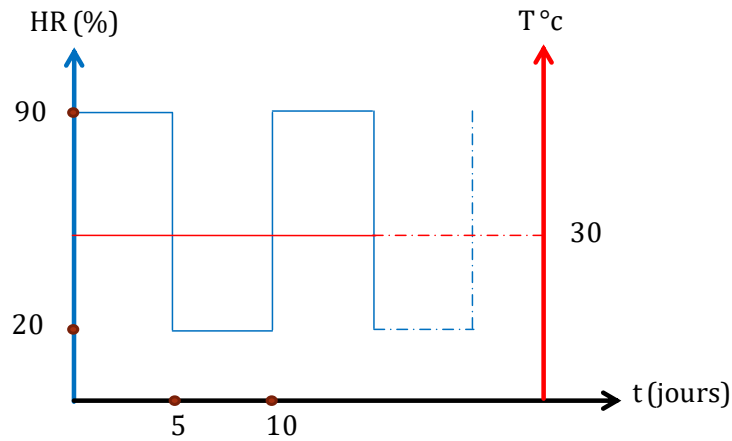


Figure II-20. Protocole de vieillissement N°3 : cycles d'humidification/séchage pendant 8 mois

II.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les matériaux étudiés ainsi que les différents protocoles expérimentaux suivis et mis en œuvre dans le cadre de ce travail de thèse. Vu la contribution et l'intérêt de ces matériaux biosourcés, nous avons consacré le chapitre qui suit pour l'évaluation des propriétés hygrothermiques et mécanique du béton de lin en tenant compte de l'effet de la teneur et de la taille de ses particules végétales. Le but étant de mieux appréhender son comportement hygrothermique afin d'encourager davantage son utilisation dans la construction et de promouvoir de nouvelles perspectives économiques pour ces produits.

Chapitre III : Effet de la taille et de la teneur en particules végétales sur les propriétés hygrothermique et mécanique des matériaux biosourcés : Application sur le béton de lin

III.1. Introduction

Le recours à l'utilisation des matériaux biosourcés pour la construction s'inscrit parfaitement dans une démarche de développement durable et permet de répondre aux nombreux défis sociétaux actuels autour de l'atteinte d'un territoire zéro carbone à l'horizon 2040. En effet, les matériaux à faible empreinte environnementale ont un bilan carbone négatif [139] et constituent une solution incontournable pour réduire les impacts énergétiques et environnementaux. Cependant, le comportement de ces matériaux reste peu évoqué dans la littérature, ce qui limite leur utilisation par les professionnels de l'industrie. Parmi ces granulats végétaux qu'on peut utiliser pour la formulation de ces matériaux biosourcés, on trouve le lin. Les anas de lin ont une faible conductivité thermique [140–142] et une capacité d'absorption d'eau élevée d'environ 2 à 3 fois leurs poids en 48 heures. Cela est dû à la nature de leur microstructure (cellulose et hémicellulose) et à la distribution de leurs pores organisés en capillaires parallèles [117,143]. Pour ce faire, nous avons proposé une investigation expérimentale fine de caractérisation du béton de lin en mettant en exergue l'effet de la taille et de la teneur en particules végétales sur les propriétés fonctionnelles de celui-ci. Les propriétés concernées sont la porosité à l'eau, la conductivité thermique, les isothermes d'adsorption et de désorption, la capacité de stockage d'humidité, la capacité de tampon à l'humidité (MBV) et la résistance à la compression. De plus, une analyse de la microstructure de la particule végétale et du béton de lin a été également effectuée à l'aide d'un microscope électronique à balayage en mode environnemental. Cela permet d'une part, de mieux appréhender son comportement hygrothermique et de répondre aux différentes applications du matériau dans le domaine de la construction, et d'autre part, de promouvoir de nouvelles perspectives économiques pour ces produits. Ces formulations ont été définies en se référant au béton de chanvre qui s'est inscrit dans un cadre normatif. Une comparaison des

propriétés de ces deux matériaux a été également effectuée afin de pouvoir positionner et classer ce nouveau matériau biosourcé.

III.2. Matériau étudié

Cette étude a été effectuée sur un nouveau matériau biosourcé, à savoir, le béton de lin. Ce dernier est obtenu par mélange de granulats légers (anas de lin), de liant et de l'eau. Ce matériau est moins utilisé par rapport au béton de chanvre en raison du manque de règles professionnelles qui garantissent son utilisation.

III.2.1. Formulations étudiées

En se référant au béton de chanvre (matériau normalisé), nous avons proposé 09 formulations à étudier dans l'intention de mettre en évidence l'effet de la taille et de la teneur en particules végétales sur les propriétés hydriques, thermiques et mécaniques du béton de lin. Pour cela, nous avons d'abord fixé trois mélanges d'anas de lin selon leurs tailles, à savoir : une taille 'moyenne', une taille 'grande' et enfin un mélange 'en vrac' (voir Figure III-1).



Figure III-1 Tailles des anas de lin étudiées : (a) en vrac, (b) moyenne et (c) grande

Ensuite, pour chaque taille de particules végétales, nous avons proposé trois pourcentages massiques de teneur en anas de lin, à savoir : 11,5% ; 14,5% et 17,5%. L'objectif est de répondre aux différentes applications du béton de lin, qui dépendent de la formulation du matériau. Ces pourcentages massiques ont été définis en se basant sur la formulation normalisée du béton de chanvre [63]. En outre, trois rapports eau/liant (E/L) correspondants ont été utilisés : 1,35 ; 1,45 et 1,55. Les formulations sont récapitulées dans le Tableau III-1 :

Tableau III-1. Différentes formulations du béton de lin étudié

Taille des anas de Lin	Abréviations des formulations	Pourcentage Massique			G/L	E/L
		Granulats végétaux (%)	Liant Tradical PF70 (%)	Eau (%)		
TV (Vrac)	F 1-1	11,50	37,66	50,84	0,31	1,35
	F 1-2	14,5	34,90	50,60	0,42	1,45
	F 1-3	17,50	32,35	50,15	0,54	1,55
TM (Moyenne)	F 2-1	11,50	37,66	50,84	0,31	1,35
	F 2-2	14,5	34,90	50,60	0,42	1,45
	F 2-3	17,50	32,35	50,15	0,54	1,55
TG (Grande)	F 3-1	11,50	37,66	50,84	0,31	1,35
	F 3-2	14,5	34,90	50,60	0,42	1,45
	F 3-3	17,50	32,35	50,15	0,54	1,55

Dans la suite de ce chapitre, la notation Fij signifie ce qui suit :

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fij: Formulation étudiée,} \\ \text{i = (1,2,3) défini la taille des anas de lin (respectivement, en vrac, moyenne et grande),} \\ \text{j = (1,2,3) défini la teneur massique en anas de lin (respectivement de 11,5\%,14.5\% et 17.5\%),} \end{array} \right.$

Afin de montrer les variations dimensionnelles des anas de lin utilisés dans cette étude, une analyse granulométrique par imagerie a été effectuée sur des échantillons représentatifs des trois mélanges étudiés. Pour parvenir à un tel résultat, nous avons prélevé d'une manière aléatoire 377, 471 et 374 particules végétales de lin respectivement pour les tailles en vrac (T1), moyenne (T2) et grande (T3). Les particules ont été ensuite déposées sur une feuille de papier avec un fond noir au format A4 en évitant tout chevauchement pour faciliter les opérations de segmentation (Figure III-2).



Figure III-2. Exemple sur la disposition des anas de lin sur une feuille de papier A4.

Cette analyse a été effectuée en utilisant le logiciel de traitement d'image « Imagej ». Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus sont présentés dans la Figure III-3.

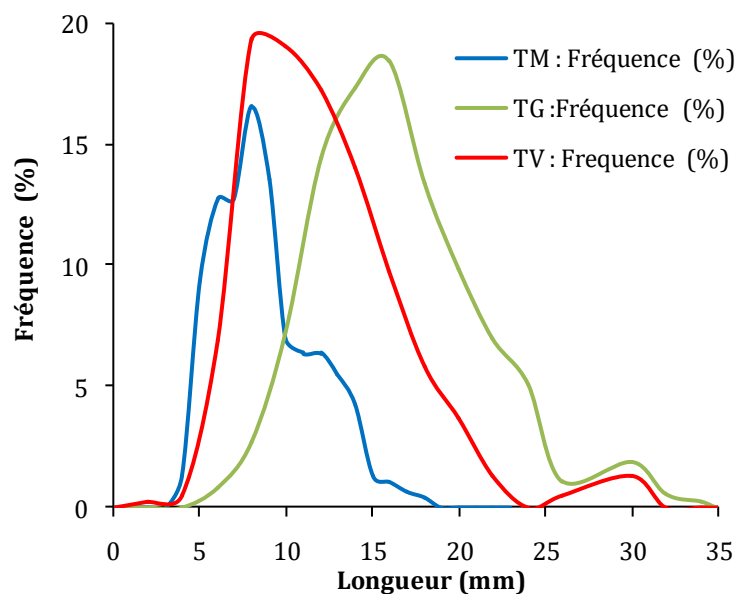


Figure III-3. Analyse granulométrique par traitement d'image des différentes tailles d'anas de lin : (a) mélange en vrac, (b) mélange avec une taille moyenne et (c) mélange avec une taille grande.

Comme on peut le constater sur la Figure III-3, la longueur dominante des anas de lin de taille moyenne est comprise entre 4 et 14 mm et celle de grande taille est entre 10 et 32 mm. Tandis que le mélange d'anas de lin en vrac couvre une plage plus large dont la longueur est comprise entre 5 et 32 mm. En effet, les dimensions des particules végétales de lin sont différentes de celles du chanvre. La chènevotte présente des dimensions plus grandes, notamment en épaisseur. La Figure III-4 montre une comparaison entre ces deux types de particules végétales.

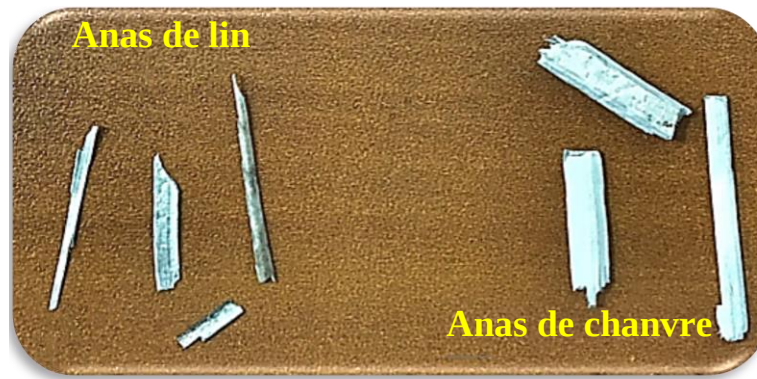


Figure III-4. Particules végétales de chanvre et de lin.

III.3. Analyse de la microstructure des matériaux par Microscope Electronique à Balayage en mode Environnemental (MEB)

Les particules végétales de lin présentent une microstructure poreuse et très complexe. Une bonne analyse de ces particules nécessite donc de recourir à des techniques d'imagerie non destructives basées sur des observations surfaciques à petite échelle. Pour cela, nous avons fait appel à un Microscope Electronique à Balayage en mode Environnemental (MEB). Ce dernier nous a permis d'une part, d'observer à haute précision la complexité de ces particules végétales, et d'autre part, de mieux observer et analyser l'interface fibre/liant après l'incorporation de ces particules végétales avec un liant (chaux Tradical® PF70).

III.3.1. Analyse des images au MEB des anas de lin

La particule végétale de lin (anas de lin) a été caractérisée par le Microscope Electronique à Balayage en mode Environnemental FEI Quanta 200 équipé d'un EDS EDAX-Genesis. La Figure III-5 illustre les observations effectuées sur la coupe transversale de l'anas de lin à deux résolutions différentes. D'abord, on peut clairement remarquer que la microstructure de la particule végétale de lin est différente de celle de la chènevotte que nous avons présenté dans le chapitre II. Malgré la faible épaisseur de cette particule végétale (environ 300 μm), sa coupe transversale montre une structure poreuse très complexe dont les pores sont de différentes catégories et de différentes tailles. Les parois formant ces cellules poreuses se composent principalement de la cellulose (jusqu'à 70 %), d'hémicellulose, de lignine et de pectine [144,145]. Cette structure poreuse et complexe permet d'amortir la transmission de la chaleur dans la particule végétale, ce qui lui confère par conséquent, une faible conductivité thermique (entre 0.037 et 0.042 $\text{w}/(\text{m.K})$). L'incorporation de ces particules végétales dans une matrice cimentaire permet donc non seulement de donner de bonnes propriétés

thermiques du matériau, mais aussi d'améliorer ses propriétés hydriques, notamment la capacité de stockage d'humidité et le MBV.

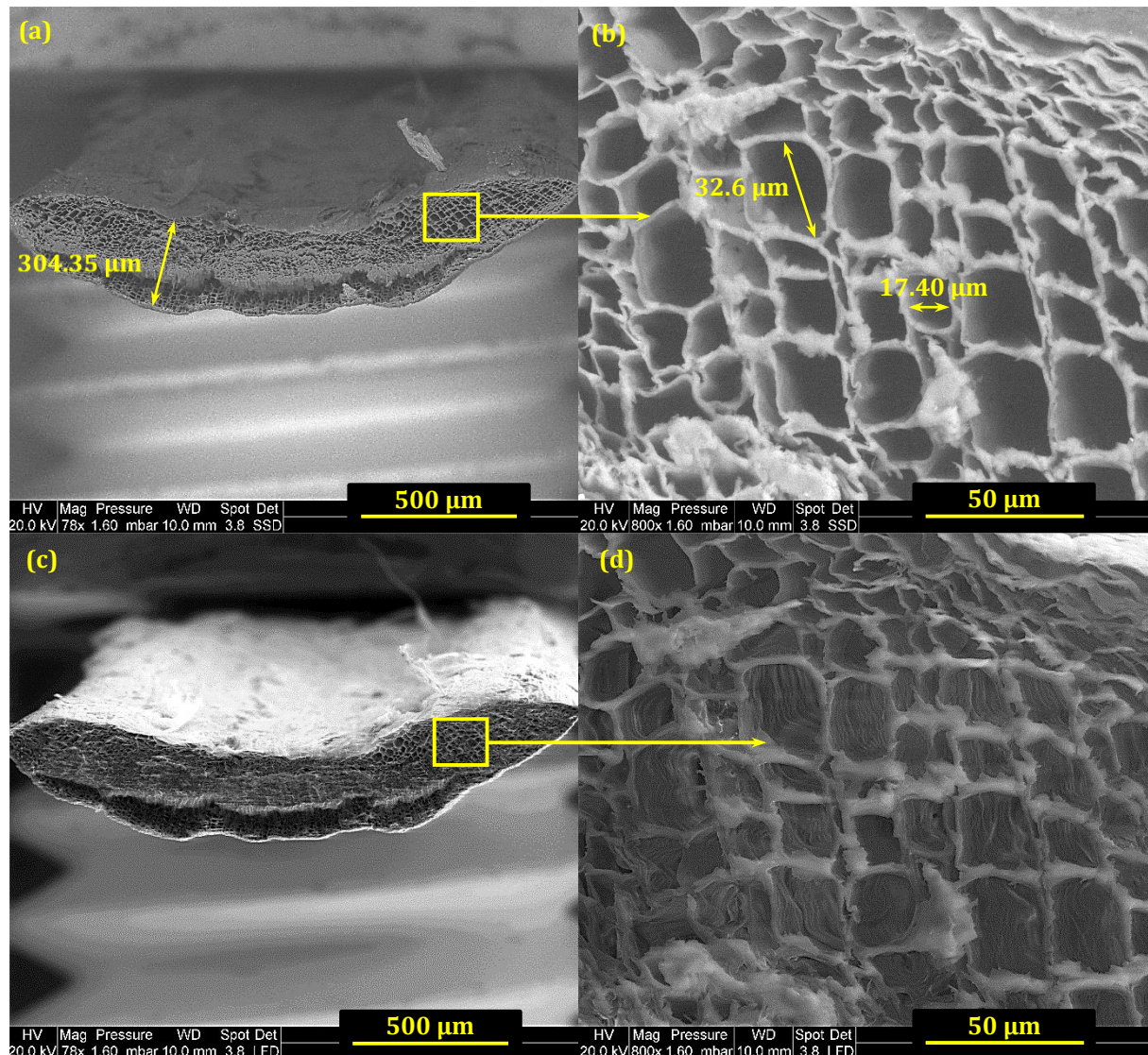


Figure III-5. Coupe transversale de la particule végétale de lin observée au MEB à différentes échelles : (a, b) images de types BSE et (c, d) images de types SE.

Par ailleurs, la coupe longitudinale de la particule végétale de lin et son spectre EDS (Analyse dispersive en Energie ou Energy Dispersive Spectroscopy en Anglais) ont été également obtenus (Figure III-6). On voit sur cette figure que la structure tubulaire de cette particule végétale est organisée en capillaires parallèles orientés dans le sens de croissance de la plante. De plus, ces capillaires sont en communication entre eux grâce à de petites cellules minuscules appelées "ponctuations" comme il est illustré et entouré en rouge dans la Figure III-6.

D'autre part, le spectre EDS montre que cette particule végétale de lin est composée principalement d'une teneur massique de 56 % et de 40 % de Carbone et d'Oxygène, respectivement. Cependant, on doit noter que ce dispositif n'a pas pu détecter l'hydrogène (H) puisque ce dernier ne possède qu'un seul électron.

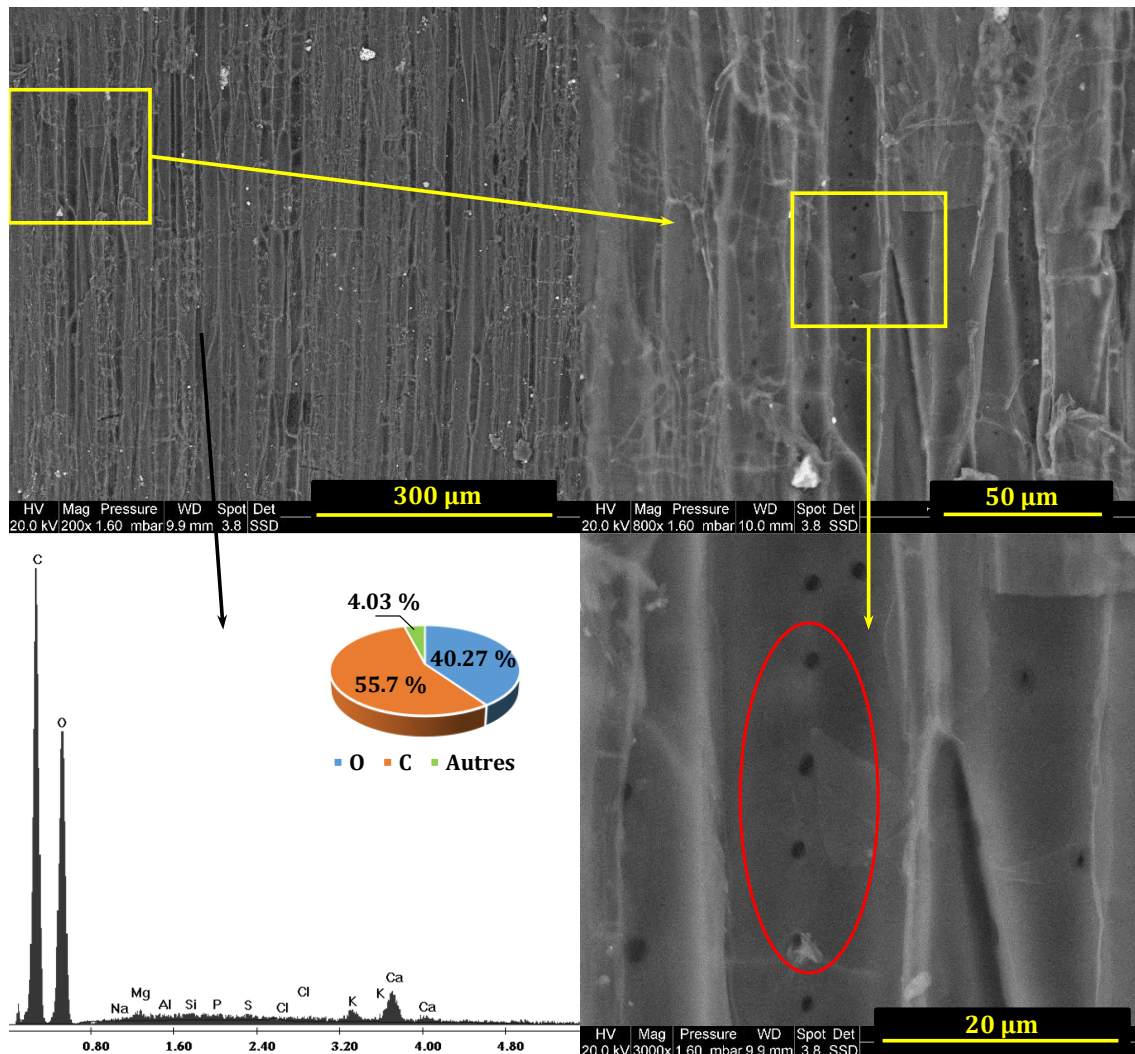


Figure III-6. Coupe longitudinale de la particule végétale de lin observée au MEB à différentes échelles et son spectre EDS.

III.3.2. Analyse des images au MEB du béton de lin

La Figure III-7 illustre les observations au MEB effectuées sur le béton de lin. Cette vue d'ensemble montre une adhérence moyenne entre les particules végétales de lin et le liant Tradical PF70. Cependant, quelques fissures peuvent être observées au niveau de l'interface de connexion anas/liant. De plus, on remarque la présence de petits éclats de liant sur la surface des particules végétales de lin. Ces éclats provoquent des micros-fissures et le déchirement de la particule végétale, ce qui peut contribuer à la formation des fissures que l'on peut clairement observer sur l'interface liant/particule. Cela peut s'expliquer, d'une part,

par la contamination des particules végétatives par le liant [146–148]. Des chercheurs [146,147] ont montré que la surface des particules végétales était recouverte de phases riches en CaO. De nombreuses particules de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de forme plate et un gel riche en CaO ont été distinguées. En effet, ces particules végétales telles que les anas de chanvre et de lin ont la capacité de piégeage du calcium dans leur structure pectinée et de former ensuite un gel riche en CaO à la surface des particules. D'autre part, les fissures observées peuvent également être attribuées à la nature hydrophile des particules végétales [149,150]. Ces dernières présentent une capacité d'adsorption élevée qui atteint jusqu'à trois fois leur poids en 48 heures [109,117]. Ce caractère hydrophile des anas de lin permet d'extraire l'eau du liant existant pour son hydratation. Cela peut également provoquer le gonflement de ces anas en cas d'humidification ou leur rétrécissement en cas de séchage. Ces deux phénomènes peuvent donc être à l'origine des micro-fissures observées aux interfaces liant/anas de lin.

Le spectre EDS réalisé sur la surface contenant du liant et des particules végétales est également présenté dans la Figure III-7. En plus du Carbone et de l'Oxygène, on remarque également la présence du calcium. Ce dernier provient du liant utilisé pour la formulation de ce matériau (Tradical PF70).

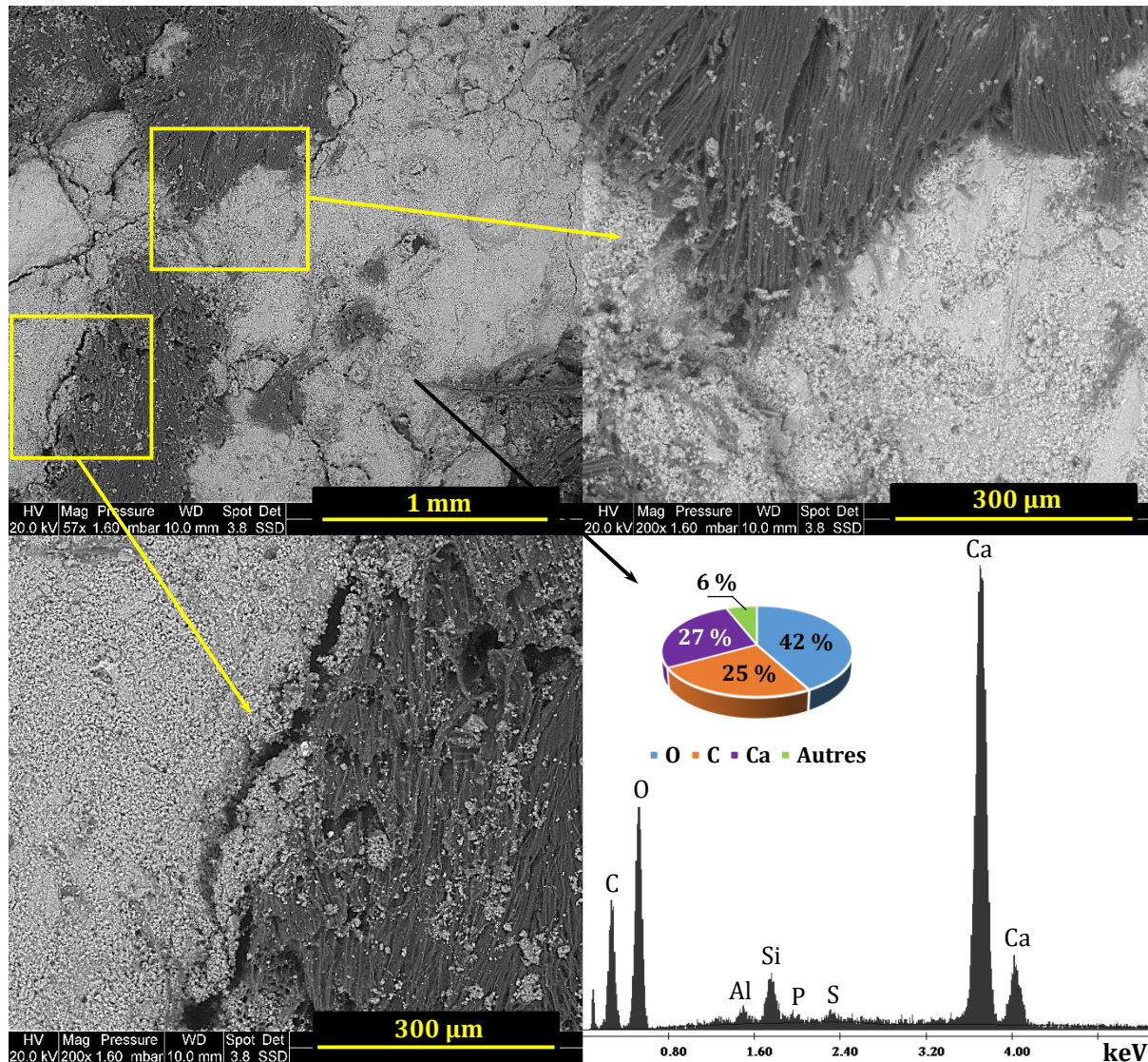


Figure III-7. Images au MEB du béton de lin de type SE : adhérence matrice/particule végétale.

III.4. Effet de la teneur et de la taille des particules végétales sur les propriétés du béton de lin.

III.4.1. Propriétés physiques

a) Masse volumique

Pour chaque formulation du béton de lin, trois mesures de masse volumique ont été effectuées après la stabilisation de masse des échantillons. Les masses volumiques moyennes et leurs écarts-types sont présentés dans la Figure III-8. Tout d'abord, la masse volumique de ce matériau fabriqué avec la formulation standard (E/L de 1,45 et G/L de 0,42) est d'environ 550 kg/m^3 . A base de ces résultats (Figure III-8), on constate que la taille des particules végétales n'a pas affecté la masse volumique du béton de lin. Ce dernier a le même ordre de

grandeur pour toutes les tailles de particules végétales utilisées. En revanche, cette propriété a été significativement affectée par la quantité d'anas de lin utilisés pour la formulation du matériau en question. Elle diminue avec l'augmentation de la teneur en anas de lin. Par exemple, dans le cas de la taille en vrac, la masse volumique passe de 638 kg/m^3 à 468 kg/m^3 pour les formulations F1-1 et F1-3, respectivement. Cela est dû à la densité des particules végétales qui est très faible par rapport à celle du liant. Cette propriété a fait du béton de lin un matériau léger et poreux destiné à être utilisé dans le domaine de la construction comme étant isolant.

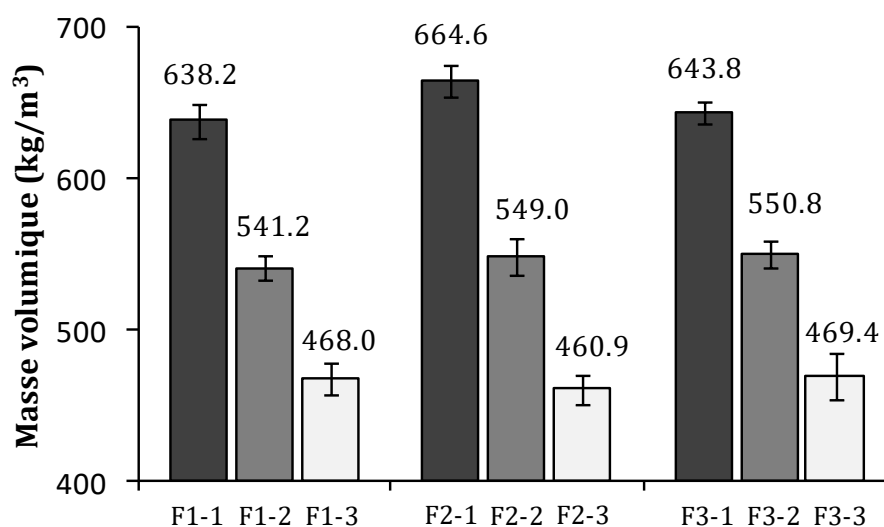


Figure III-8. Masse volumique des différentes formulations du béton de lin.

b) Porosité à l'eau

Les propriétés hygrothermiques et microstructurales des matériaux cimentaires sont étroitement liées entre elles. Connaître la porosité totale de nos matériaux peut donc nous être utile pour d'éventuelles explications et interprétations de nos résultats. La porosité à l'eau du béton de lin a été mesurée sur trois échantillons de chaque formulation afin d'assurer la répétabilité des mesures. La caractérisation a été effectuée suivant la procédure de l'AFPC-AFREM [133]. Les résultats présentés dans la Figure III-9 sont donc la moyenne des différentes mesures effectuées. La porosité moyenne des bétons de lin étudiés varie entre 72 % et 76 %. Ces valeurs sont en accord avec la porosité du béton de chanvre trouvée dans la littérature [38]. En général, nous avons constaté que la taille des anas de lin n'affecte pas la porosité du béton de lin. Cependant, une légère augmentation de la porosité de ce matériau par rapport à la teneur en anas de lin a été observée. En effet, cette augmentation peut être clairement mise en évidence entre les bétons de lin contenant 11,5% d'anas de lin et ceux contenant 17,5% d'anas de lin. Cela est dû à la porosité élevée des particules de lin (comme le

montrent les images au MEB de la Figure III-5) et à l'augmentation des vides intergranulaires. Ces résultats sont en accord avec les masses volumiques présentées en haut.

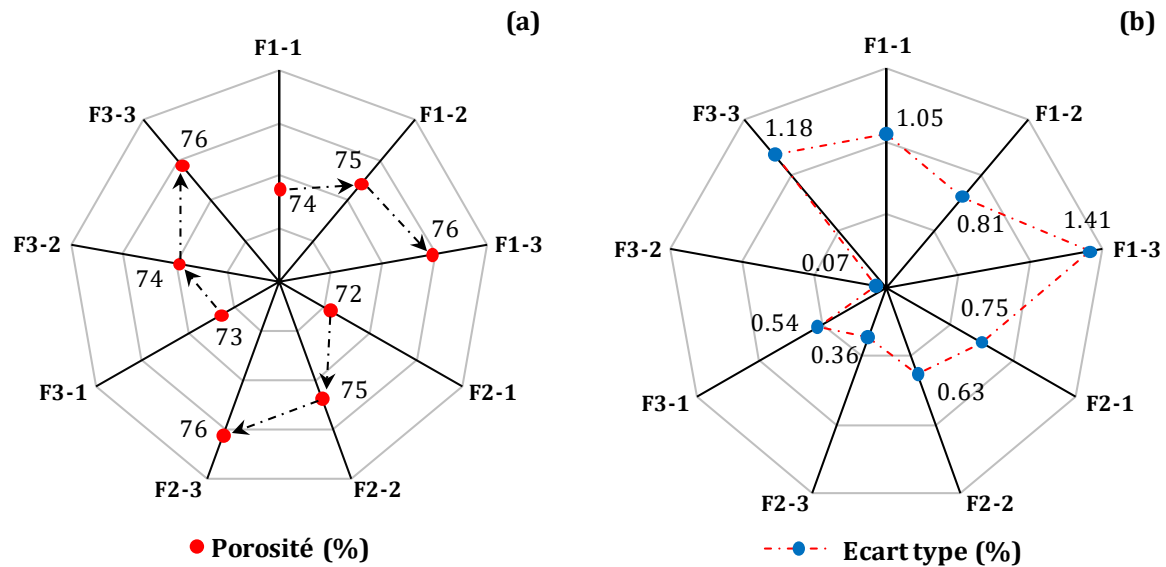


Figure III-9. (a) porosité totale des différentes formulations du béton de lin et (b) leurs écarts types.

III.4.2. Propriétés hygrothermiques

Le béton de lin et le béton de chanvre sont des matériaux très poreux qui se composent généralement de trois phases différentes, à savoir : la phase liquide (eau), la phase solide (liant) et la phase gazeuse constituée d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Dans cette partie, une campagne expérimentale de caractérisation hygrothermique a été menée afin de remonter aux propriétés de ce matériau. Les propriétés concernées sont la conductivité thermique, les isothermes d'adsorption/désorption, la capacité de stockage d'humidité et la capacité de tampon à l'humidité (MBV).

a) Conductivité thermique

Comme nous l'avons présenté en haut, le béton de lin possède une porosité totale très élevée. Cela peut donc être une indication sur sa capacité isolante, d'où l'intérêt de mesurer sa conductivité thermique. Cette propriété a été mesurée à 23°C à l'aide du dispositif λ -meter Ep500e disponible au LaSIE. Ce dernier se base sur la méthode normalisée de la plaque chaude gardée.

Afin de garantir une bonne répétabilité des résultats, trois mesures ont été effectuées pour chaque formulation. Les conductivités thermiques moyennes et leurs écarts-types sont

présentés dans la Figure III-10. La conductivité thermique moyenne du béton de lin "standard" est d'environ 100 mW/(m.K), ce qui reste bien inférieur à celle d'autres matériaux de construction, tels que le béton à base de ciment [39,40]. Cette valeur confirme la qualité d'isolation du béton de lin. Par ailleurs, il est à noter que la quantité d'anas de lin affecte la conductivité thermique du béton de lin ; cette dernière diminue avec l'augmentation de la quantité des particules végétales utilisées. En effet, les conductivités thermiques des formulations F2-1 (11,5% d'anas de lin), F2-2 (14,5% d'anas de lin) et F2-3 (17,5% d'anas de lin) sont respectivement de 127, 104 et 84 mW/(m.K). En fait, le liant est plus conducteur que les anas de lin et donc, plus le dosage du liant augmente, plus les propriétés d'isolation thermique du matériau diminuent. Cette diminution s'explique également par la porosité du béton de lin qui augmente avec la quantité d'anas de lin (Figure III-8 et Figure III-9). En effet, la conductivité thermique de l'air (environ 20 mW/(m.K)) est inférieure à celle du liant et des anas de lin. Cela provoque l'amortissement de la transmission de la chaleur, ce qui se traduit par conséquent, par une diminution de la conductivité thermique du matériau.

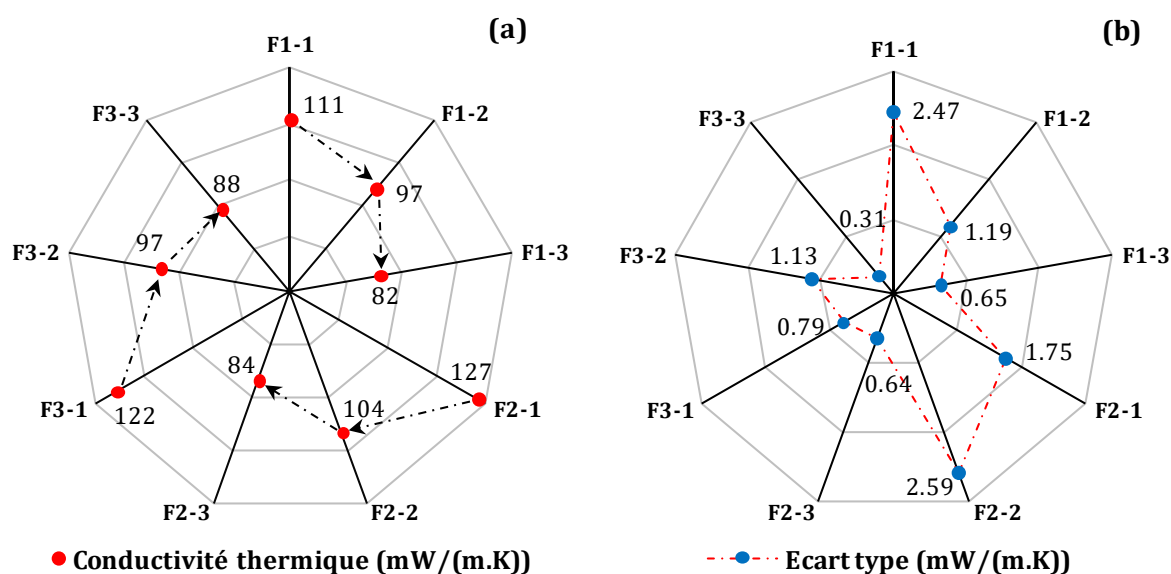


Figure III-10. (a) Conductivité thermique des différentes formulations du béton de lin et (b) écarts types correspondant.

De plus, la taille des anas de lin affecte légèrement la conductivité thermique du béton de lin. Un bon accord par rapport aux résultats de porosité et de masse volumique a été observé, sauf pour les formulations F1-1, F2-1 et F3-1, où la conductivité thermique augmente significativement avec la taille des anas de lin (environ 14% pour F2-1 et 10% pour F3-1, par rapport à F1-1 (voir Figure III-10)). Cela pourrait être dû à la distribution aléatoire des particules végétales utilisées pour cette formulation (F1-1 : anas de lin en vrac) qui engendre

une microstructure complexe. Cela implique donc une distribution et une orientation aléatoire des particules végétales avec des tailles différentes dans le matériau, ce qui donne par conséquent, une microstructure très complexe. Une telle structure permet de ralentir et d'amortir la transmission de la chaleur puisque cette dernière dépend fortement de l'orientation et de l'arrangement des particules végétales dans la matrice [5]. Tandis que dans les formulations F2-1 et F3-1, les tailles utilisées sont respectivement moyennes (TM) et grandes (TG), cela dit, une distribution des particules un peu mieux arrangée et donc une microstructure un peu moins complexe, ce qui favorise la cinétique du transfert de la chaleur.

b) Isothermes d'adsorption/désorption

Les isothermes d'adsorption/désorption de vapeur d'eau, représentent l'évolution de la teneur en eau d'un matériau en équilibre avec l'humidité relative de l'air qui varie de 0 à 100% pour une température donnée. La mesure de ces isothermes de sorption a été réalisée en se basant sur une méthode gravimétrique en utilisant le dispositif proUmid disponible au LaSIE. L'avantage de ce dispositif réside dans le fait qu'il permet de caractériser jusqu'à 23 échantillons à la fois en une durée très réduite. Avant de commencer la caractérisation, les échantillons cubiques de 1 cm de côté ont été séchés dans un four à 40°C pendant 24 heures puis dégazés sous vide d'air dans l'intention de compléter le séchage.

Pour assurer une meilleure représentativité et une bonne lisibilité des résultats, nous avons présenté les isothermes d'adsorption/désorption des formulations ayant la même taille d'anas de lin et une teneur en agrégats végétaux variable dans des courbes séparées (Figure III-11 (a), Figure III-11 (b) et Figure III-11 (c)). Ensuite, un exemple de comparaison entre les formulations F1-3, F2-3 et F3-3 (avec la même teneur en anas de lin de 17,5%) a été présenté dans la Figure III-11 (d) afin de montrer l'effet de la taille des anas de lin sur l'évolution des isothermes d'adsorption/désorption.

Tout d'abord, on peut clairement remarquer sur la Figure III-11 (a), Figure III-11 (b) et Figure III-11 (c) que la teneur en anas de lin a une influence non négligeable sur les teneurs en eau maximales adsorbées. Pour une même humidité relative, plus le rapport G/L augmente, plus la teneur en eau à l'équilibre est élevée. Cette observation est clairement visible à des niveaux d'hygrométries élevés ($HR > 90\%$). Par exemple, à 94% d'humidité relative, une augmentation de la teneur en humidité de 26% pour F3-3 a été constatée par rapport à F3-1. Cela est dû à la forte capacité d'absorption des particules végétales de lin, qui peuvent absorber jusqu'à 3 fois leurs poids en 48 heures. Cela dit, la

capacité d'absorption du béton de lin dépend fortement de la quantité d'anas de lin utilisée. Enfin, comme le montre la Figure III-11 (d), la taille des anas de lin semble ne pas avoir d'influence significative sur les isothermes de sorption,

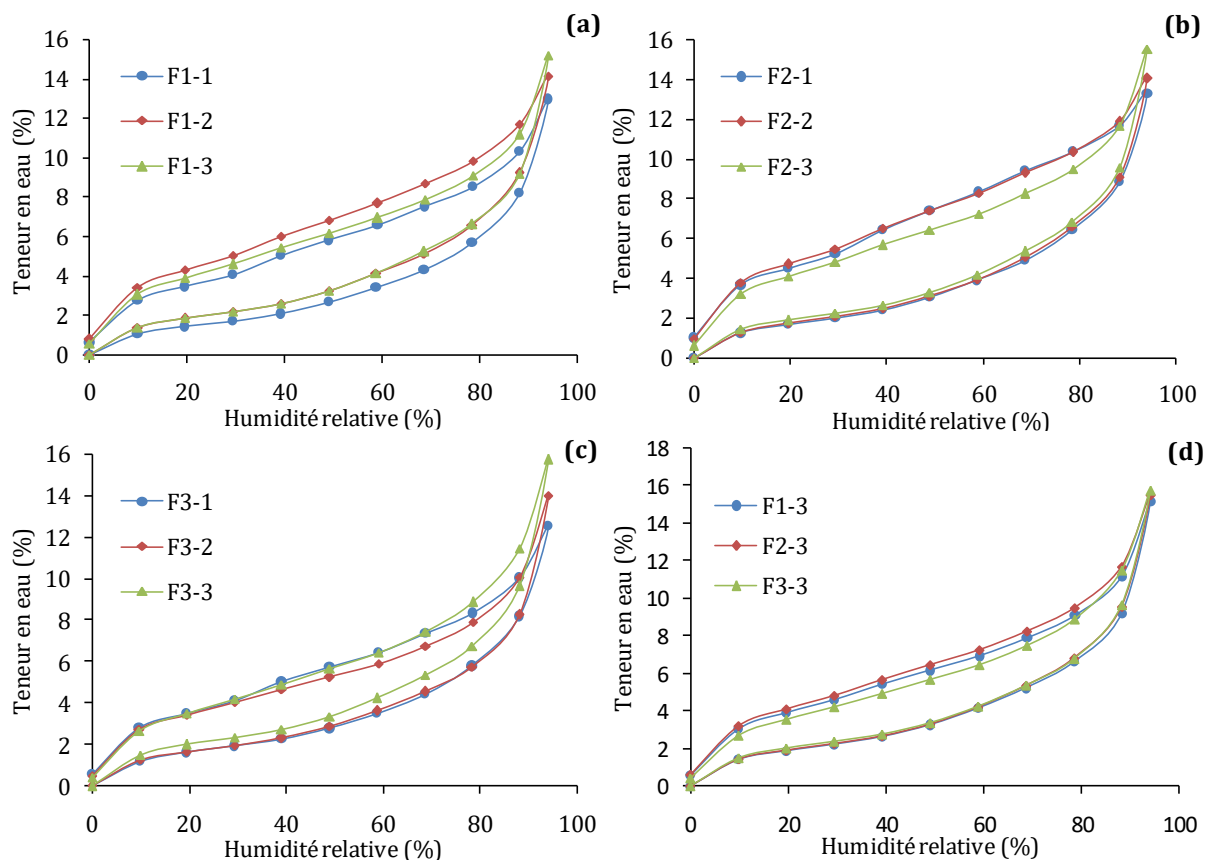


Figure III-11. (a), (b) et (c) montrent l'effet de la teneur en anas de lin sur les isothermes d'adsorption/désorption du béton de lin, (d) montre l'effet de la taille des anas de lin sur les isothermes d'adsorption/désorption

De plus, nous avons observé que la surface de la boucle d'hystérésis durant la phase de désorption varie d'une manière aléatoire pour les différents bétons de lin étudiés. Cela est dû à la complexité de la microstructure de ces matériaux, qui régit le phénomène d'hystérésis. En effet, les anas de lin augmentent la porosité inter particulaire du béton de lin, ce qui modifie la microstructure et la distribution de la taille des pores du matériau. Donc, dans le cas où la distribution des petits pores domine la microstructure du matériau, l'eau peut se retrouver piégée à l'intérieur à cause de l'effet « bouteille d'encre » et par conséquent, la boucle d'hystérésis sera plus large. En effet, lors de la désorption, la vidange des grands pores ne commence qu'après la vidange des petits pores sous des pressions capillaires relativement élevées. Donc, dans le cas où la pression capillaire nécessaire pour évacuer l'eau n'est pas

atteinte, cette eau peut rester piégée à l'intérieur des petits pores et empêche la vidange des grands pores, ce qui explique la différence entre les courbes d'hystérésis observées.

Par ailleurs, ces isothermes de sorption peuvent être modélisées en utilisant des modèles de prédiction qui existent dans la littérature tels que le modèle GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) ou GDW (Generalised D'Arcy and Watt). Dans notre cas, nous avons choisi de modéliser les isothermes des formulations F2-1, F2-2 et F3-2 en utilisant le modèle GAB. En effet, ce modèle a été développé par Guggenheim, Anderson et de Boer en corrigeant un autre modèle développé en 1938 par Brunauer, Emmett et Teller (BET) [151]. Initialement, ce dernier ne s'applique que dans le domaine hygroscopique où l'humidité relative est inférieure à 50%. Pour cela, GAB ont introduit un coefficient correcteur K tenant compte de la chaleur adsorbée de toutes les couches moléculaires afin d'étendre son utilisation sur toute la gamme d'humidité relative [61]. L'objectif de cette simulation est d'enrichir les bases de données afin de faciliter la reproduction de ces isothermes pour les chercheurs qui souhaitent modéliser le comportement hygrothermique du béton de lin. Cela permet donc de reproduire plus finement et avec précision les résultats expérimentaux. L'expression du modèle GAB est donnée sous la forme suivante (1):

$$U = \frac{m \cdot C \cdot K \cdot HR}{(1 - K \cdot HR)(1 - K \cdot HR + K \cdot C \cdot HR)} \quad (1)$$

U est la teneur en eau à l'équilibre, ϕ est l'humidité relative, m est la capacité de la monocouche, C : est une constante reliée à la sorption dans la première couche, K est une constante reliée à l'adsorption multicouches.

Le Tableau III-2 présente les paramètres d'ajustement du modèle GAB pour les trois formulations du béton de lin. Ces paramètres ont été ajustés en utilisant les données expérimentales des trois formulations choisies.

Tableau III-2. Paramètres d'ajustement du model GAB pour les trois formulations modélisées.

Formulations	Model	m	C	K	R ²
F12		0.01826	24.19	0.9243	0.9963
F22	GAB	0.01798	18.07	0.9258	0.9968
F32		0.01496	52.88	0.9442	0.9951

La Figure III-12 (a), Figure III-12 (b) et Figure III-12 (c) montrent les isothermes d'adsorption de la vapeur d'eau obtenues expérimentalement et numériquement en utilisant le modèle GAB. Il est à noter que ce modèle a permis de reproduire finement et avec précision les isothermes d'adsorptions des trois formulations du béton de lin. Le coefficient de corrélation minimale entre les données expérimentales et les courbes d'ajustement est de 0.995, ce qui confirme la pertinence des résultats obtenus.

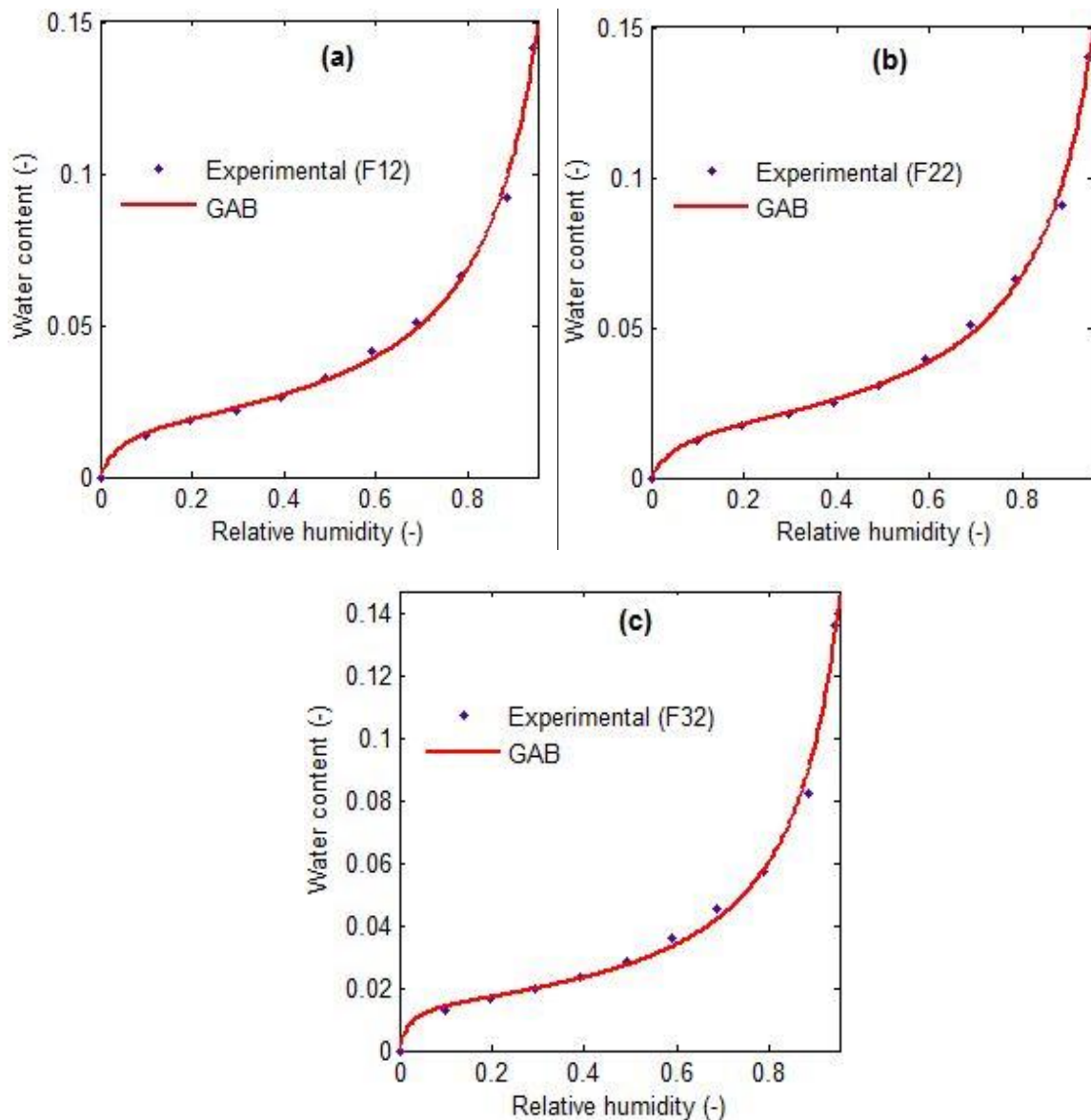


Figure III-12. Isothermes d'adsorption du béton de lin obtenues par le modèle GAB : (a) F12, (b) F22 and (c) F32.

c) Capacité de stockage d'humidité

Les isothermes d'adsorption présentées en haut (Figure III-11) nous permettent également de remonter à la capacité de stockage d'humidité des matériaux. Cette dernière constitue l'un des

paramètres important permettant d'alimenter les modèles de prédiction du comportement hygrothermique. En effet, cette propriété représente la capacité d'un matériau à adsorber et à libérer de l'humidité lorsque les conditions d'humidité de l'environnement sont modifiées [6]. Elle est déduite en calculant la pente des isothermes de sorption comme il est montré par l'expression (2):

$$C_m = \frac{du}{dHR} \quad (2)$$

Avec : C_m est la capacité de stockage d'humidité [-], u est la teneur en eau du matériau [kg/kg] et HR l'humidité relative [%].

La Figure III-13 (a), Figure III-13 (b) et Figure III-13 (c) montrent l'effet de la teneur en anas de lin sur la capacité de stockage d'humidité du béton de lin. (d) montre l'effet de la taille des anas de lin sur la capacité de stockage d'humidité.

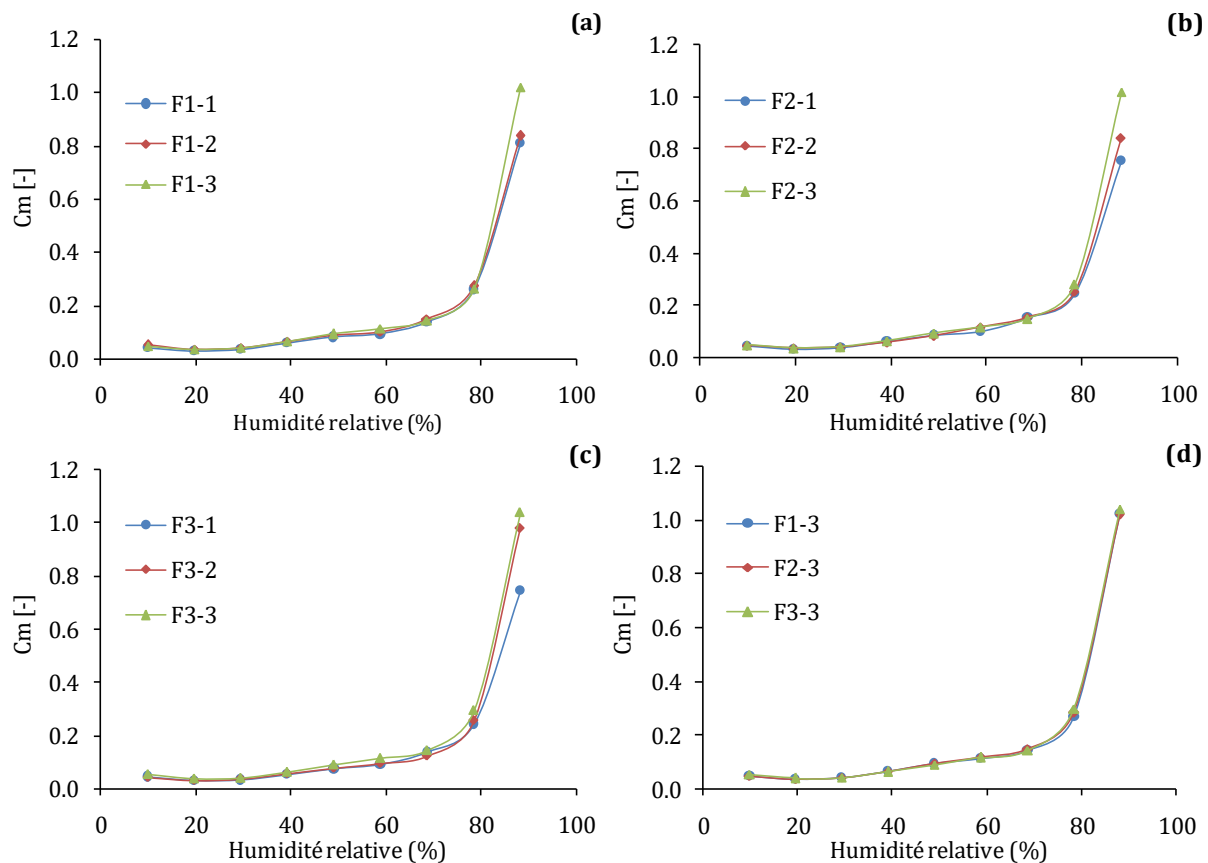


Figure III-13. (a), (b) et (c) montrent l'effet de la teneur en anas de lin sur la capacité de stockage d'humidité du béton de lin, (d) montre l'effet de la taille des anas de lin sur la capacité de stockage d'humidité.

A base de ces résultats, nous avons remarqué que lorsque l'humidité relative est inférieure à 80 % (faible humidité relative), la teneur et la tailles des anas de lin n'ont pratiquement pas

d'influence sur la capacité de stockage d'humidité. Cependant, pour des hygrométries élevées ($HR > 80\%$), la capacité de stockage d'humidité augmente avec l'augmentation des particules végétales dans le matériau.

La Figure III-13 (d) montre l'effet de la taille des anas de lin sur la capacité de stockage de l'humidité du béton de lin. Aucun changement entre les différentes formulations n'a été constaté. En outre, nous pouvons également observer que, indépendamment de la taille et de la teneur en anas de lin, la capacité de stockage d'humidité du béton de lin augmente significativement au-delà de 80 % d'humidité relative, d'où l'importance de prendre en compte cette évolution lors de la modélisation des transferts hygrothermiques.

d) Capacité de tampon à l'humidité (MBV)

La capacité de tampon à l'humidité caractérise la pouvoir d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air avoisinant. Il indique la quantité d'eau adsorbée ou libérée par un matériau qui est soumis à une variation d'humidité relative extérieur. La mesure de ce paramètre a été faite conformément au projet Nordtest qui propose de conditionner les échantillons dans une enceinte climatique pendant 8 heures à 75 % d'humidité relative, s'ensuit de 16 heures à 33 %, en maintenant la température constante à 23°C. Les échantillons caractérisés ont 10 cm de côté et 5 cm d'épaisseur. La Figure III-14 montre l'enceinte climatique utilisée au LaSIE pour la mesure de cette propriété.



Figure III-14. Photo de l'enceinte climatique « Climats » disponible au LaSIE.

En effet, les matériaux biosourcés permettent de réguler naturellement le taux d'humidité dans l'ambiance habitable. Pour cet effet, nous avons mesuré la capacité de tampon à l'humidité des différentes formulations du béton de lin. La Figure III-16 présente la moyenne des mesures MBV de chaque formulation. D'abord, il est à noter que les résultats obtenus sont en accord avec la littérature [117]. De plus, le MBV du béton de lin est supérieur à 2 pour toutes les formulations, ce qui lui permet d'être un excellent régulateur d'humidité d'après la classification proposée par le projet Nordtest (voir Figure III-15).

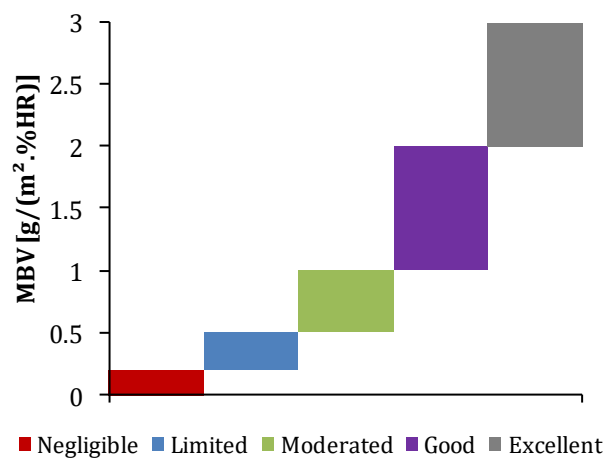


Figure III-15. Classes des valeurs de tampon à l'humidité proposées par le projet Nordtest.

D'une part, nous constatons que la capacité de tampon à l'humidité du béton de lin augmente avec la teneur en particule végétale dans le matériau. Cela s'explique par la forte capacité de régulation des particules végétales par adsorption et restitution d'humidité relative en cas de surplus ou de manque, respectivement. Par conséquent, l'augmentation du rapport G/L conduit à une valeur de MBV plus élevée.

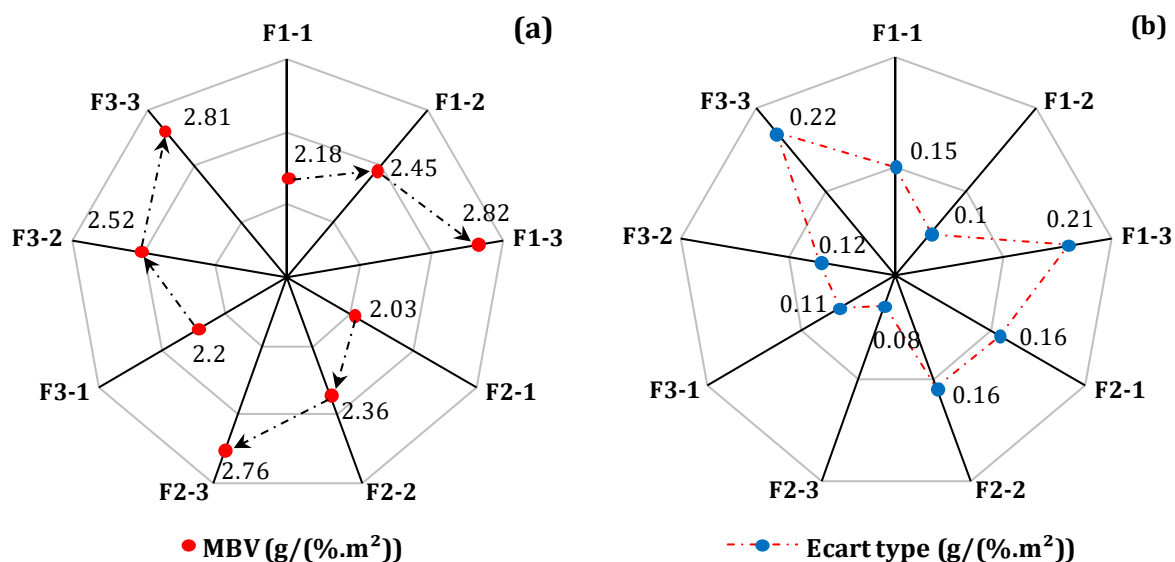


Figure III-16. (a) MBV des différentes formulations du béton de lin et (b) leurs écarts types.

D'autre part, nous remarquons également que cet indice MBV dépend de la taille des particules végétales. Les matériaux formulés avec des anas de lin de taille « grande » ont une capacité de tampon d'humidité légèrement supérieur à ceux de taille moyenne. Par exemple, les indices MBV des formulations F3-1, F3-2 et F3-3 ayant des anas de lin de taille « grande » sont 2.20, 2.52, et 2.81, respectivement, tandis que ceux des formulations F2-1, F2-2 et F2-3 ayant une taille d'anas de lin « moyenne » sont de 2.03, 2.36 et 2.76, respectivement. Comme nous l'avons expliqué en haut, les particules végétales affectent significativement la capacité d'adsorption du matériau, cela revient à dire, qu'un matériau contenant des particules végétales de taille et de surface spécifique supérieur implique une capacité de tampon à l'humidité légèrement plus élevée.

III.4.3. Propriété mécanique

Les matériaux biosourés sont conçus pour être utilisés dans le domaine de la construction en tant qu'isolant et non pas en tant qu'éléments porteurs, car ils présentent généralement un comportement mécanique très faible par rapport aux bétons classiques. Cependant, un minimum de résistance à la compression reste quand même nécessaire afin que le matériau

puisse supporter son poids propre lors de la mise en œuvre. Pour cela, nous avons décidé de mesurer la résistance à la compression des différentes formulations du béton de lin afin de pouvoir conclure l'effet de la taille et de la teneur en particules végétales sur cette propriété mécanique.

a) Résistance à la compression

La caractérisation mécanique du béton de lin a été effectuée en se référant à des travaux de la littérature [107,130,136] et aux normes EN 826 [152] et ASTM C109 [153]. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure III-17. La résistance à la compression des bétons de lin étudiés se situe entre 0.6 et 1.2 MPa, ce qui est suffisant pour une utilisation comme matériau isolant dans la construction. A base de ces résultats, nous pouvons clairement remarquer que la résistance à la compression du béton de lin est étroitement liée à sa teneur en particule végétale. Plus la teneur en particules végétales augmente, plus la résistance à la compression diminue. Par exemple, les résistances à la compression des formulations F2-1 (ayant 11.5% d'anas de lin), F2-2 (ayant 14.5% d'anas de lin) et F2-3 (ayant 17.5% d'anas de lin) étaient respectivement de 0.9, 0.7 et 0.6 MPa. Cela s'explique principalement par la dépendance entre la porosité inter granulaire et la teneur en particules végétales dans le matériau comme nous l'avons vu dans la section (III.4.1. b). En effet, une telle augmentation du volume des vides provoque la fragilisation du comportement mécanique du matériau et par conséquent, sa résistance à la compression diminue. De plus, l'augmentation de la teneur en particules végétales implique l'augmentation de leur surface spécifique dans le matériau, ce qui provoque également une faible liaison liant/agrégat [154] qui se traduit au final par une faible résistance à la compression du matériau en question.

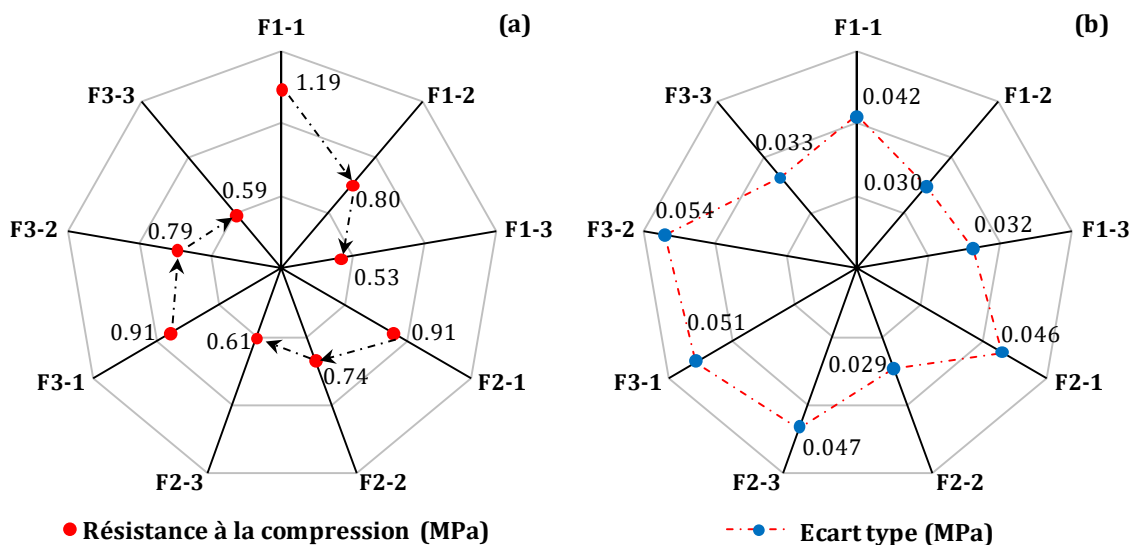


Figure III-17. (a) Résistance à la compression des différentes formulations du béton de lin, (b) leurs écarts types.

D'autre part, l'effet de la taille des particules végétales sur la résistance à la compression semble négligeable et peu prononcé, sauf pour la formulation F11 où la résistance à la compression est plus importante que les autres formulations. Cela peut être dû à l'orientation des particules végétales dans le sens qui favorise la résistance à la compression du matériau.

En général, la résistance à la compression recherchée dépend de l'application et de la destination du matériau dans le bâtiment. Par exemple, l'application du matériau pour les toitures exige une teneur élevée en particules végétales et une faible quantité de liant. Dans ce cas, le matériau aura une bonne isolation thermique avec une faible résistance à la compression. La formulation des dalles contient un faible dosage en particules végétales avec une quantité élevée de liant, ce qui lui confère une bonne résistance mécanique mais une mauvaise conductivité thermique. Entre ces deux limites, on trouve la formulation des murs qui équilibre entre les deux propriétés.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une investigation expérimentale de caractérisation du comportement thermo-hydro-morphique et mécanique de béton de lin. Le but consiste à mettre en évidence l'effet de la taille et de la teneur en particules végétales sur les propriétés fonctionnelles des matériaux biosourcés. Pour ce faire, 09 formulations ont été caractérisées dont les pourcentages massiques en anas de lin et leurs tailles ont été variables. Les conclusions suivantes sont tirées de la présente étude :

- Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont montré que les particules végétales de lin ont une microstructure complexe et très poreuse. Ces images microscopiques ont montré également une adhésion moyenne entre les particules végétales et la matrice solide. De plus, des éclats de liant ont été localisés sur la surface des particules végétales. Ces derniers peuvent être à l'origine de certaines fissures remarquées sur l'interface liant/anas de lin. L'incorporation de ces particules végétales dans un liant à base de chaux a permis d'obtenir un matériau léger avec de bonnes propriétés hygrothermiques.
- La microstructure et le comportement du béton de lin sont régis par la quantité et la taille des anas de lin qui le composent. Nous avons montré qu'une augmentation de la quantité de ces particules végétales entraîne, d'une part, une augmentation de la porosité totale à l'eau, de la capacité de tampon à l'humidité et de la teneur en eau

maximale absorbée, et d'autre part, une réduction de la masse volumique, de la conductivité thermique et de la résistance à la compression.

- Concernant les propriétés d'isolation de ce matériau, nous avons conclu que le béton de lin a une faible conductivité thermique comprise entre 82 et 127 mW/(m.K). En fait, plus la teneur en anas de lin est élevée, plus la conductivité thermique est faible. De plus, cette propriété dépend légèrement de la taille des anas de lin. Cependant, une forte dépendance est attribuée plutôt à leur disposition et leur arrangement dans le matériau. Une taille de particule homogène implique une distribution légèrement meilleure et par conséquent, la microstructure sera moins complexe. Cela favorise la cinétique du transfert de chaleur et réduit les propriétés isolantes du matériau.
- Les isothermes de sorption des différentes formulations ont montré la grande capacité d'adsorption du béton de lin. Pour des humidités relatives élevées ($HR > 90\%$), la teneur en eau maximale adsorbée et la capacité de stockage d'humidité augmentent avec la quantité d'anas de lin, tandis que la taille des particules végétale n'a montré aucune influence. De plus, les courbes des isothermes de sorption ont été modélisées avec précision (par le modèle GAB) avec un coefficient de corrélation minimum de 0,995. Cela permet de reproduire avec précision les résultats expérimentaux pour pouvoir alimenter les modèles de prédiction du comportement hygrothermique. En ce qui concerne le MBV, nous avons montré que ce dernier augmente avec la taille et le taux d'anas de lin dans le matériau. La formulation ayant la teneur la plus élevée en anas de lin et une taille plus importante a donné un excellent régulateur d'humidité avec un indice MBV maximal d'environ 2,8.
- La résistance à la compression du béton de lin est étroitement liée à la teneur en particules végétales dans le matériau. Une teneur en anas de lin élevée implique une augmentation de la porosité totale, ce qui se traduit finalement par de mauvaises performances mécaniques. De plus, les images au MEB ont montré qu'une augmentation de la surface spécifique des anas de lin dans le matériau est la cause d'une faible adhérence des fibres/liants et par conséquent, d'une faible résistance à la compression.

Nous avons vu que les matériaux biosourcés présentent des propriétés hygrothermiques prometteuses à l'état sain, ce qui permet de répondre parfaitement aux enjeux énergétiques et

environnementaux. Cependant, leur utilisation reste limitée en raison du manque de garantie et de base de données quant à l'évolution de leurs propriétés face aux conditions climatiques au cours de leur cycle de vie. Le chapitre qui suit tend à répondre à cette problématique en évaluant les propriétés physiques, thermiques, hydriques et mécaniques du béton de chanvre vis-à-vis du vieillissement accéléré. Cela permet d'une part, d'enrichir les bases de données en termes des propriétés vieilles, et d'autre part, de pouvoir mettre en évidence l'effet du vieillissement sur les propriétés fonctionnelles des matériaux biosourcés.

Chapitre IV : Effet du vieillissement accéléré sur le comportement thermo-hygro-morphique et mécanique des matériaux biosourcés : application sur le béton de chanvre

IV.1. Introduction

La forte consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre causées par le secteur du bâtiment ont un effet non négligeable sur l'environnement. Afin de répondre à ce constat alarmant, plusieurs travaux ont été réalisés sur des matériaux biosourcés issus de l'agriculture, de la sylviculture ou du recyclage tel que le béton de chanvre [63,155–159]. Ces matériaux, reconnus par leur faible impact environnemental et leurs propriétés hygrothermiques prometteuses [160,161], permettent d'assurer une meilleure qualité de l'air intérieur et un bon niveau de confort des occupants tout en répondant aux exigences de la réglementation environnementale Française actuelle (RE, 2020). Malgré cela, leur utilisation demeure limitée en raison du manque de base de données en termes de propriétés vieilles et du manque de garantie en termes de durabilité.

Ce chapitre contribue à répondre à cette problématique moyennant le développement d'une campagne expérimentale de caractérisation des principales propriétés fonctionnelles du béton de chanvre vieilli et non vieilli. Pour ce faire, trois protocoles de vieillissements accélérés ont été proposés et appliqués sur ce matériau à savoir : l'immersion/séchage, l'immersion/gel/séchage et l'humidification/séchage. Les échantillons ont été caractérisés au même temps dans le but de comparer les résultats et de pouvoir comprendre l'influence du vieillissement sur les propriétés du béton de chanvre. Cela permet également de mieux appréhender sa durabilité et ses mécanismes de dégradation.

Cette partie a été entreprise au Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) de La Rochelle Université, elle a consisté à étudier expérimentalement :

- L'évolution de la microstructure par des techniques d'imagerie (MEB et Keyence) ;
- L'évolution des propriétés physiques représentées par la masse volumique apparente et la porosité ouverte des échantillons ;

- L'évolution des propriétés thermiques et hydriques constituées par la conductivité thermique, la chaleur massique, la valeur tampon à l'humidité (MBV), la perméabilité à la vapeur d'eau, la profondeur de pénétration, les isothermes de sorption et la capacité de stockage d'humidité ;
- La propriété mécanique représentée par la résistance ultime à la compression ;
- L'évolution du pH et l'analyse chimique des solutions d'immersion ;
- L'analyse thermogravimétrique (ATG) qui permet de remonter à l'évolution de la perte de masse à hautes température et de mieux appréhender les phases de décomposition des composés des matériaux étudiés (vieillis et non vieillis) ;

Les trois protocoles de vieillissement accéléré que nous avons sélectionné pour cette étude sont les suivants :

- Cycles d'immersion/séchage pendant 40 jours ;
- Cycles d'immersion/gel/séchage pendant 42 jours ;
- Cycles d'humidification/séchage dans une enceinte climatique pendant 8 mois ;

Ces protocoles ont été explicitement détaillés dans le chapitre II.

Remarque : Une comparaison entre le béton de chanvre (matériau de référence) et le béton de lin a été rajouté dans ce chapitre sous forme de « remarques » afin de montrer les performances hygrothermiques du béton de lin.

IV.2. Effet du vieillissement accéléré sur les propriétés thermo-hydro-morphiques et mécanique du béton de chanvre

Dans cette partie, le but étant de mesurer les propriétés thermiques, hydriques, mécaniques et microstructurales du béton de chanvre de référence (sains) et vieilli. Ces propriétés sont liées entre elles et le vieillissement conduit, généralement, à une dégradation du matériau qui s'explique souvent par l'évolution de la microstructure. C'est donc cette dernière qui dicte en général la durabilité d'un matériau.

IV.2.1. Dégradation chimique et microstructurale

a) Caractérisation de la microstructure de la chènevotte et du béton de chanvre par un Microscope Electronique à Balayage en mode Environnementale (MEB-E)

Les observations au MEB en mode Environnemental effectuées sur une coupe transversale de la chènevotte vieillie et non vieillie (de référence) sont présentées dans la Figure IV-1. D'après cette figure, il est constaté que la microstructure de la chènevotte présente une structure tubulaire très complexe. Aussi, les pores sont de différentes tailles et distribués d'une manière très hétérogène. Ils peuvent être classés en trois catégories à savoir : vaisseaux principaux (vessels), vaisseaux secondaires (Woody fibre) et des cellules parenchymes (parenchyma cells) [5].

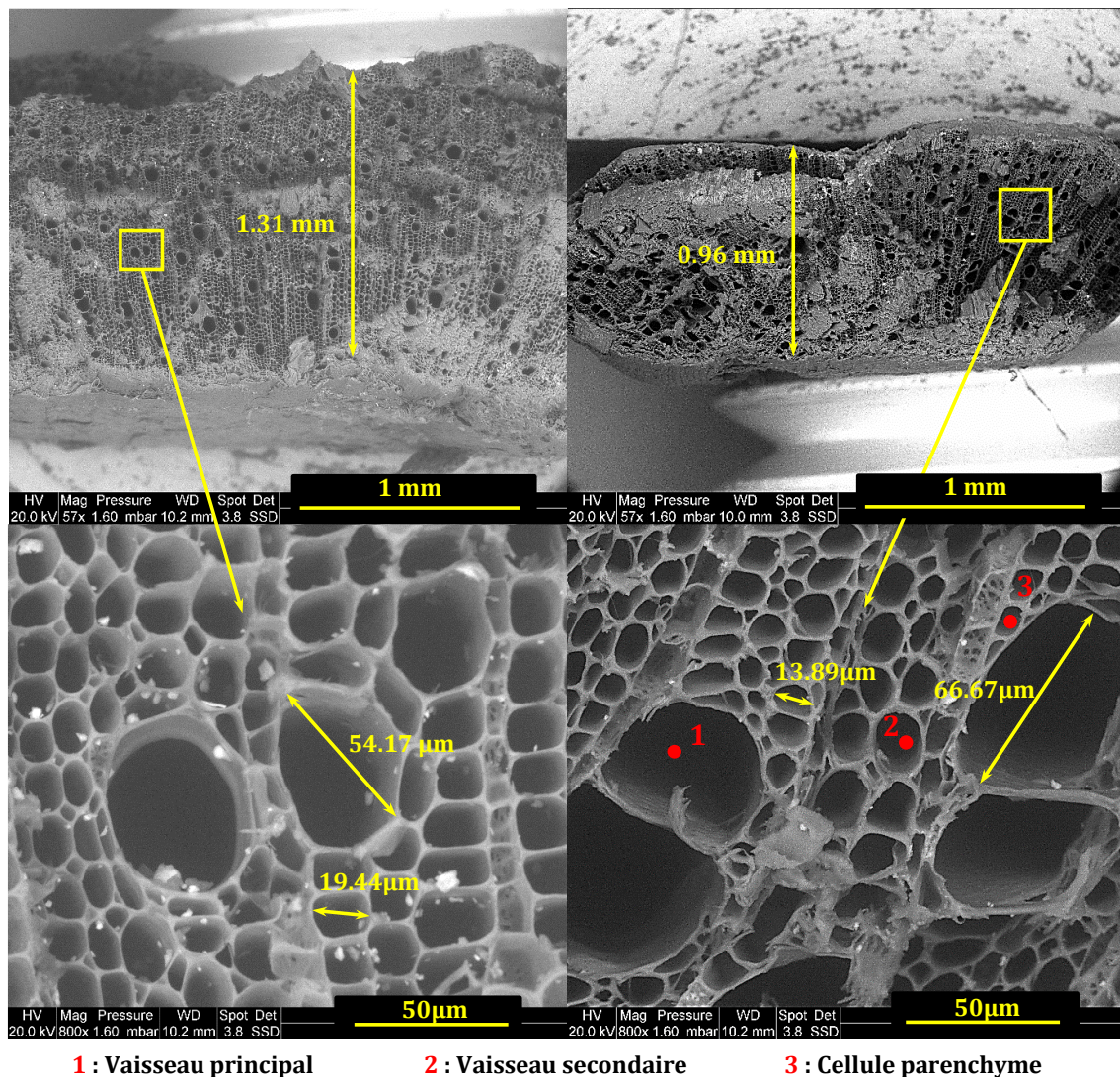


Figure IV-1. Images au MEB de la coupe transversale de la chènevotte : (à gauche) chènevotte non vieillie, (à droite) chènevotte vieillie.

Les observations au MEB illustrées par la même Figure IV-1 ont montré que le vieillissement n'a pas d'impact sur la microstructure de la chènevotte. Cependant, les observations effectuées sur la coupe longitudinale de ces particules végétales (voir Figure IV-2) ont montré que les parois formant les cellules de la chènevotte ont été perturbées dans les deux cas (vieilli et non vieilli).

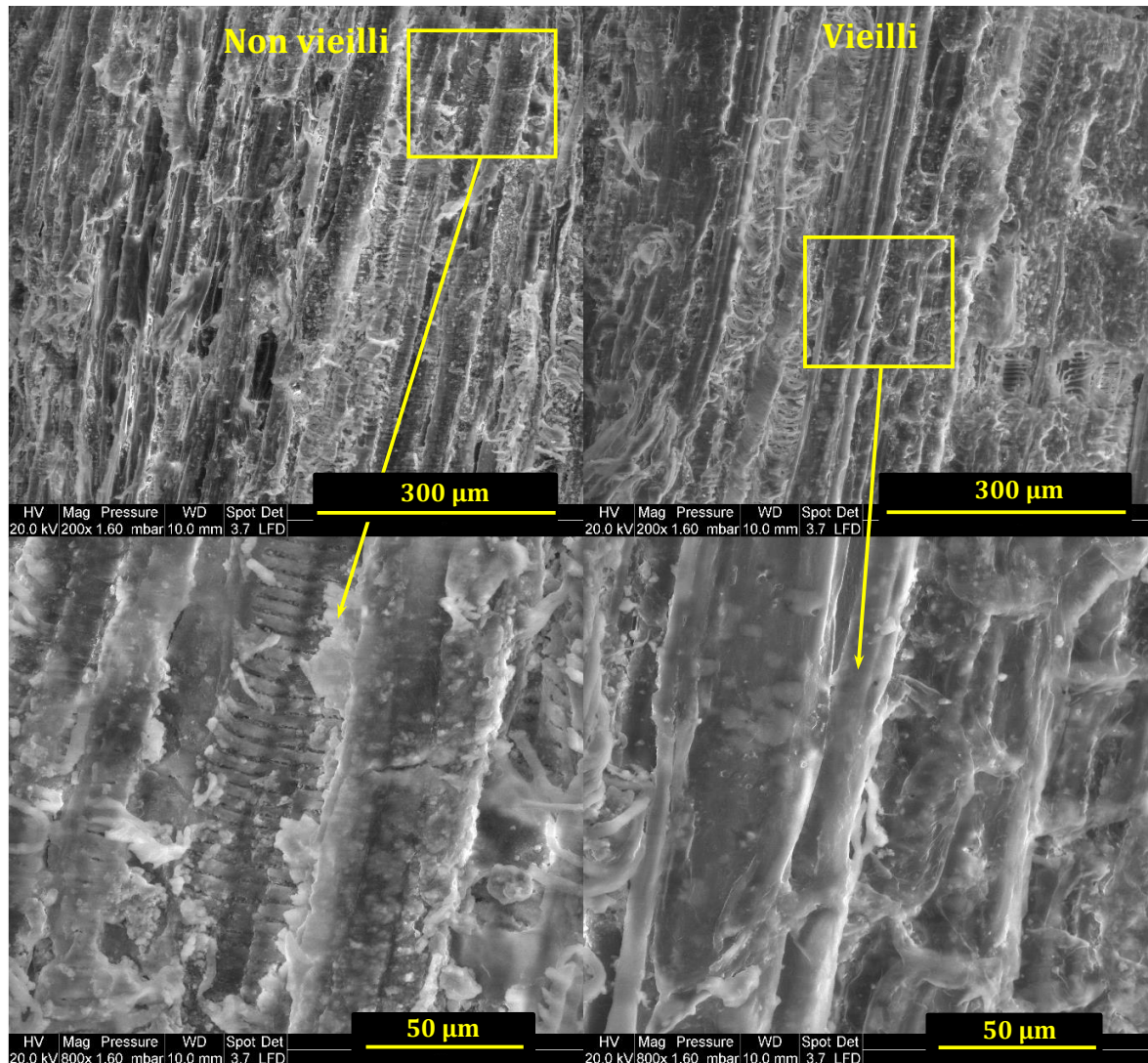


Figure IV-2. Images au MEB de la coupe longitudinale de la chènevotte : (à gauche) chènevotte non vieilli, (à droite) chènevotte vieilli.

Du fait que ces perturbations concernent les deux cas de chènevotte (vieillies et non vieilles), cela peut être causé, à priori, par l'interaction de ces particules végétales avec le liant. Pour confirmer cette hypothèse, une observation sur une coupe longitudinale d'une chènevotte saine qui n'a pas été mélangée avec le liant a été entreprise (voir Figure IV-3). Sur la Figure IV-2 et la Figure IV-3, nous pouvons clairement observer la différence entre la microstructure d'une chènevotte saine et celle mélangée avec le liant. En effet, la coupe

longitudinale de la chènevotte saine présente une structure tubulaire bien organisée, ce qui n'est pas le cas pour celle qui a été mélangée avec le liant. A base de ces observations, on peut confirmer que les perturbations et les endommagements observés sur la chènevotte mélangée avec le liant ont été causés par les débris du liant qui ont été collés sur la surface de la chènevotte.

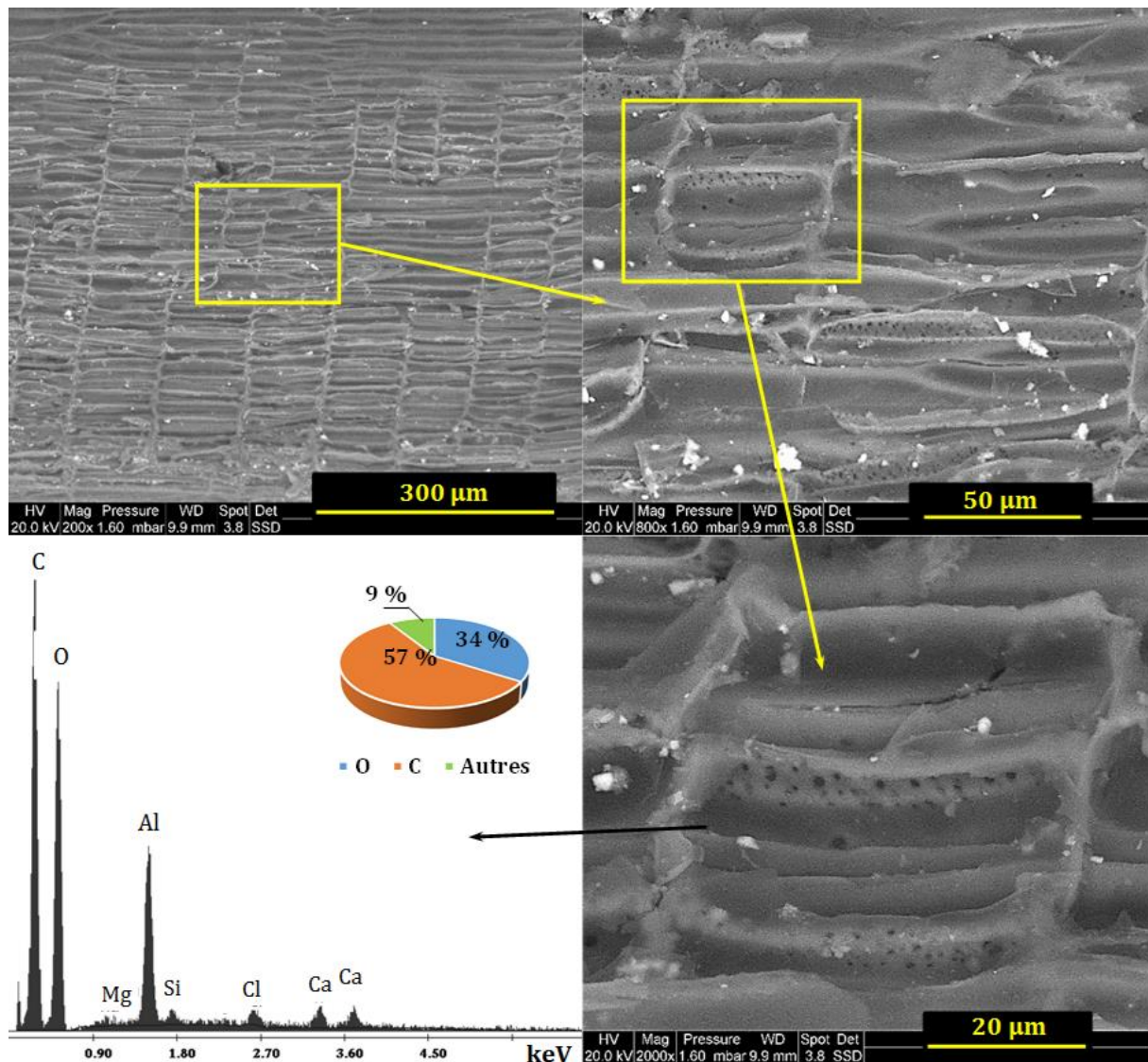


Figure IV-3. Images au MEB de la coupe longitudinale d'une chènevotte saine (non mélangée avec le liant) et son spectre EDS.

Ces derniers provoquent l'apparition de petites cavités et causent, par conséquent, la perturbation des parois formant les cellules de la particule végétale. Cela peut être également perçu d'une façon plus explicite sur la Figure IV-4. En général, ces phénomènes d'endommagement restent superficiels puisqu'il n'est pas constaté des modifications sur la coupe transversale de ces particules végétales. Donc, on peut conclure que le vieillissement n'a pas affecté la microstructure de la chènevotte.

Par ailleurs, le spectre EDS (Analyse dispersive en Energie) ou « Energy Dispersive Spectroscopy » de la chènevotte (voir Figure IV-3) montre que cette particule végétale est composée principalement de carbone et d'oxygène. L'hydrogène qui contient qu'un seul électron n'a malheureusement pas pu être détecté par le dispositif utilisé. De plus, on voit sur le spectre EDS la présence de l'Aluminium. Ce dernier n'est autre que celui de la platine de support de la chènevotte qui a été détecté par les fuseaux qui ont pu traverser la chènevotte.

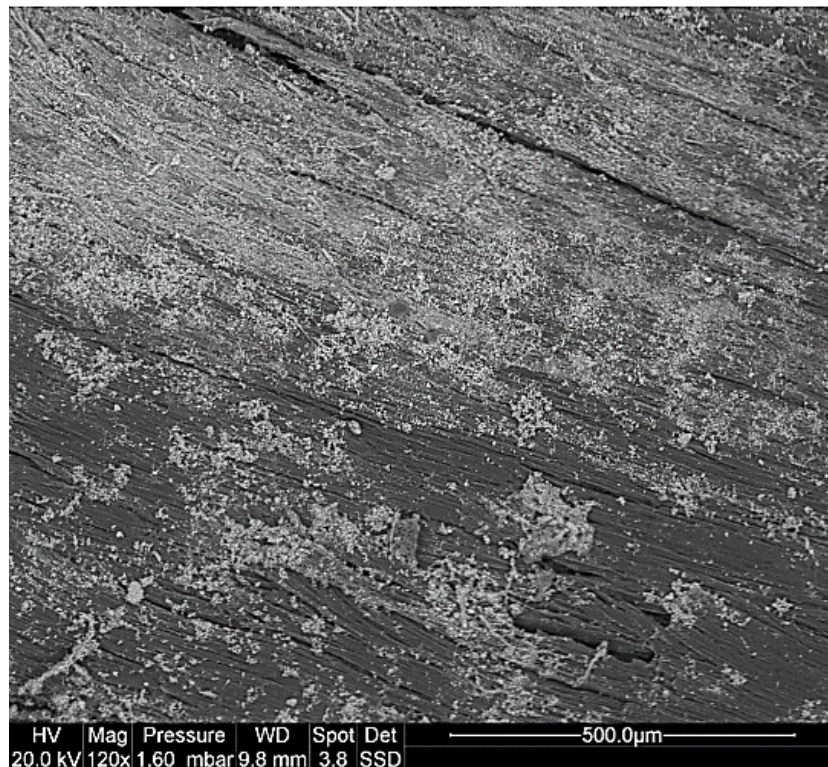


Figure IV-4. Surface d'une chènevotte couverte par du liant.

Des observations sur l'interface liant/chènevotte ont été également effectuées. Les résultats sont illustrés respectivement sur les Figure IV-5 et Figure IV-6. A base de ces observations, on peut clairement remarquer qu'après le vieillissement accéléré, le matériau est devenu plus poreux et l'interface liant/chènevotte semble plus fragile. Plusieurs fissures peuvent être aussi observées sur cette interface. A priori, ce changement de la microstructure s'explique par le gonflement et le rétrécissement des particules végétales lors du vieillissement. Cela peut également être attribué à un éventuel défaut de consolidation. Cela provoque, sans doute, des modifications sur les propriétés fonctionnelles de ce matériau.

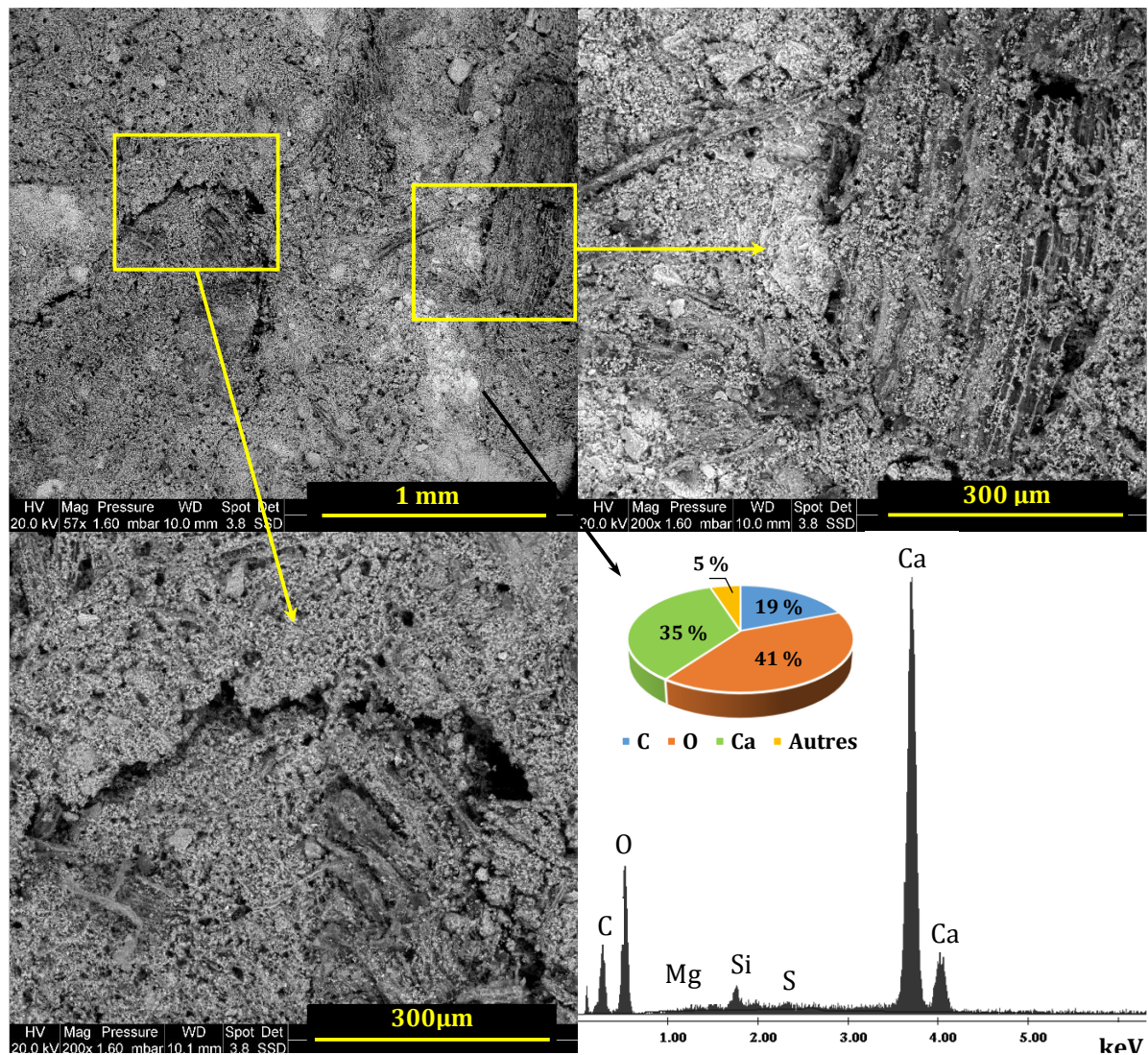


Figure IV-5. Observation au MEB de l'interface liant/chènevotte du béton de chanvre non vieilli et le spectre EDS qui lui correspond.

Par ailleurs, les analyses EDS réalisées sur une surface vieillie et non vieillie (voir respectivement la Figure IV-5 et la Figure IV-7) montrent la présence du carbone, d'oxygène et du Calcium. Les deux premiers proviennent principalement de la composition chimique de la chènevotte (matière organique). Quant au dernier (Calcium), il provient de la phase solide du béton de chanvre (Tradical PF70).

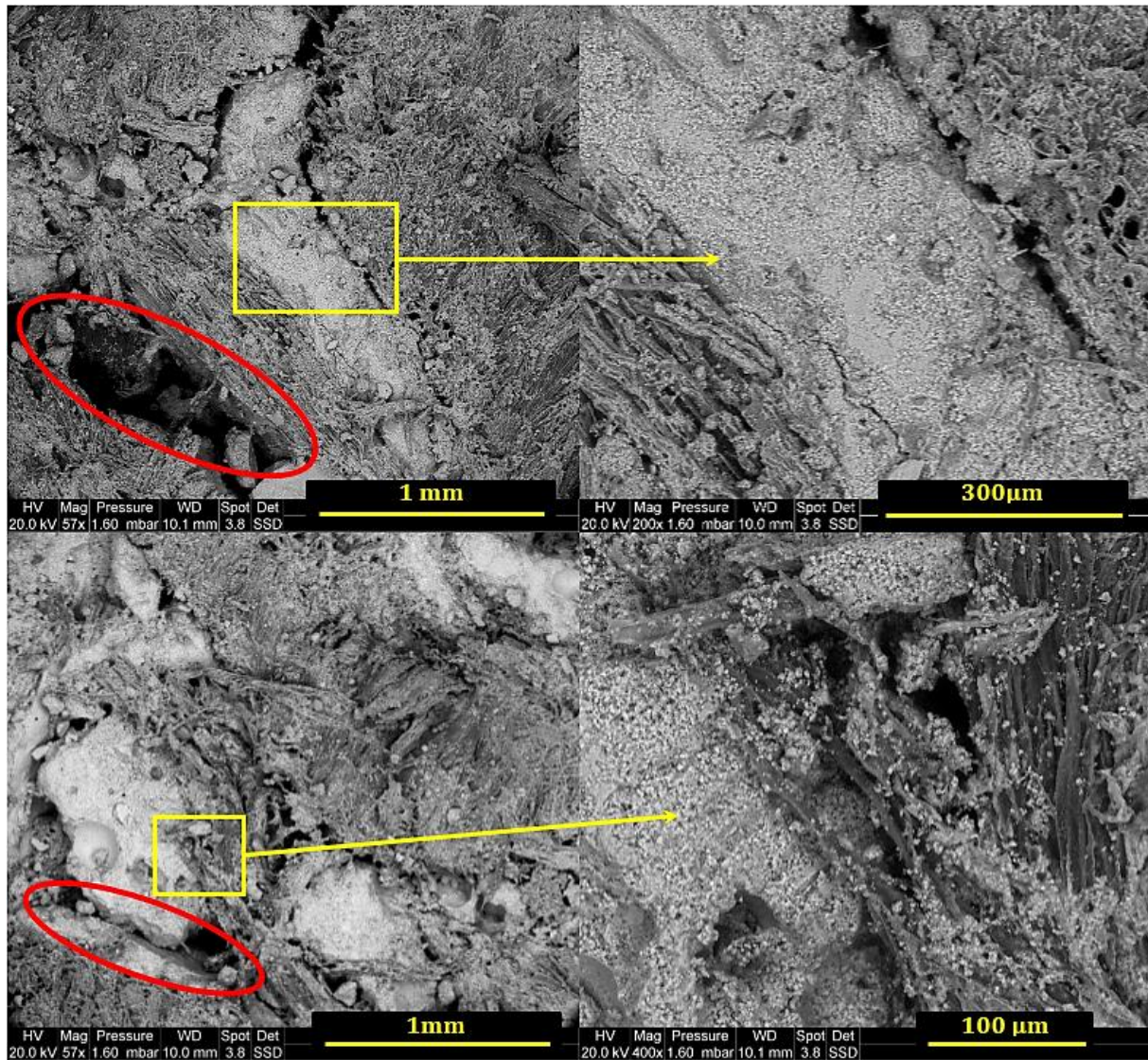


Figure IV-6. Observation au MEB de l'interface liant/chênevotte du béton de chanvre vieilli.

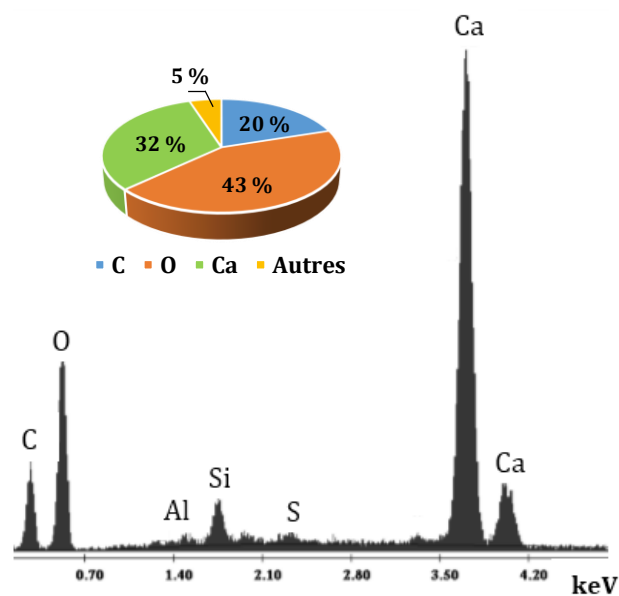


Figure IV-7. Spectre EDS du béton de chanvre vieilli (surfactive : 2.54x2.10 mm).

b) Caractérisation de la morphologie du béton de chanvre par un microscope numérique (Keyence®)

Dans l'optique d'une meilleure interprétation des résultats expérimentaux obtenus, les microstructures du béton de chanvre vieilli et non vieilli ont été analysées à l'aide d'un microscope numérique « Keyence® » (voir Figure IV-8). Ce dispositif donne des images de haute résolution permettant d'observer avec précision les changements morphologiques des matériaux analysés avant et après vieillissement. Notons que cette analyse a été effectuée sur la même zone des échantillons afin de visualiser l'impact du vieillissement sur la morphologie du béton de chanvre et d'éviter les problèmes d'hétérogénéité de ce matériau.

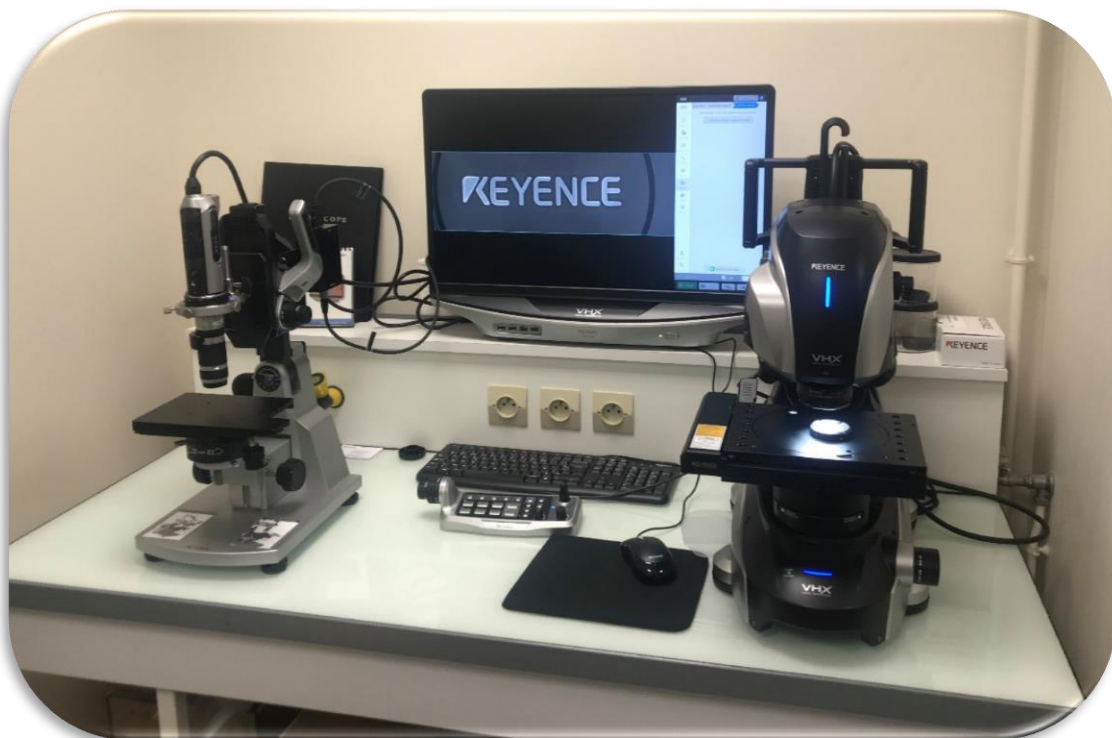


Figure IV-8. Photo du microscope numérique « Keyence ».

En effet, l'évolution des propriétés fonctionnelles du béton de chanvre vis-à-vis du vieillissement dépend fortement de ses modifications microstructurales. Il est donc préférable de montrer d'abord l'évolution de sa microstructure dans le temps afin de mieux interpréter les changements et les modifications qui peuvent être engendrées sur ses propriétés fonctionnelles.

La Figure IV-9, Figure IV-10 et Figure IV-11 montrent une comparaison de la morphologie du béton de chanvre vieilli respectivement après l'application du protocole

d'immersion/séchage, d'immersion/gel/séchage et d'humidification/séchage par rapport au matériau de référence (non vieilli).



Figure IV-9. Microstructure du béton de chanvre : (à gauche) non vieilli, (à droite) vieilli par immersion/séchage.

Il est remarqué que l'incidence des deux premiers protocoles de vieillissement accéléré (Figure IV-9 et Figure IV-10) est beaucoup plus importante que celle du troisième protocole (Figure IV-11).



Figure IV-10. Microstructure du béton de chanvre : (à gauche) non vieilli, (à droite) vieilli par immersion/gel/séchage.

Sur les Figure IV-9 et Figure IV-10, sont observées des changements significatifs de la microstructure du béton de chanvre après vieillissement. Ces modifications apparaissent, généralement, sous forme de fissures au niveau des interfaces de liaisons chènevotte/liant (zones entourées en rouge sur les images microscopiques). Cela est dû au phénomène de gonflement et de rétrécissement des particules végétales et à la mauvaise adhérence entre la fibre et le liant. Cela peut être dû également à d'éventuels détachements de la matière durant les cycles de vieillissement accéléré. De plus, les fissures constatées après le test d'immersion/gel/séchage ont été un peu plus large que celles constatées dans les autres tests. Cela s'explique par le fait que le matériau a subi une étape de gel entre l'immersion et le séchage, ce qui a permis à la quantité d'eau capturée dans le matériau de passer de l'état liquide à l'état solide. Ce passage provoque donc une augmentation du volume d'eau d'environ 9%, ce qui entraîne des contraintes supplémentaires et donc des endommagements un peu plus importants.

La sensibilité de ces particules végétales à l'humidité relative a été, ensuite, entreprise moyennant l'évaluation du coefficient de gonflement de la chènevotte et ce à partir du rapport entre la déformation de la chènevotte et la différence de la teneur en eau entre deux paliers d'humidité relative (HR=0% et 85%). Ainsi, la teneur en eau a été déduite des résultats de la littérature entre un état sec (HR=0%) et un état humide (HR=85%), ce qui correspond à une différence de teneur en eau de 10% [162]. Aussi, la déformation de la chènevotte entre les états sec et humide, mesurée par le logiciel de traitement d'images « ImageJ », est d'environ 9,81%. Enfin, un coefficient de gonflement de 0,95 (% ϵ / %w) a été déduit. Cette valeur est supérieure à celle évaluée pour le bois, qui est d'environ 0,4 [163]. Ce coefficient de gonflement confirme la sensibilité des particules végétales de chanvre à l'humidité et permet de mieux expliquer les fissures observées après vieillissement dues à plusieurs cycles de gonflement/rétrécissement des anas de chanvre et à leur interaction avec le liant.

Concernant le dernier protocole de vieillissement accéléré (humidification/séchage), il a été observé de légères modifications morphologiques (voir Figure IV-11). Néanmoins, ces dernières sont moins importantes malgré l'étendu de la durée du protocole de vieillissement (8 mois). Cela s'explique, d'une part, par le fait que le troisième protocole appliqué est moins agressif, et d'autre part, par le fait que les cinq jours d'humidification ou de séchage ne sont pas suffisants pour atteindre l'équilibre et de pouvoir créer des modifications significatives sur la microstructure du matériau. Par ailleurs, une cicatrisation de certaines fissures après la fin des cycles d'humidification/séchage ont été observées (voir les zones entourées en rouge

dans la Figure IV-11). Cela est dû à une éventuelle hydratation du matériau au cours du temps et au gonflement de la chènevotte.



Figure IV-11. Microstructure du béton de chanvre : (à gauche) non vieilli, (à droite) vieilli après l'application du protocole d'humidification/séchage.

Ces observations microscopiques nous ont permis de mettre en évidence l'effet du vieillissement sur la morphologie du béton de chanvre.

c) Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau permet de collecter des informations quant à la quantité des vides contenus dans un matériau. Cette méthode repose sur la pesée hydrostatique basée sur le principe de la poussée d'Archimède. La caractérisation a été effectuée suivant la procédure de l'AFPC-AFREM [133]. Pour chaque cas du béton de chanvre, trois échantillons de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ont été testés afin de vérifier la répétabilité des mesures.

Les résultats de caractérisation de ces matériaux sont illustrés dans la Figure IV-12. La porosité obtenue sur les matériaux de référence est de 71.51 % avec un écart type de 2.18×10^{-4} . Ces résultats sont en accord avec les données de la littérature [155,164]. Cette valeur élevée de la porosité peut s'expliquer par la quantité de la chènevotte utilisée pour la formulation de ce matériau. En se basant sur ces résultats, on voit bien que le vieillissement a un effet sur la porosité totale du béton de chanvre. En effet, la porosité de ce dernier a augmenté pour atteindre les valeurs de 73.40 % et 76.07 % respectivement après l'application des cycles d'immersion/séchage et les cycles d'immersion/gel/séchage. Ces accroissements de 2.64 % et de 6.38 % respectivement peuvent être constatés par rapport au matériau de référence. Ces résultats sont en accord avec les observations effectuées au microscope numérique et au MEB qui confirment l'augmentation de la porosité. Comme nous l'avons mentionné précédemment,

cette augmentation peut s'expliquer, d'une part, par une mauvaise adhérence entre le liant et la chènevotte qui a provoqué l'apparition des fissures suite au gonflement de la chènevotte, et d'autre part, par une éventuelle dissolution des hydrates initialement présents dans la pâte de liant [165].

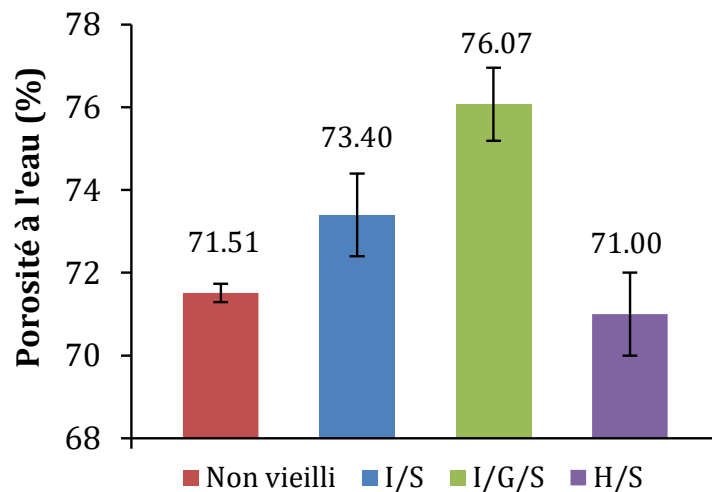


Figure IV-12. Porosité des bétons de chanvre de référence et vieilli.

Concernant le troisième protocole de vieillissement accéléré, la porosité mesurée après 8 mois d'humidification/séchage est de 71%. Ce résultat est également en accord avec les observations microscopiques qui n'ont pas révélés des modifications significatives.

d) Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est définie comme étant le rapport entre la masse de l'échantillon et son volume apparent. Elle a été déterminée après la stabilisation de masse des matériaux. Pour ce faire, nous avons utilisé une balance de précision '0,1 g' pour la détermination de la masse et un pied à coulisse et une règle graduée pour la détermination des dimensions (voir Figure IV-13).

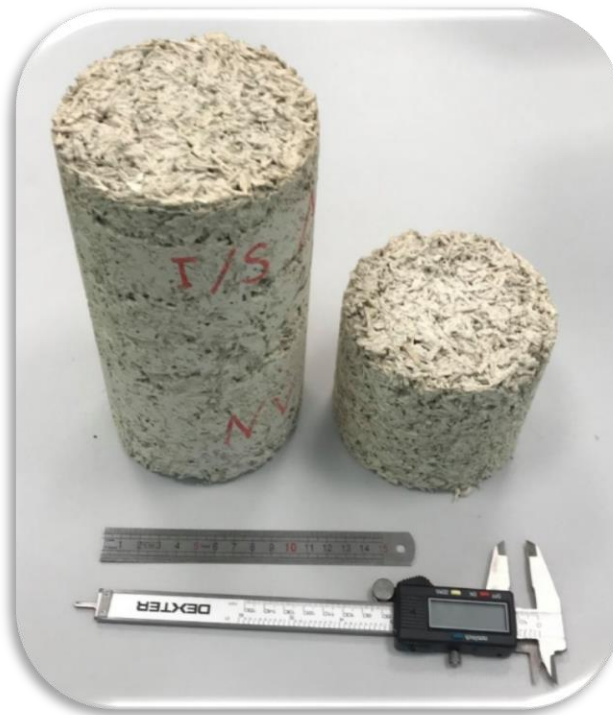


Figure IV-13. Instruments de mesure de la masse volumique apparente.

Pour la mesure de la masse volumique apparente, la norme [166] recommande une mesure du volume avec une précision de 1%, et une mesure de la masse à 0,1% près. Pour cela, la mesure retenue est la moyenne de trois mesures. Les résultats sont illustrés dans le Tableau IV-1. On peut clairement remarquer qu'après vieillissement, il n'y a pratiquement pas de changement sur la valeur de la masse volumique du béton de chanvre.

Tableau IV-1 Masse volumique du béton de chanvre vieilli et non vieilli.

Echantillons	Masse volumique (Kg/m ³)	
	Non Vieilli	Vieilli
Béton de chanvre	484,56 ± 4.12	480.27 ± 2.07

Remarque : A titre comparatif entre le béton de chanvre et le béton de lin, et si on prend le béton de chanvre comme matériau de référence, on constate que la masse volumique du béton de lin est légèrement supérieure à celle du béton de chanvre. Pour une teneur massique en chènevotte de 14.5%, le béton de chanvre présente une masse volumique de 484 kg/m³, tandis que celle du béton de lin (F22) est estimée en moyenne à 549 kg/m³. Cela s'explique par la morphologie de ces particules végétales.

e) Analyse chimique des solutions d'immersion et évolution du pH

Suite aux deux premiers protocoles de vieillissement accéléré (immersion/séchage et immersion/gel/séchage), un changement de couleur de la solution d'immersion a été observé. Afin de connaître l'origine de ce changement de couleur et surtout de confirmer l'hypothèse annoncée en haut concernant la dissolution des hydrates initialement présents dans la pâte, une analyse chimique de cette solution a été réalisée à l'aide d'une chromatographie ioniques disponible au LaSIE (voir Figure II-1). Cette méthode physico-chimique permet de séparer, d'identifier et de quantifier parfaitement les cations et les anions présents dans la solution en question.



Figure IV-14. Photo du chromatographe ionique du LaSIE.

Le principe de cette méthode consiste à injecter la solution à analyser en de très faible quantité et les ions seront fixés sélectivement sur la colonne chromatographique. La circulation de l'éluant en permanence sur la colonne permet aux ions de se décrocher progressivement et à la sortie de la colonne, chaque espèce ionique est ainsi séparée et détectée par conductimétrie. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le Tableau IV-2.

Tableau IV-2 Composition chimique de la solution d'immersion obtenue par la chromatographie ionique.

Solution analysée (Eau de robinet)	Ions	Calcium (Ca ²⁺)	Magnésium (Mg ²⁺)	Potassium (K ⁺)	Sodium (Na ⁺)
Avant vieillissement	Concentration (mg/l)	26.29	3.66	1.2	12
	Nombre de solution testée	3	3	3	3
	Ecart type (mg/l)	± 6.98	± 1.21	± 0.11	± 1.09
Après vieillissement	Concentration (mg/l)	625.76	12.48	314.59	17.34
	Nombre de solution testée	3	3	3	3
	Ecart type (mg/l)	± 51.85	± 1.54	± 5.81	± 1.55

Ces résultats montrent la présence du calcium, du potassium, du magnésium et du sodium dans la solution d'immersion. Ces espèces ont été lixiviées du béton de chanvre suite au vieillissement appliqué. Ce phénomène de lixiviation génère un déséquilibre chimique du matériau, ce qui provoque par conséquent, une dissolution des hydrates afin de stabiliser le système thermodynamique de la solution interstitielle/hydrates perturbés [165]. Ces résultats peuvent être, à priori, liés à la modification de la microstructure du béton de chanvre. Il en demeure pas moins que d'amples investigations chimiques plus profondes sont requises.

Afin d'enrichir davantage cette étude, un suivi de l'évolution du pH de ces matériaux a été effectué. Sachant que la valeur du pH d'un matériau peut être modifiée par plusieurs facteurs, notamment, le développement des moisissures qui créent un échange d'ions et la diffusion du CO₂. La technique de mesure optée est celle de la production d'une solution aqueuse [31]. Cette dernière consiste, d'abord, à réduire en poudre les échantillons du béton de chanvre. Ces échantillons ont été prélevés au cœur des éprouvettes et ils ont été broyés jusqu'à l'obtention d'une poudre très fine. Ensuite, la poudre obtenue a été mélangée avec de l'eau distillée avec un rapport liquide/poudre de 9 ml/g et le mélange a été agité pendant 15 minutes à l'aide d'un agitateur magnétique. Enfin, les valeurs de pH ont été mesurées à l'aide d'un pH-mètre 780 de Metrohm® sur trois échantillons de chaque cas du béton de chanvre. Les résultats présentés dans le Tableau IV-3 confirment la basicité de ce matériau. Pour les différents cas de béton de chanvre (vieillis et non vieillis), la valeur du pH est supérieure à 10, ce qui écarte tout risque de développement des moisissures. En effet, les travaux de la littérature ont montrés que le risque de développement des moisissures commence à apparaître lorsque le pH des matériaux est inférieur à 10 [128]. Ces résultats ont été ainsi confirmés par les observations

microscopiques qui n'ont enregistrées aucune présence de moisissures. Les valeurs de pH enregistrées font apparaître de légères diminutions entre les matériaux vieillis et non vieillis. Cela revient à dire qu'en général, ces types de vieillissement n'affectent pas significativement le pH du béton de chanvre. Toutefois, il est important de mentionner que les matériaux ayant subis les cycles d'humidification/séchage ont présenté la valeur la plus basse de pH ($10.27 \pm 3.34 \times 10^{-2}$) par rapport aux autres cas. Cette valeur est donc proche de la valeur limite qui provoque le risque de développement des moisissures. Si les 08 mois d'humidification/séchage n'ont pas provoqué l'apparition des moisissures, c'est peut-être à cause de l'humidité relative fixée à 85% et de la durée d'humidification de 5 jours qui n'ont pas été suffisantes. C'est pourquoi, un suivi du développement fongique de ce type de matériau doit être assuré dans le temps pour éviter tout risque de dégradation qui peut même affecter la santé des occupants.

Tableau IV-3 pH du béton de chanvre vieilli et non vieilli.

Béton de chanvre	Non vieilli	Vieilli		
	Référence	Protocole 1 I/S	Protocole 2 I/G/S	Protocole 3 H/S
pH	11.81	11.64	10.87	10.27
Nombre d'échantillons testés	3	3	3	3
Ecart type	$\pm 1.13 \times 10^{-2}$	$\pm 1.72 \times 10^{-2}$	$\pm 2.46 \times 10^{-2}$	$\pm 3.34 \times 10^{-2}$

f) Analyse ThermoGravimétrique (ATG)

L'analyse thermogravimétrique permet de quantifier l'évolution de la masse du matériau en fonction de la température. Chaque variation de masse reflète un phénomène chimique, physique ou physico-chimique dû à l'effet de la température. Il est donc possible d'identifier et de quantifier les différents composants d'un échantillon en analysant les variations de masse associées à leurs températures de décomposition. C'est pourquoi nous avons fait appel à ce test afin d'affiner cette étude. L'essai a été effectué dans une atmosphère d'hélium contrôlée pour des plages de températures de 25-500°C et de 25-900°C respectivement pour la chènevotte et le liant. La vitesse de chauffage est respectivement de 5°C/min et de 10°C/min. L'ATG permet donc de fournir des informations précises sur de possibles modifications du matériau et permet de révéler sa composition après vieillissement. Les mesures ont été réalisées sur la chènevotte et le liant vieilli et non vieilli séparément à l'aide de l'appareil

SETSYS Evolution 16/18 de SETARAM[®]. Cette analyse a été réalisée uniquement sur les échantillons vieillis par immersion/séchage.

La Figure IV-15 (a) et la Figure IV-15 (b) comparent respectivement l'ATG (courbe de perte de masse) et la dTG (dérivée de l'ATG) de la chènevotte vieillie et non vieillie. Sur la Figure IV-15 (b), un premier pic de changement de phase entre 50 et 150°C qui correspond à l'évaporation de l'eau libre contenue dans la chènevotte a été constaté. On observe également un pic principal dû à la décomposition de la cellulose entre 300 et 380°C [167]. L'épaulement en amont de ce pic principal est caractéristique de la dépolymérisation thermique de l'hémicellulose aux alentours 250°C. Par ailleurs, la courbe ATG présentée dans la Figure IV-15 (a) montre que la perte de masse de la chènevotte vieillie est légèrement supérieure à celle de référence. Toutefois, les pics de décomposition se sont produits dans les mêmes plages de températures avec des amplitudes légèrement différentes, reflétant ainsi la différence de la quantité du composé déshydraté en question.

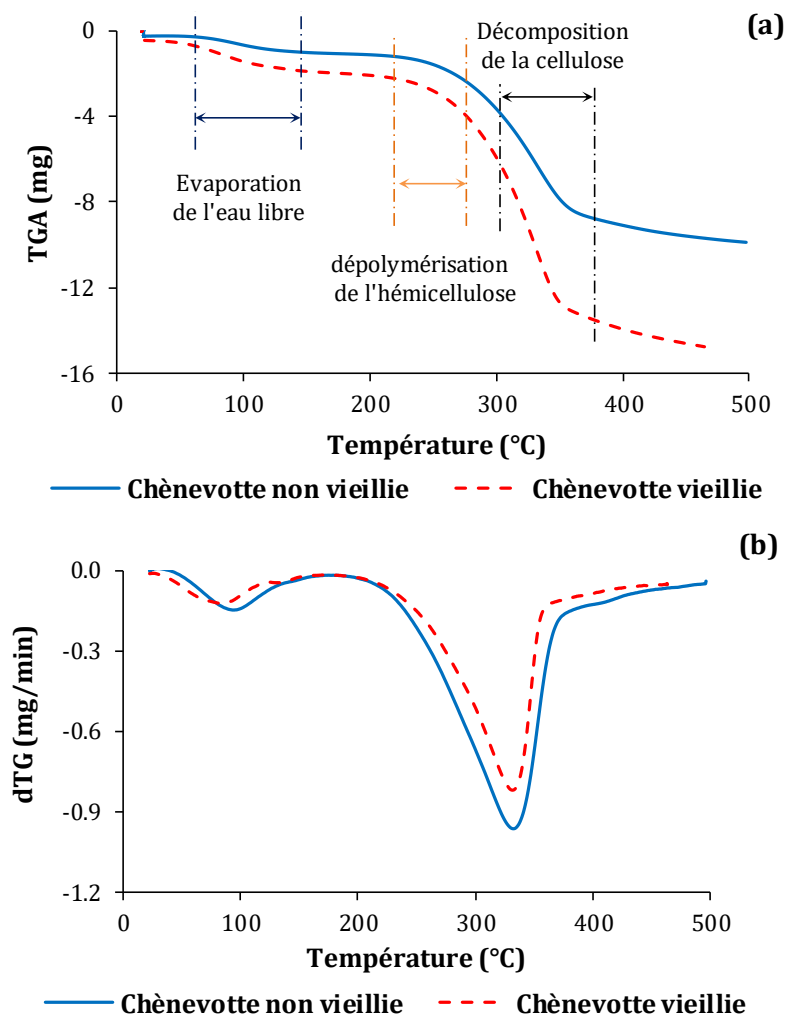


Figure IV-15. ATG (a) et dTG (b) de la chènevotte vieillie et non vieillie.

Dans le même sens, les résultats de la Figure IV-16 comparent les courbes ATG et dTG du liant vieilli et non vieilli. Ces courbes sont presque identiques et présentent un comportement similaire avec quelques légères variations dans les amplitudes des pics de décomposition. Les plages de température de ces pics sont également identiques. Le premier pic correspond au départ de l'eau libre dans les pores aux alentours de 100°C et de l'eau chimiquement liée aux hydrates de C-S-H sous forme continue entre 100°C et 400°C [168].

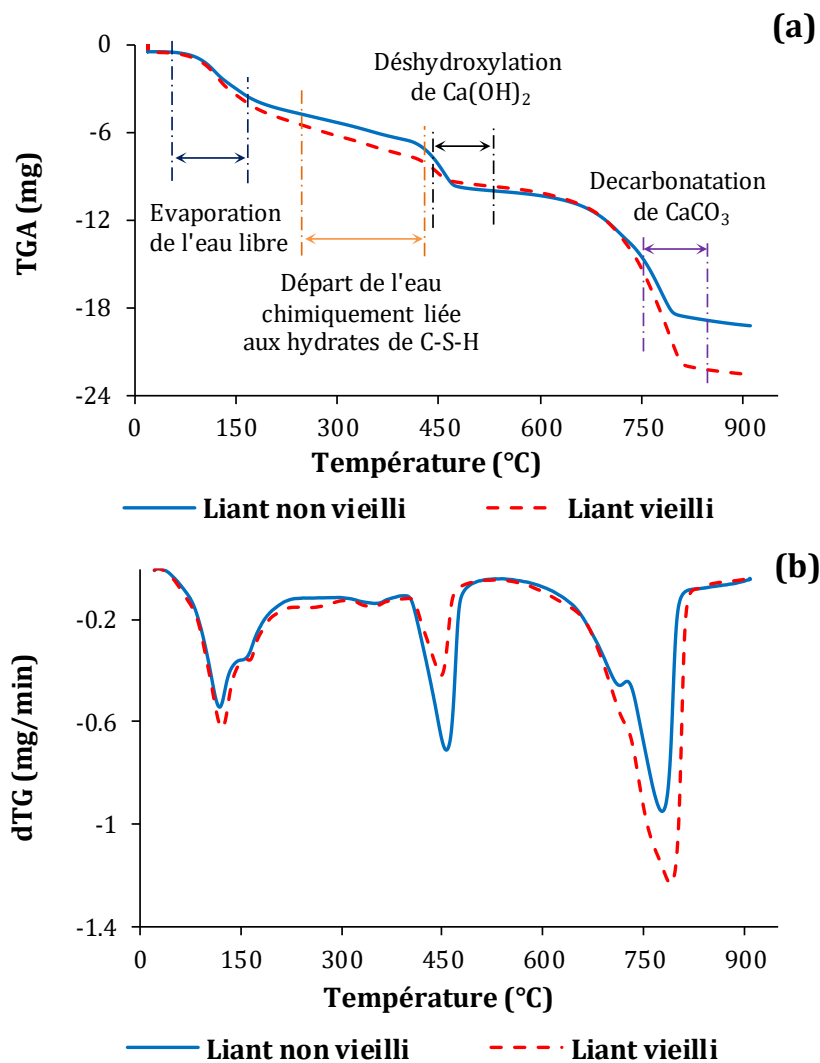
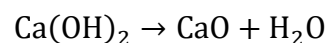
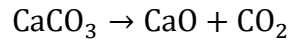


Figure IV-16. ATG (a) et dTG (b) du liant vieilli et non vieilli.

A 480°C, un deuxième pic a été observé. Ce dernier est dû à la déshydroxylation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ suivant l'équation suivante :



Enfin, un dernier pic s'est produit entre 750 et 850°C. Cela est provoqué par la décarbonatation du CaCO_3 suivant l'équation ci-après :



Ces résultats, permettent de conclure que la décomposition des différents composants de la chènevotte et du liant vieilli et non vieilli est quasiment identique, et que le vieillissement accéléré appliqué n'a pas perturbé les liaisons chimiques de ces composants.

IV.2.2. Caractérisation hygrothermique

a) Conductivité thermique

Cette propriété a été mesurée dans des conditions stationnaires en utilisant un λ -meter Ep500e qui est basé sur le principe de la méthode normalisée, NF EN12667 [137] et NF EN12664 [138], de la plaque chaude gardée. Trois échantillons de $15 \times 15 \times 5 \text{ cm}^3$ de chaque cas du béton de chanvre ont été caractérisés afin de vérifier la répétabilité des mesures. La mesure a été effectuée dans des conditions isothermes pour une température de 23°C .

Les résultats illustrés dans la Figure IV-17 montrent l'effet du vieillissement sur sa conductivité thermique. Ainsi, le matériau de référence possède une conductivité mesurée de $100.7 \text{ mW}/(\text{m.K})$ avec un écart type de $2.3 \text{ mW}/(\text{m.K})$. Ces résultats sont en accord avec la littérature [63]. Après vieillissement, cette propriété a diminué de 6.1% et de 11.2% respectivement pour les matériaux ayant subi les cycles d'immersion/séchage et les cycles d'immersion/gel/séchage.

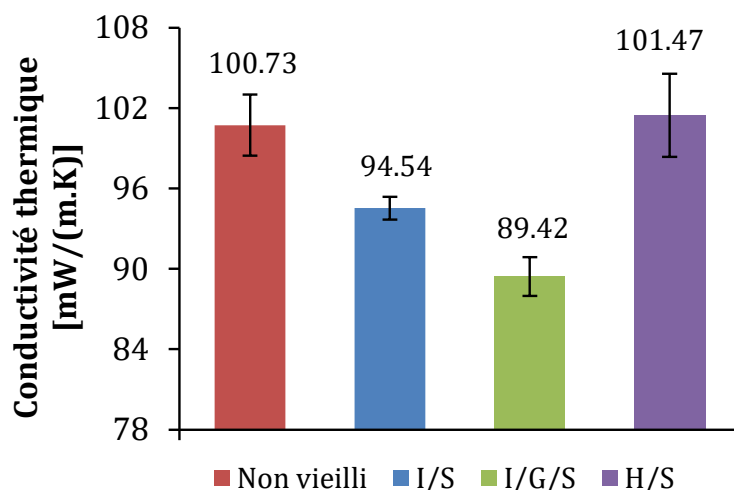


Figure IV-17. Conductivité thermique des matériaux de référence et vieillis.

Cela est dû principalement à la modification de la microstructure et à l'augmentation de la porosité totale de ce matériau après vieillissement. En effet, la conductivité thermique de l'air est beaucoup plus faible que celle de la chènevotte et du liant. Une augmentation du taux des

vides dans le matériau vieilli a permis donc d'amortir la transmission de la chaleur et de réduire par conséquent sa conductivité thermique. Cependant, les faibles modifications de la microstructure des matériaux ayant subis le troisième protocole de vieillissement accéléré (humidification/séchage) n'étaient pas suffisantes pour induire des modifications de leur conductivité thermique. D'après ces résultats, on peut donc conclure que les cycles d'immersion/séchage et d'immersion/gel/séchage ont un effet favorable sur la conductivité thermique du béton de chanvre. Le matériau est devenu plus isolant après vieillissement.

Remarque

Si on prend comme exemple les formulations du béton de lin Fi-2, ayant une teneur massique en anas de lin de 14,5% (formulations similaires au béton de chanvre présenté dans le chapitre II), on remarque que les résultats de conductivité thermique de ces deux matériaux sont relativement identiques (Figure IV-18).

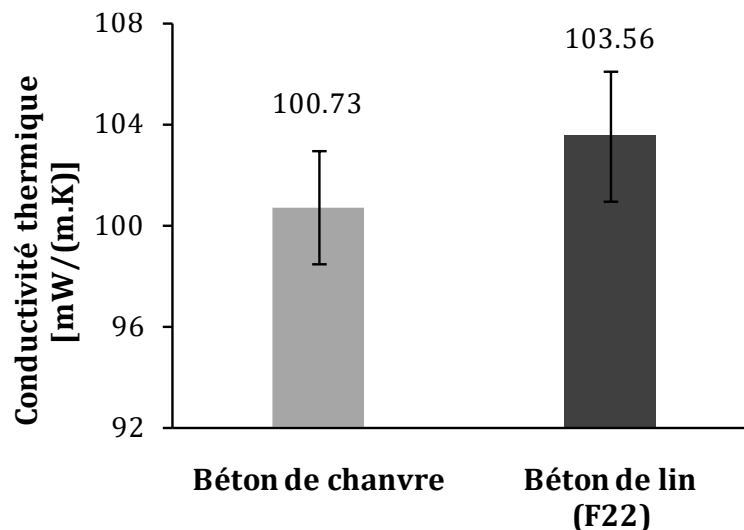


Figure IV-18. Comparaison entre la conductivité thermique du béton de chanvre et du béton de lin

b) Chaleur spécifique

La chaleur spécifique définit la capacité d'un matériau à accumuler de l'énergie thermique. Autrement dit, c'est la quantité d'énergie nécessaire en « Joule » pour augmenter la température d'un gramme de matière, d'un degré Celsius.

La mesure de cette propriété a été réalisée au LaSIE à l'aide d'un Calorimètre Calvet®. Les échantillons testés sont cylindriques de 0.7 cm de diamètre et d'environ 5 cm de longueur.

Les résultats des mesures réalisées sont présentés dans le Tableau IV-4. Il est constaté que la chaleur spécifique des matériaux vieillis et non vieillis est pratiquement la même. Une

augmentation maximale de 3.5 % a été enregistrée sur les matériaux ayant subi les cycles d'immersion/gel/séchage.

Tableau IV-4. Chaleur spécifique du béton de chanvre vieilli et non vieilli mesuré à 25°C.

	Non vieilli (référence)	Vieilli (I/S)	Vieilli (I/G/S)	Vieilli (H/S)
Cp (mJ/(g.K))	872.34	896.5	902.6	875.1

c) Isotherme de sorption

Les isothermes de sorption de la vapeur d'eau représentent l'évolution de la teneur en eau d'un matériau en fonction de l'humidité relative de l'air à l'équilibre pour une température donnée. La mesure de ces isothermes a été réalisée au LaSIE par une méthode gravimétrique à l'aide du dispositif proUmid. Avant l'essai, les échantillons cubiques de 1 cm de côté ont subi un séchage à l'étuve sous 40°C pendant 24 heures puis un dégazage sous vide afin de compléter le séchage.

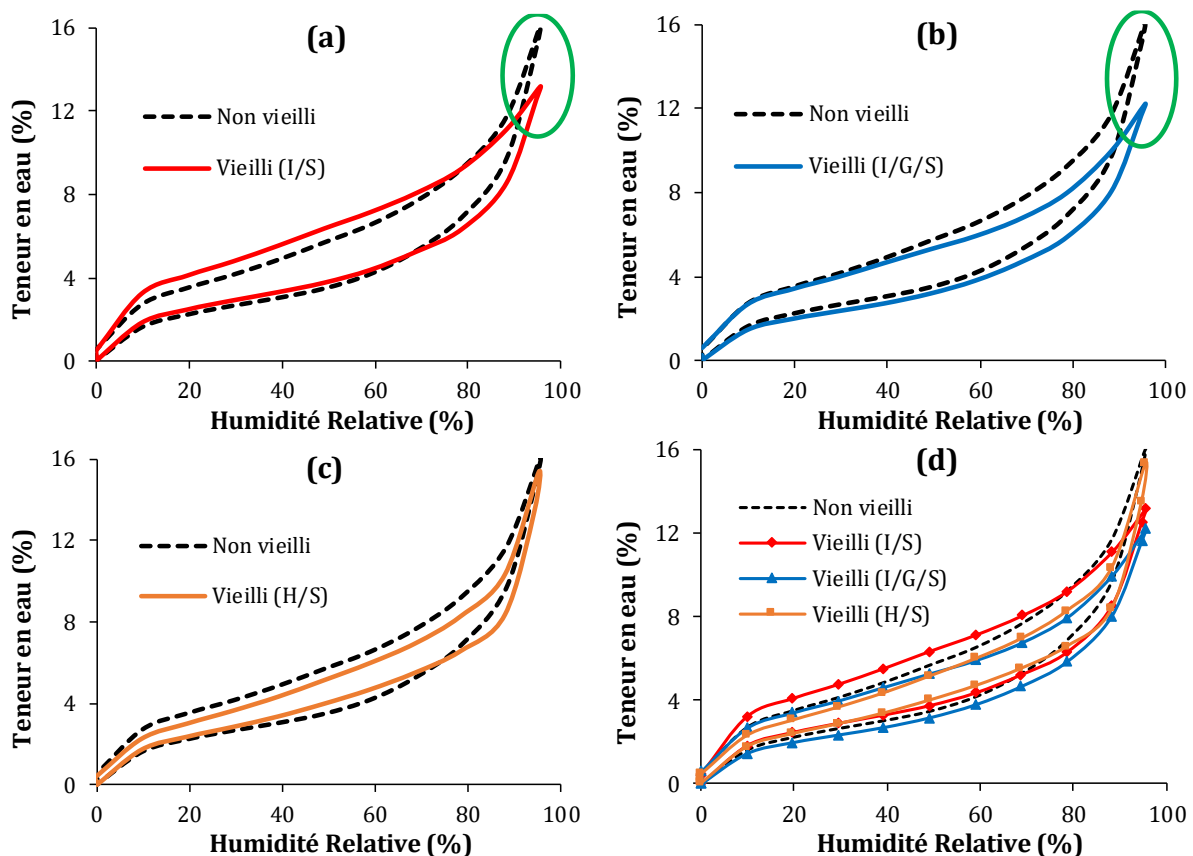


Figure IV-19. Isothermes d'adsorption et de désorption du béton de chanvre vieilli et non vieilli (I/S : immersion/séchage ; I/G/S : immersion/gel/séchage ; H/S : humidification/séchage).

La Figure IV-19 montre l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative. La valeur mesurée de la teneur en eau maximale adsorbée par le matériau de référence à des hygrométries élevées ($HR > 90\%$) est supérieure à celle des matériaux ayant subis les cycles d'immersion/séchage et les cycles d'immersion/gel/séchage. De plus, on voit bien que la capacité d'adsorption du matériau diminue avec l'augmentation de l'agressivité du protocole de vieillissement accéléré. Cela s'explique par le vieillissement du matériau notamment par la réduction de la capacité d'adsorption de la chènevotte après vieillissement. Les matériaux ayant subi les cycles d'humidification/séchage ont présenté un comportement presque identique à celui de référence. Cela est en accord avec les résultats présentés précédemment. Par ailleurs, une légère différence non uniforme dans la boucle d'hystérésis a été observée entre les différents cas du béton de chanvre. Cela est dû à la complexité de la microstructure de ce matériau. En effet, la distribution irrégulière de la taille des pores peut provoquer le piégeage de l'eau dans les petits pores en raison de l'effet "bouteille d'encre". C'est pourquoi la vidange des grands pores, lors de la désorption, ne débute qu'après la vidange des petits pores sous une haute pression capillaire. Cette eau peut donc rester emprisonnée dans les petits pores tant que la pression capillaire nécessaire à leur évacuation n'est pas atteinte, d'où la différence entre les boucles d'hystérésis observées.

Remarque

La Figure IV-20 montre une comparaison entre les isothermes d'adsorption/désorption du béton de lin et du béton de chanvre. Lors de la phase d'adsorption, nous remarquons que les deux matériaux présentent quasiment le même comportement mais avec une teneur en eau maximale différente pour des valeurs d'hygrométrie élevées ($HR > 90\%$). La teneur en eau maximale adsorbée par le béton de chanvre est supérieure de 12% de celle du béton de lin. Cependant, dans la phase de désorption, les deux matériaux présentent un comportement relativement différent dû à la complexité de la microstructure du matériau en question comme nous l'avons expliqué précédemment.

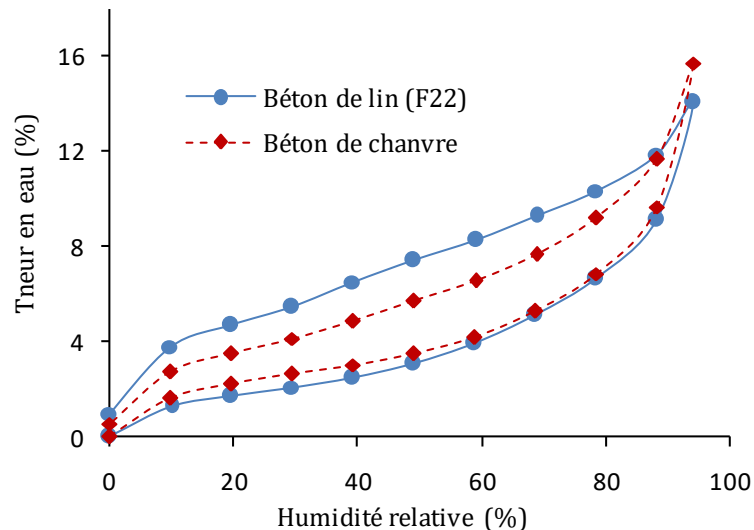


Figure IV-20. Comparaison entre l'isotherme d'adsorption/désorption du béton de lin et du béton de chanvre

d) Capacité de stockage d'humidité

La capacité de stockage d'humidité d'un matériau représente sa capacité à adsorber et à libérer de l'humidité lorsque les conditions d'humidité de l'environnement sont modifiées [6]. Cette propriété a été déduite en dérivant les isothermes d'adsorptions obtenues. Les résultats sont présentés dans la Figure IV-21. Ces derniers sont en accord avec les observations données précédemment sur les isothermes de sorption. Pour des faibles hygrométries ($HR < 80\%$), la capacité d'adsorption est identique pour les différents cas du béton de chanvre (vieilli et non vieilli).

Cependant, pour des hygrométries élevées ($HR > 80\%$), la capacité de stockage d'humidité diminue avec l'augmentation de l'agressivité du vieillissement, et ce, malgré l'augmentation de la porosité du matériau après vieillissement. Cela s'explique par le fait que la capacité d'adsorption du béton de chanvre est principalement gouvernée par la nature du matériau et la distribution de la taille des pores, mais aussi par la capacité d'adsorption de la chènevotte. Le vieillissement de ce matériau provoque donc une modification de la microstructure du matériau et une réduction de la capacité d'adsorption de la chènevotte et du matériau en général suite à sa dégradation après vieillissement, d'où la différence entre les résultats obtenus.

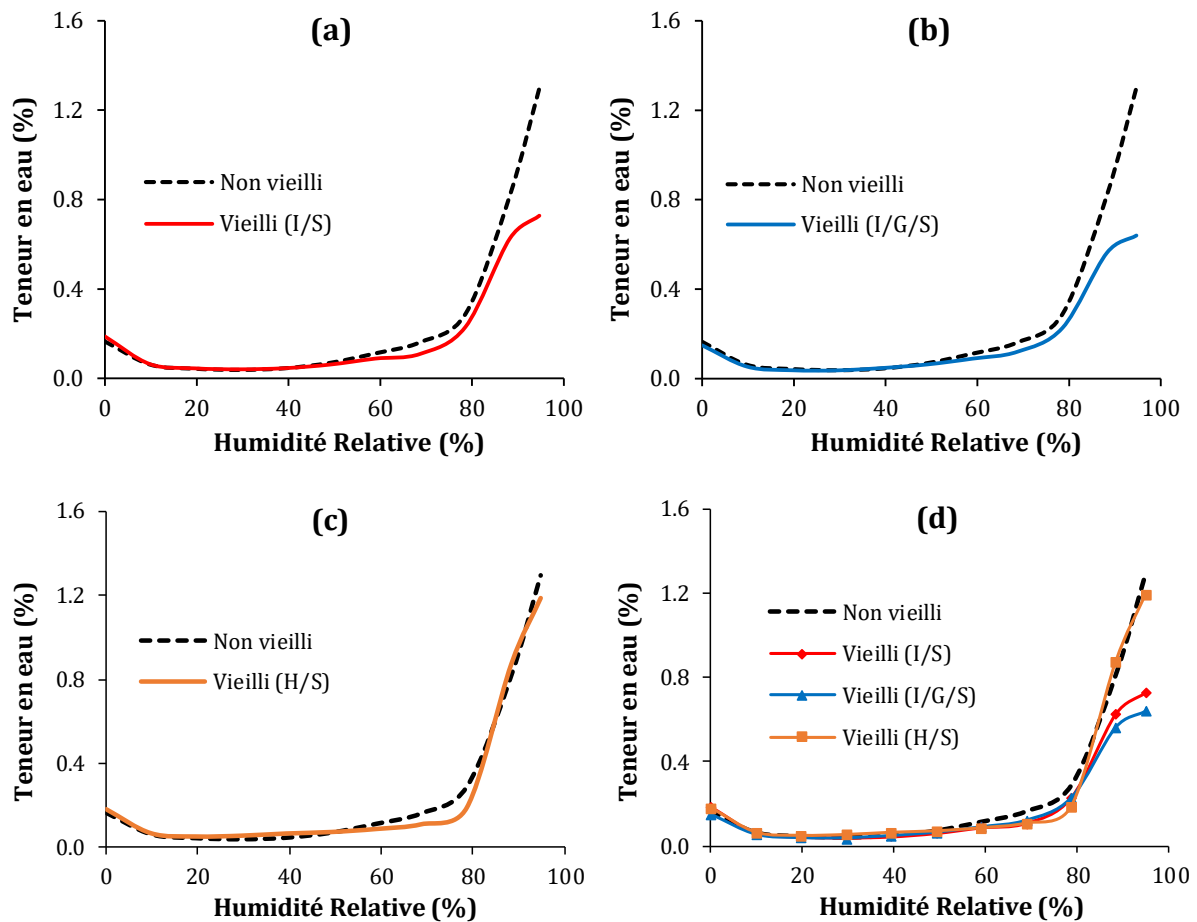


Figure IV-21. Capacité de stockage d'humidité des bétons de chanvre vieillis et non vieilli.

Remarque

Afin d'avoir une idée plus claire sur la capacité de stockage d'humidité du béton de lin que nous avons présenté dans le chapitre III, nous avons réalisé une comparaison avec la capacité de stockage du béton de chanvre qui a été pris dans ce chapitre comme matériau de référence. Les résultats de comparaison sont présentés dans la Figure IV-22. Nous pouvons clairement constater que la capacité de stockage du béton de lin est pratiquement identique à celle du béton de chanvre sur toute la gamme d'humidité relative.

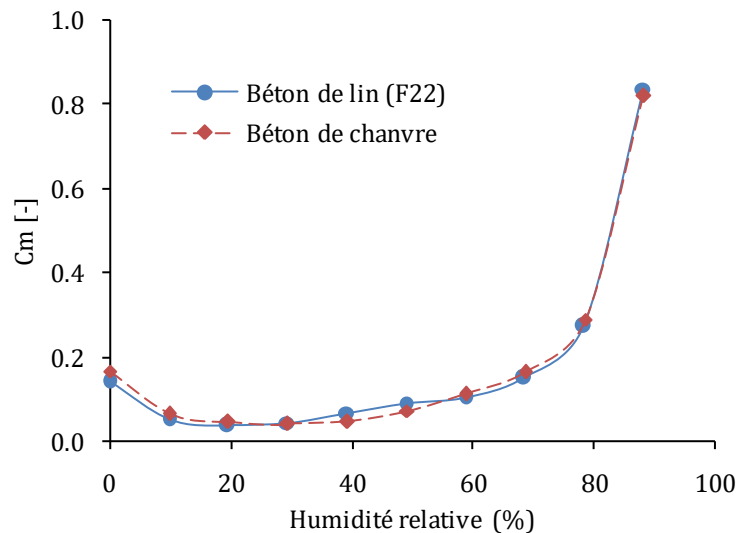


Figure IV-22. Comparaison entre les capacités de stockages d'humidité du béton de lin et du béton de chanvre.

e) Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau caractérise l'aptitude d'un matériau à laisser passer de l'humidité à travers son épaisseur sous un gradient de pression de vapeur une fois que l'état d'équilibre est atteint. C'est l'une des propriétés intrinsèques d'un matériau puisqu'elle ne varie pas avec la variation de son épaisseur. La mesure de cette propriété a été effectuée au LaSIE à l'aide du dispositif GraviTest® basé sur la méthode de la coupelle selon la norme ISO 12572 [65].

Le gradient d'humidité relative (ou gradient de pression de vapeur d'eau) engendre un flux de vapeur allant de la haute à la basse pression. Ce flux a été évalué en procédant à des pesées régulières de l'assemblage afin de déterminer le taux de transmission de la vapeur d'eau à l'équilibre. L'essai a été réalisé sur des coupelles humides où l'humidité relative à l'intérieur de la coupelle a été fixée à 93 % et celle de l'extérieur à 50%. Les échantillons cylindriques testés ont 8 cm de diamètre et 2 cm d'épaisseur.

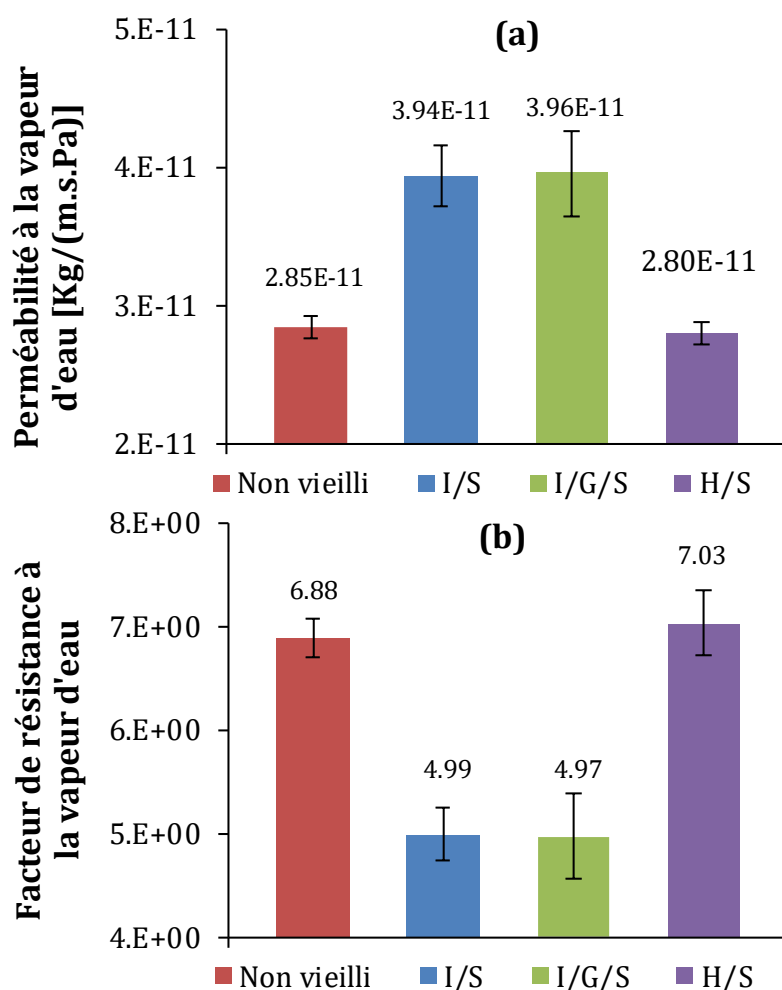


Figure IV-23. (a) perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre de référence et vieilli, (b) leurs facteurs de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau.

Les Figure IV-23 (a) et Figure IV-23 (b) montrent respectivement la perméabilité à la vapeur d'eau et le facteur de résistance à la diffusion d'humidité des bétons de chanvre vieilli et de référence. Les valeurs mesurées de la perméabilité à la vapeur d'eau et le facteur de résistance à la diffusion sur les matériaux de référence (non vieilli) sont respectivement de $2.8 \times 10^{-11} \pm 8.1 \times 10^{-13}$ ($\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$) et $6.9 \pm 1.9 \times 10^{-1}$. Ces résultats sont en accord avec la littérature [63]. Après vieillissement, une augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau de 38% et de 39% a été respectivement enregistrée sur les matériaux ayant subi les cycles d'immersion/séchage et les cycles d'immersion/gel/séchage. Cette augmentation a entraîné une diminution du facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau respectivement de 27 % et de 28 %.

L'évolution constatée sur ces paramètres caractérisant la diffusion de la vapeur d'eau du béton de chanvre après vieillissement est principalement due à la dégradation du matériau suite aux deux premiers protocoles de vieillissement accéléré. Cela a entraîné des modifications remarquables de la microstructure qui a été confirmée par l'apparition des fissures et

l'augmentation de la porosité totale (voir section IV.2.1.). Cela a finalement rendu le matériau plus poreux et donc plus perméable. Par ailleurs, on peut aussi montrer à partir de la Figure IV-12 que la porosité du béton de chanvre vieilli par immersion/gel/séchage est supérieure à celle du béton de chanvre ayant subi les cycles d'immersion/séchage. Malgré ce constat, la perméabilité à la vapeur d'eau de ces deux matériaux demeure quasi-identique. Ceci peut s'expliquer par des distributions différentes des tailles des pores des deux matériaux. Concernant les matériaux ayant subi les cycles d'humidification/séchage, les faibles modifications de leur microstructure n'étaient pas suffisantes pour perturber les propriétés de diffusion de la vapeur d'eau, ce qui justifie un écart faible de la perméabilité à la vapeur d'eau et du facteur de résistance d'humidité obtenus par rapport aux matériaux de référence.

En effet, la perméabilité à la vapeur d'eau mesurée en régime permanent permet de mettre en évidence le pouvoir respirant élevé du béton de chanvre qui se traduit par un faible facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. Les matériaux poreux contrôlent mieux l'humidité intérieure, réduisent la condensation et empêchent le développement des moisissures. Cela améliore ainsi la qualité de l'air intérieur des bâtiments. Cependant, il est important de noter que la diffusion d'humidité varie lorsque le matériau est imperméable ou lorsqu'il est fortement perméable, et entre ces deux limites, on peut trouver une perméabilité à la vapeur optimale selon le cas recherché. Pour mieux illustrer ce point, nous avons calculé la perméance de ces matériaux qui est égale à la quantité de vapeur d'eau qui traverse un mètre carré de matériau en une heure avec un gradient de pression de 1 mm de Hg (133.3 Pa). Cette propriété peut être définie donc comme étant le rapport entre la perméabilité à la vapeur d'eau et l'épaisseur du matériau en question. Le Tableau IV-5 présente les valeurs des perméances obtenues.

Tableau IV-5. Perméance du béton de chanvre vieilli et non vieilli.

Béton de chanvre	Epaisseur (cm)	Perméance (ng/(m ² .s.Pa))
Non vieilli	2	1425
Vieilli (I/S)	2	1970
Vieilli (I/G/S)	2	1980
Vieilli (H/S)	2	1400

La Figure IV-24 présente une classification de divers matériaux selon leurs perméances. D'après les résultats présentés dans le Tableau IV-5, les matériaux étudiés sont des matériaux

perméables dont la perméance est supérieure à 600 ng/(m².s.Pa). Ils peuvent se positionner entre le revêtement intermédiaire en bois et le plâtre (voir Figure IV-24). Cela signifie que même après vieillissement, la perméabilité du béton de chanvre reste acceptable.

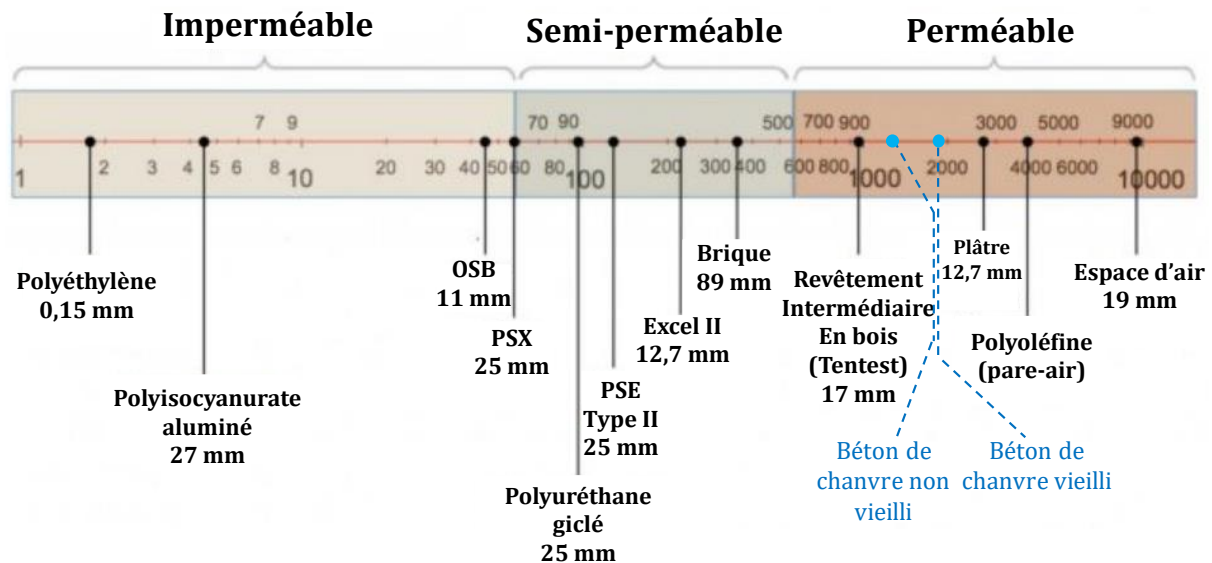


Figure IV-24. Perméance en (ng/(m².s.Pa)) de divers matériaux⁸.

f) Profondeur de pénétration et capacité de tampon d'humidité (MBV)

La capacité de tampon hydrique (MBV) est étroitement liée à la microstructure du matériau et à la qualité de ses composants. C'est pourquoi nous avons évalué le MBV de ces matériaux afin de montrer l'effet du vieillissement sur cette grandeur. Or, la mesure du pouvoir de tampon hydrique (MBV) nécessite, au préalable, la connaissance de la profondeur de pénétration du matériau en question afin de pouvoir déterminer l'épaisseur requise de l'échantillon à caractériser. En effet, la profondeur de pénétration représente celle dont l'amplitude des variations de teneur en eau ne représente que 1 % de celle en surface [169]. Elle est donnée par la relation suivante :

$$d_{p,1\%} = 4,61 \sqrt{\frac{D_w t_p}{\pi}} \quad (\text{IV-1})$$

Avec,

t_p [s] est la période de temps ;

$D_w = \frac{\delta_p P_{vsat}}{C_m}$ [m²/s] est la diffusivité d'humidité ;

⁸ <https://www.ecohabitation.com/guides/1310/migration-de-la-vapeur-deau-dans-une-paroi-coup-dil-dexpert-sur-la-permeance/>

δ_p [s] est la perméabilité à la vapeur d'eau ;

C_m [Kg/m³] est la capacité de stockage d'humidité ;

En effet, la relation (IV-1) est approximative. Elle suppose des variations sinusoïdales de la teneur en humidité, tandis que la méthode présentée dans le projet Nordtest s'applique pour des variations progressives d'humidité relative [169].

Le Tableau IV-6 montre les profondeurs de pénétration des matériaux étudiés. Une profondeur de pénétration de 3.7 cm a été enregistrée sur le matériau de référence. Après vieillissement, cette profondeur a augmenté de 18 % pour les matériaux ayant subi les cycles d'immersion/séchage et les cycles d'immersion/gel/séchage. Les matériaux ayant subi le troisième protocole de vieillissement accéléré (humidification/séchage) présentent une profondeur de pénétration pratiquement identique aux matériaux non vieillis. En général, cela s'explique par l'augmentation de la porosité totale et de la perméabilité à la vapeur d'eau. En effet, l'augmentation de ces deux paramètres permet de favoriser les variations d'humidité à l'intérieur de l'échantillon et par conséquent, la profondeur où les variations d'humidité relative ne représentent que 1% de celle en surface augmente.

Tableau IV-6. Profondeur de pénétration du béton de chanvre vieilli et non vieilli.

	Matériau	Vieilli Référence	Référence
$d_{p,1\%}(cm)$	Immersion/séchage	4.39	3.73
	Immersion/gel/séchage	4.40	
	Humidification/séchage	3.70	

Donc, pour l'étude du MBV, une épaisseur de 5 cm qui est supérieure à la profondeur de pénétration maximale a été choisie.

La Figure IV-25 illustre les résultats du MBV obtenus sur les différents matériaux. Un indice MBV de 2,3 a été obtenu sur les matériaux de référence, ce qui est conforme avec les résultats de la littérature [131]. Cette valeur du MBV, supérieure à 2, permet de classer ce matériau comme étant un excellent régulateur d'humidité. Concernant les matériaux vieillis, une diminution de 11% et de 11.5% a été enregistrée sur les matériaux qui ont subi respectivement les cycles d'immersion/séchage et les cycles d'immersion/gel/séchage. Tandis qu'une légère augmentation de 3% a été notée sur le MBV des matériaux ayant subi les cycles d'humidification/séchage, ce qui s'explique par la non agressivité de ce protocole et qui, d'après ces résultats, n'a aucun effet sur la dégradation du matériau. En effet, l'impact des deux premiers protocoles de vieillissement accéléré est plus significatif que le troisième

protocole. Cette diminution est principalement due au vieillissement de la chènevotte qui a provoqué la dégradation de sa capacité d'adsorption et de restitution d'humidité relative (régulation naturelle de l'humidité). De plus, cette diminution peut également être reliée à la diminution de la capacité de stockage d'humidité du béton de chanvre après vieillissement (voir Figure IV-21). Cependant, malgré une diminution maximale du MBV de 11 %, le béton de chanvre vieilli reste, d'après la classification du projet Nordtest, un excellent régulateur d'humidité (voir Figure II-16 du Chapitre II).

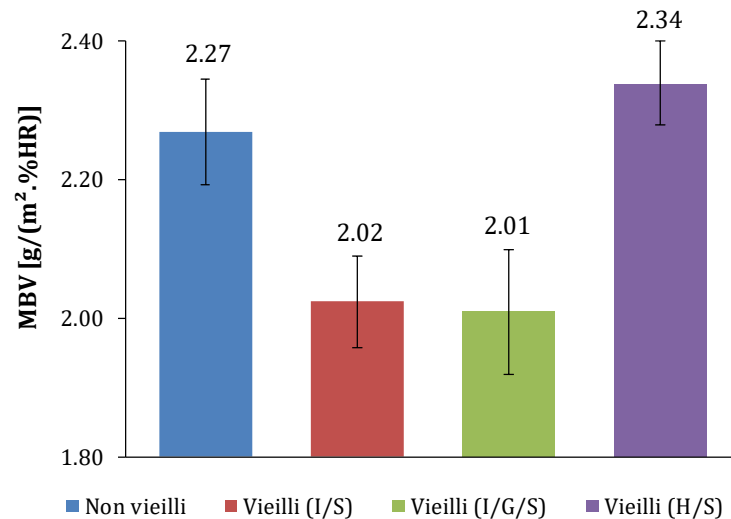


Figure IV-25. MBV du béton de chanvre vieilli et non vieilli.

Remarque

Par comparaison avec le béton de chanvre, le béton de lin est également un excellent régulateur d'humidité. La Figure IV-26 montre une comparaison du MBV du béton de lin et celui du béton chanvre. La formulation du béton de lin choisie pour la comparaison est F2-2 qui est similaire à celle du béton de chanvre. D'après ces écarts types calculés sur le MBV des deux matériaux, on peut conclure que le MBV du béton de lin est identique à celui du béton de chanvre.

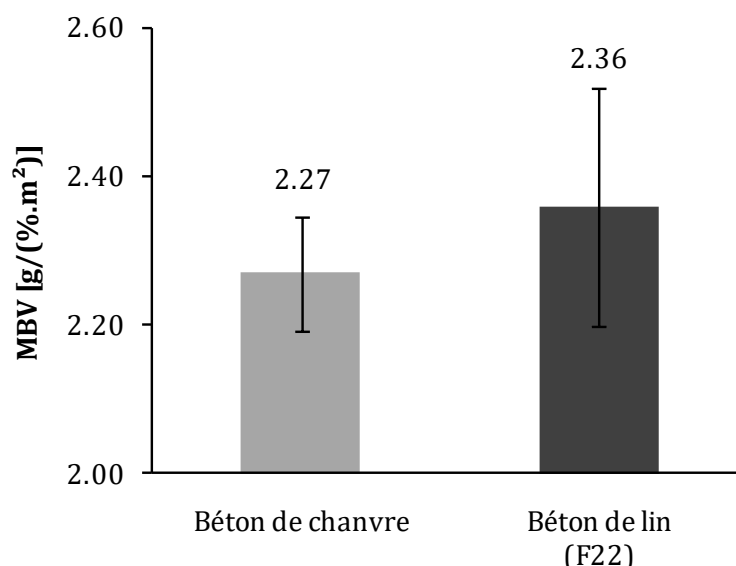


Figure IV-26. Comparaison du MBV du béton de lin à celui du béton de chanvre.

IV.2.3. Propriété mécanique

a) Résistance à la compression

Ce type de matériau présente une très faible résistance à la compression. Cette propriété reste peu importante car il s'agit d'un matériau qui est destiné pour être isolant et non pas élément porteur. Cependant, un minimum de résistance à la compression demeure nécessaire pour que le matériau puisse supporter son poids propre. C'est pourquoi nous avons décidé d'évaluer l'effet du vieillissement sur cette propriété. Les résultats illustrés dans la Figure IV-27 montrent les mesures moyennes réalisées sur trois échantillons de chaque cas du béton de chanvre. Ces résultats sont en accord avec la littérature [130,136]. Nous remarquons bien que pour tous les cas du béton de chanvre étudiés (référence et vieilli), ce matériau présente une faible résistance à la compression dont la valeur maximale enregistrée sur les matériaux de référence est de 0.94 MPa. Cette dernière diminue en fonction de l'agressivité du protocole de vieillissement appliqué. Après vieillissement, la résistance à la compression a diminué par rapport aux matériaux de référence de 28 %, 51 % et de 58 % respectivement pour les matériaux ayant subi les cycles d'humidification séchage, d'immersion/séchage et d'immersion/gel/séchage. Cela est dû, d'une part, à la dégradation et à la fragilisation de l'interface liant/chênevotte (fissures) causée par le gonflement et le rétrécissement de la chènevotte comme il a été montré précédemment par les observations microscopiques (voir section IV.2.1.), et d'autre part, à l'augmentation de la porosité totale et la modification de la microstructure suite au vieillissement appliqué, ce qui a diminué considérablement le comportement mécanique du matériau.

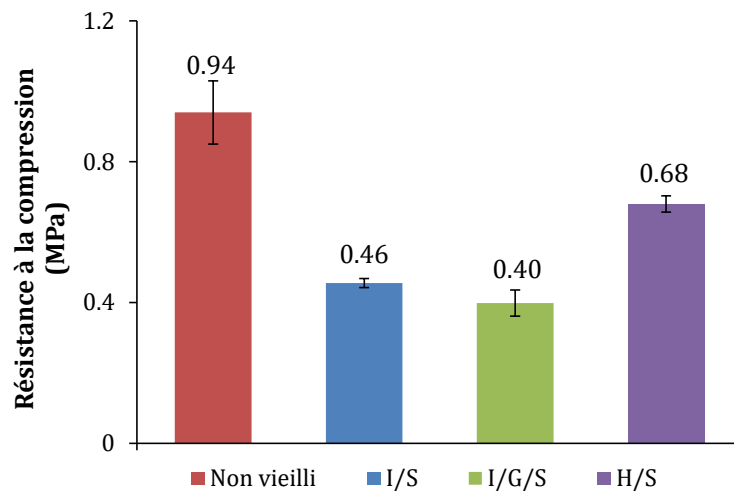


Figure IV-27. Résistance à la compression du béton de chanvre vieilli et non vieilli [MPa].

Remarque

Par comparaison avec le béton de chanvre, la résistance à la compression du béton de lin, ayant une teneur en particules végétales de 14.5%, est légèrement inférieure à celle d'une formulation similaire en béton de chanvre. Ces résultats sont présentés dans la Figure IV-28.

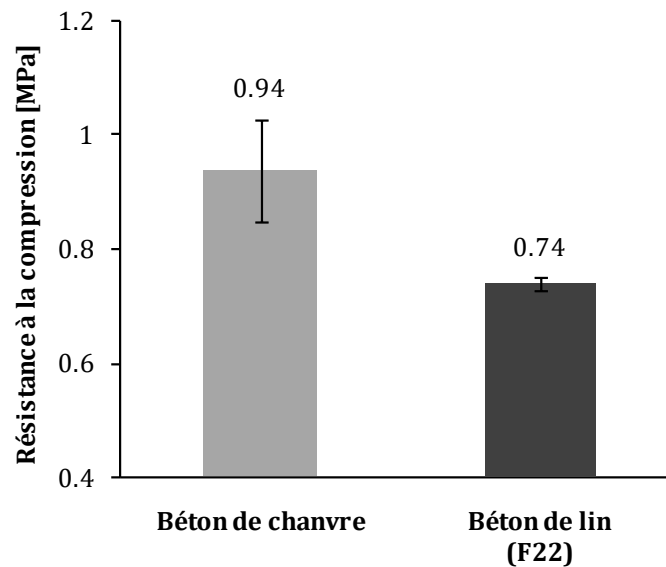


Figure IV-28. Comparaison entre la résistance à la compression du béton de lin et celle du béton de chanvre.

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre, une campagne expérimentale de caractérisation des propriétés des matériaux biosourcés étudiés a été entreprise afin de mettre en évidence l'effet du vieillissement sur le comportement hygrothermique et mécanique du béton de chanvre. Pour cette fin, les propriétés microstructurales, hygrothermiques et mécaniques des matériaux vieillis et de

référence ont été évaluées. Les résultats obtenus permettent de dégager les conclusions suivantes :

- Les propriétés thermo-hydro-mécaniques du béton de chanvre dépendent de sa microstructure et principalement, de la cohésion de l'interface liant/chènevotte. Des observations au microscope numérique (Keyence) et au MEB et des mesures de porosité ont montré l'effet du vieillissement sur la microstructure du béton de chanvre. Plusieurs fissures ont été observées dans l'interface liant/chènevotte et une augmentation maximale de 6% de la porosité totale a été enregistrée. Ces changements de la microstructure qui dépendent principalement de l'agressivité du vieillissement appliqué, engendrent : (i) une réduction du facteur de résistance à la diffusion d'humidité, de la valeur du tampon hydrique (MBV) et de la résistance à la compression, et (ii) une augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau et de la profondeur de pénétration du béton de chanvre. Cependant, nous avons constaté un effet positif du vieillissement sur la conductivité thermique. Une diminution maximale de 11 % de cette propriété a été enregistrée sur les matériaux vieillis par immersion/gel/séchage.
- L'analyse chimique effectuée sur la solution d'immersion confirme la présence du calcium, du potassium et du magnésium. Ces derniers résultent de la dissolution et de la lixiviation de certains hydrates initialement présents dans la matrice solide. Cela peut également avoir un effet sur le changement de la microstructure du béton de chanvre après vieillissement. En outre, l'analyse thermogravimétrique (ATG) a montré que la chènevotte et le liant, qu'ils soient vieillis ou non, ont pratiquement le même comportement à haute température. De petites variations des amplitudes des pics qui sont dues à la différence de la quantité du composé déshydraté ont été notées.
- Enfin, cette investigation a montré aussi que les types de protocoles de vieillissement accéléré choisis n'affectent pas le pH du béton de chanvre. Les matériaux (vieilli et non vieilli) présentaient un pH élevé d'environ 11. D'après la littérature, cela ne favorise pas la croissance des moisissures. Toutefois, le développement fongique des structures en béton de chanvre doit être surveillé dans le temps pour éviter tout risque de dégradation qui peut affecter non seulement le comportement hygrothermique et mécanique du matériau, mais aussi la santé des occupants.

Cette étude a permis, en outre, de mettre en évidence l'effet du vieillissement sur les propriétés thermo-hydro-morphiques et mécanique du béton de chanvre. Les résultats ont

permis d'enrichir les bases de données en termes des propriétés vieilles et non vieilles de ce matériau. Cette démarche permet de mieux utiliser ces matériaux lors des opérations de construction ou de réhabilitation. Ces propriétés (vieilles et non vieilles) peuvent s'avérer indispensables pour l'évaluation des techniques d'isolation et pour la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois du béton de chanvre.

Dans les chapitres précédents, nous avons axé nos investigations sur la forte dépendance des propriétés fonctionnelles des matériaux biosourcés vis-à-vis de la complexité de leurs microstructures, et ce, que ce soit par l'effet de la taille et de la teneur des particules végétales incorporées dans le matériau ou par le vieillissement. Nous nous focaliserons lors du prochain chapitre sur l'étude numérique qui contribuera, d'une part, à mettre en exergue l'importance de la prise en compte du phénomène de vieillissement des matériaux biosourcés, et d'autre part, à proposer un modèle thermo-hygro-morphique de prédiction des déformations du béton de chanvre issues des sollicitations hygrothermiques.

Chapitre V : Modélisation du comportement thermo-hygro-morphique des matériaux biosourcés : Application sur le vieillissement du béton de chanvre

V.1. Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les sollicitations climatiques, notamment les précipitations, le gel/dégel et les variations quotidiennes de l'humidité relative et de température, provoquent non seulement le gonflement et le rétrécissement des particules végétales, mais aussi la fragilisation de l'interface liant/chênevotte et la lixiviation des ions de la solution porale. Cela mène à des modifications de la microstructure du matériau, ce qui conduit, par conséquent, à la variation de ses propriétés fonctionnelles à long terme. Ainsi, la plupart des phénomènes mis en jeu à l'échelle microscopique sont à la base des phénomènes impliqués à l'échelle macroscopique.

Il a été développé, dans le cadre de ce travail, un modèle des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité « HAM ». Une validation de ce modèle a été, ensuite, entreprise en comparant les résultats des simulations obtenus avec ceux définis dans la norme EN 15026. Il a été, par la suite, recouru à l'implémentation dans le modèle développé des propriétés du béton de chanvre vieilli et non vieilli obtenues expérimentalement lors de la phase de la caractérisation (voir le chapitre IV). La finalité de ce chapitre est de mettre en évidence l'effet du vieillissement sur le comportement hygrothermique de ce matériau. Aussi, la prise en compte du comportement mécanique et notamment le gonflement des particules végétales dans le matériau a été aussi considéré en ajoutant l'équation traduisant ce phénomène dans le modèle HAM développé. Une validation du modèle thermo-hygro-morphique ainsi obtenu a été également effectuée à l'échelle microscopique. Ceci a permis de prédire avec finesse l'évolution des déformations dans le matériau.

V.2. Modèle des transferts HAM dans les milieux poreux

La modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment repose sur l'établissement des équations de conservation de masse et d'énergie. Les

équations de bilan ont été exprimées en fonction des moteurs de transferts permettant de palier aux problèmes de discontinuités rencontrés lors de l'étude des composants d'enveloppe multicouche. Ainsi, il a été adopté comme moteurs de transferts la température, la pression de vapeur et la pression totale.

V.2.1. Hypothèses du modèle

La formulation du modèle développé repose sur le modèle de Luikov et sur les différentes contributions de la littérature [89,101,170,171]. Les principales hypothèses retenues pour son développement sont récapitulées ci-après :

- ✓ Les différentes phases sont en équilibre thermodynamique en tout point du milieu poreux ;
- ✓ Le milieu solide est homogène, indéformable et non réactif ;
- ✓ Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable devant les autres modes ;
- ✓ La phase liquide est constituée de l'eau pure ;
- ✓ Le milieu poreux est homogène et isotrope ;
- ✓ La phase gazeuse obéit à la loi des gaz parfaits ;
- ✓ L'hystérésis et la réaction chimique entre phases ne sont pas prises en compte ;
- ✓ L'évolution de la teneur en eau en fonction de la température est négligée ;
- ✓ L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température et d'humidité est négligée ;
- ✓ Le transfert dû à la gravité est négligeable devant les autres modes ;

V.2.2. Equation de conservation de masse

V.3. Equation de conservation de masse

Les bilans massiques d'humidité et d'air sec ainsi que le bilan énergétique sont donnée par les équations suivantes :

$$\frac{\partial u_l}{\partial t} = -div(j_l) + \dot{m} \quad (V-1)$$

$$\frac{\partial u_v}{\partial t} = -div(j_v) - \dot{m} \quad (V-2)$$

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} = -div(j_a) \quad (V-3)$$

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -div(j_q) \quad (V-4)$$

Avec,

$\dot{m}$ [$Kg/(m^3.s)$] est le taux de changement de phase, $j_{l,v}$ [$Kg/(m^2.s)$] est la densité de flux massique de la phase liquide et vapeur respectivement, j_q [$J/(m^2.s)$] est la densité de flux de chaleur, C_p [$J/(Kg.K)$] est la capacité calorifique du matériau, $u_{l,v}$ [Kg/m^3] est la teneur en eau volumique (l : liquide et v : vapeur), u_a [Kg/m^3] est la teneur en air sec, ρ_s [Kg/m^3] est la masse volumique sèche,

a) Transfert de la phase liquide

Dans les matériaux poreux partiellement saturés, le transfert de masse s'opère principalement sous deux formes qui se produisent simultanément. Il s'agit du transfert liquide et celui de la vapeur. Pour la clarté du manuscrit, ces deux modes seront présentés séparément. Le transfert de la phase liquide est régi par un gradient de la pression capillaire. Il est obtenu par l'application de la loi de Darcy. La densité du flux massique de la phase liquide est alors exprimée par la relation (V-5) :

$$j_l = -k_l \nabla P_c - k_{fl} \nabla P \quad (V-5)$$

Puisqu'il est supposé un équilibre local entre la phase gazeuse et la phase liquide, la loi de Kelvin est donc applicable. Cette loi est utilisée pour pouvoir exprimer le gradient de pression capillaire comme étant une combinaison du gradient de pression de vapeur et de température. La loi de Kelvin est donnée par l'expression (V-6):

$$P_c = \frac{RT\rho_l}{M} \ln(HR) = \frac{RT\rho_l}{M} \ln\left(\frac{P_v}{P_{vsat}}\right) \quad (V-6)$$

Vu que la pression de vapeur saturante dépend de la température, le gradient de température apparaît dans le terme ∇P_c en plus du gradient de pression de vapeur comme il est montré par l'expression (V-7) :

$$\nabla P_c = \left(\frac{R\rho_l}{M} \ln\left(\frac{P_v}{P_{vsat}}\right) + \frac{RT\rho_l}{M} \frac{\partial \ln\left(\frac{P_v}{P_{vsat}}\right)}{\partial T} \right) \nabla T + \frac{RT\rho_l}{M.P_v} \nabla P_v \quad (V-7)$$

Avec,

P_c [Pa] est la pression capillaire, R [J/(mol.K)] est la constante des gaz parfaits, HR [%] est l'humidité relative, T [K] est la température, P_v [Pa] est la pression de vapeur, M [Kg/mol] est la masse molaire de l'eau, ρ_l [Kg/m^3] est la masse volumique de l'eau, k_l [$Kg/(m.s.Pa)$] est la conductivité hydraulique, k_{fl} [$Kg/(m.s.Pa)$] est le coefficient d'infiltration liquide,

En introduisant l'équation (V-7) dans l'équation (V-5), on aura :

$$j_l = -k_l \left(\frac{R\rho_l}{M} \ln \left(\frac{P_v}{P_{vsat}} \right) + \frac{RT\rho_l}{M} \frac{\partial \ln \left(\frac{P_v}{P_{vsat}} \right)}{\partial T} \right) \nabla T - k_l \frac{RT\rho_l}{M.P_v} \nabla P_v - k_{fl} \nabla P \quad (V-8)$$

Pour simplifier, on pose :

$$j_l = -K_l^T \nabla T - K_l^P \nabla P_v - k_{fl} \nabla P \quad (V-9)$$

Avec,

$[K_l^P] = k_l \frac{RT\rho_l}{MP_v} \left[\frac{kg}{m.s.Pa} \right]$ est le coefficient de transfert de la phase liquide gouverné par un gradient de pression de vapeur d'eau,

$[K_l^T] = k_l \left(\frac{R\rho_l}{M} \ln \left(\frac{P_v}{P_{vsat}} \right) + \frac{RT\rho_l}{M} \frac{\partial \ln \left(\frac{P_v}{P_{vsat}} \right)}{\partial T} \right) \left[\frac{kg}{m.s.K} \right]$ est le coefficient de transfert de la phase liquide dû à un gradient de température,

b) Transfert de la phase vapeur

Le transfert de la phase vapeur est un processus diffusif sous un gradient de pression de vapeur, régit par la loi de Fick. La densité de flux de vapeur massique est alors donnée par l'expression (V-10) :

$$j_v = -\delta_p \nabla P_v - k_{fv} \nabla P \quad (V-10)$$

Avec,

j_v [Kg/(m².s)] est la densité de flux massique de vapeur, δ_p [Kg/(m.s.Pa)] est la perméabilité à la vapeur d'eau, k_{fv} [Kg/(m s Pa)] est le coefficient d'infiltration vapeur.

Enfin, en additionnant les équations (V-1) et (V-2), le flux global d'humidité ($j_m = j_l + j_v$) obtenu s'exprime par l'équation du bilan massique suivante :

$$\rho_s C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}((K_l^P + \delta_p) \nabla P_v + K_l^T \nabla T + k_f \nabla P) \quad (V-11)$$

Avec :

$C_m = \frac{1}{P_{vsat}} \frac{\partial w}{\partial HR} = [Kg/(Kg.Pa)]$ Est la capacité de stockage d'humidité du matériau ;

c) Transfert de la phase gazeuse

En effet, dans le cas de la présence d'un gradient de pression totale, un transfert d'air sec et humide par un processus d'infiltration se présente et doit être pris en compte dans le bilan total. Ce phénomène qui est régi par un gradient de pression totale est exprimé comme suit [85,96]:

$$j_a + j_v = -k_f \nabla P \quad (\text{V-12})$$

Avec k_f [kg/(m.s.Pa)] est le coefficient d'infiltration totale,

En injectant l'équation (V-12) dans le bilan de pression totale, on obtient :

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} = \text{div}(k_f \nabla P) - \dot{m} \quad (\text{V-13})$$

Avec :

$$u_g = u_v + u_a = \varepsilon \frac{\rho_g}{\rho_s} (1 - S_l) \quad (\text{V-14})$$

$\rho_g = PM/RT$; ε [–] est la porosité du milieu et S_l [–] son degré de saturation.

L'équation (V-13) devient alors comme suit :

$$\frac{\partial(\varepsilon \frac{\rho_g}{\rho_s} (1 - S_l))}{\partial t} = \text{div}(k_f \nabla P) - \dot{m} \quad (\text{V-15})$$

En procédant par une dérivation partielle de l'équation (14), on aura [96]:

$$d\left(\frac{PM\varepsilon}{\rho_s RT} (1 - S_l)\right) = \frac{M\varepsilon}{\rho_s RT} (1 - S_l) dP \quad (\text{V-16})$$

Enfin, en introduisant l'équation (V-14) dans l'équation du bilan de la phase gazeuse, on aura :

$$C_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(k_f \nabla P) - \dot{m} \quad (\text{V-17})$$

Avec, $C_a = \frac{M\varepsilon}{\rho_s RT} (1 - S_l)$ [s²/m²] est la capacité de l'air humide,

d) Transfert d'énergie

Dans les milieux poreux partiellement saturés, le transfert de chaleur se produit sous trois formes : une conduction exprimée par la loi de Fourier, une convection à travers les flux

liquide et vapeur et enfin, un transfert de chaleur latente dû aux changements de phases. La densité du flux de chaleur est exprimée comme suit [96]:

$$j_q = -\lambda \nabla T + h_l j_l + h_v j_v \quad (V-18)$$

Avec,

$$h_l = c_l(T - T_{ref}) \text{ et } h_v = c_l(T - T_{ref}) + L_v = h_l + L_v \quad (V-19)$$

A partir de la relation (V-19), la densité du flux de chaleur devient :

$$j_q = -\lambda \nabla T + h_l j_m + L_v j_v \quad (V-20)$$

Avec,

L_v [J/Kg] est la chaleur latente d'évaporation, h_l, h_v [J/Kg] sont les enthalpies massiques de l'eau liquide et de la vapeur d'eau respectivement, c_l [J/(Kg.K)] est la capacité thermique massique, T_{ref} [K] est la température de référence, λ [W/(m.K)] est la conductivité thermique du matériau,

En injectant les expressions des densités de flux liquide (V-9) et de vapeur (V-10) dans la relation (V-20), la densité du flux de chaleur devient :

$$j_q = -(\lambda + h_l K_l^T) \nabla T - (h_l(K_l^P + \delta_p) + L_v \delta_p) \nabla P_v - (h_l K_f + L_v K_{fv}) \nabla P \quad (V-21)$$

Enfin, on introduisant l'expression (V-21) dans l'équation du bilan de conservation d'énergie, on aura :

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda^* \nabla T + \chi \nabla P_v + \gamma \nabla P) \quad (V-22)$$

Avec :

$\lambda^* = (\lambda + h_l K_l^T)$ [W/(m.K)] est le coefficient de transfert thermique par conduction dû à un gradient de température, $\chi = (h_l(K_l^P + \delta_p) + L_v \delta_p)$ [W/(m.Pa)] est le coefficient de transfert de chaleur par convection dû au gradient de pression de vapeur, $\gamma = (h_l K_f + L_v K_{fv})$ est le coefficient de transfert thermique dû à un gradient de pression totale,

Enfin, le système d'EDP traduisant le modèle de prédiction du comportement hygrothermique proposé est le suivant :

$$\begin{cases} \rho_s C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}((K_l^P + \delta_p) \nabla P_v + K_l^T \nabla T + k_f \nabla P) \\ \rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda^* \nabla T + \chi \nabla P_v + \gamma \nabla P) \\ C_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(k_f \nabla P) \end{cases} \quad (\text{V-23})$$

Les conditions aux limites sont d'une grande importance dans la simulation numérique afin d'avoir une prédiction précise et proche des cas réalistes en termes de flux d'air à la limite du matériau. Dans notre cas, il a été supposé que la pression totale est constante et les conditions aux limites adoptées sont de type flux imposé. Le flux de chaleur (q) et le flux de masse (g) sont évalués aux interfaces air/matériau comme suit [100]:

$$\begin{aligned} q &= h_c (T_{air} - T_{surf}) \\ g &= h_m (P_{v,air} - P_{v,surf}) \end{aligned} \quad (\text{V-24})$$

V.3.1. Validation du modèle

Pour pouvoir utiliser avec confiance le modèle développé, il est indispensable de le valider expérimentalement ou avec des solutions analytiques dans le cas où elles existent. Dans notre cas, la validation consiste à confronter les résultats de simulation numérique obtenus par notre modèle avec des résultats définis dans la norme EN 15026. Le test proposé par la norme consiste à étudier un matériau homogène très épais de 20 mètres (mur semi-infini) et de reproduire les profils de température et de teneur en eau après 7, 30 et 365 jours. Les conditions initiales et aux limites adoptées sont de type Dirichlet. Elles sont données dans la Figure V-1:

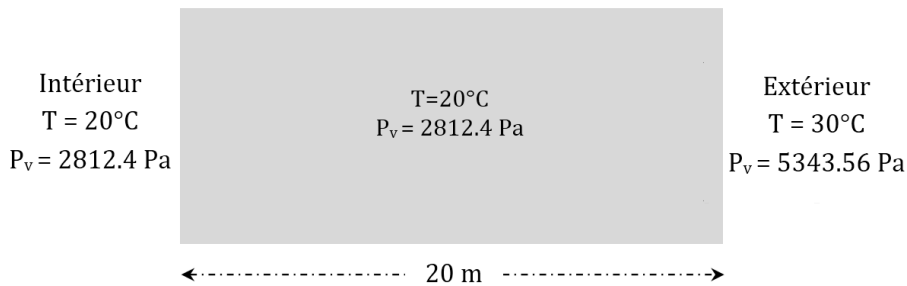


Figure V-1. Conditions initiales et aux limites du modèle.

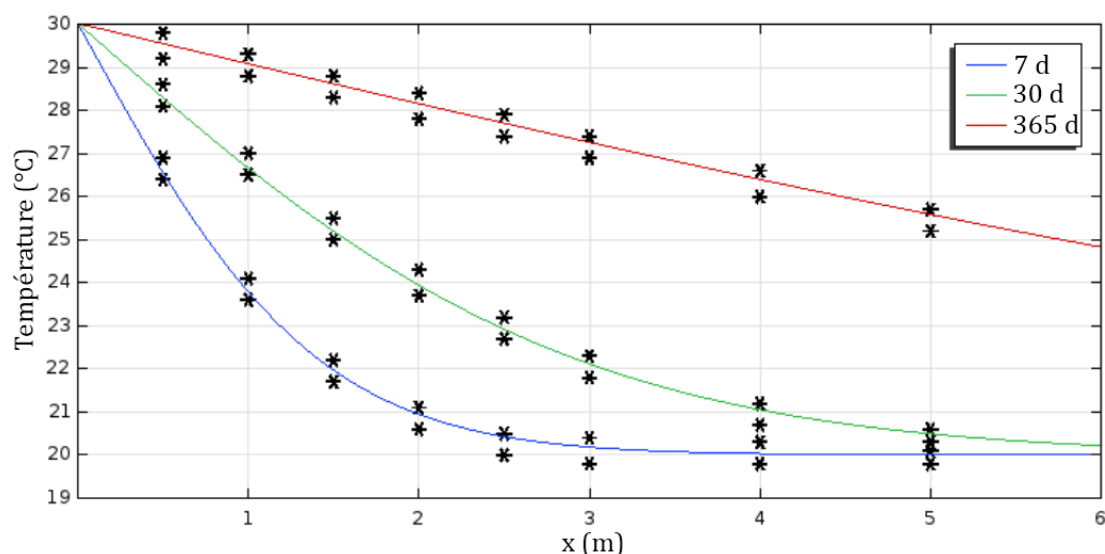
Les paramètres d'entrée du modèle sont récapitulés dans le Tableau V-1 (EN 15026) :

Tableau V-1 Paramètres d'entrées du modèle numérique.

Désignation	Paramètres
Conductivité thermique	$\lambda = 1.5 + 15.8e - 3 * w$
Conductivité hydraulique	$kl = \exp(-39.2619 + 0.0704 * (w - 146/2) - 1.7420e - 4 * (w - 146/2)^2 - 2.7953e - 6 * (w - 146/2)^3 - 1.1566e - 7 * (w - 146/2)^4 + 2.5969e - 9 * (w - 146/2)^5)$
Perméabilité à la vapeur d'eau	$\delta_p = (0.01801528/R_const/293.15 * 26.1e - 6/200 * (1 - w/146)/((1 - 0.497) * (1 - w/146)^2 + 0.497))$
Isotherme de sorption	$W = (146/(1 + (-8e - 8 * 462 * 293.15 * 1000 * \log(HR))^{1.6})^{0.375}$
Capacité de stockage d'humidité	$Cm = \frac{\partial w}{\partial HR}$

Vu la complexité et le caractère fortement couplé des équations aux dérivées partielles décrivant les phénomènes des transferts de chaleur, d'air et d'humidité, la résolution a été faite par la méthode des éléments finis en ayant recours à l'environnement de simulation Comsol Multiphysics. Ce solveur permet la résolution d'une variété de problèmes de recherche et d'ingénierie, notamment le traitement de problèmes multi-physiques où plusieurs phénomènes sont impliqués simultanément comme le transfert couplé de chaleur et d'humidité.

La confrontation numérique et expérimentale des profils de température et de teneurs en eau est donnée respectivement dans la Figure V-2 et la Figure V-3.

**Figure V-2.** Comparaison entre les profils de température obtenus numériquement (lignes continues) avec ceux de la norme EN 15026 (Astérisques)

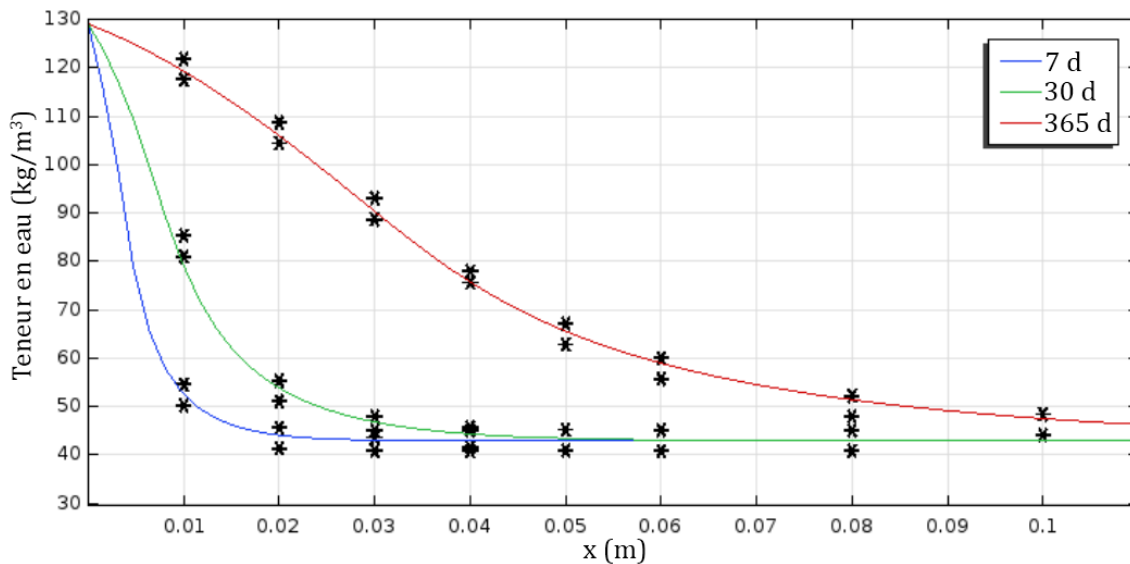


Figure V-3. Comparaison entre les profils de teneur en eau obtenus numériquement (lignes continues) avec ceux de la norme EN 15026 (Astérisques).

Ces résultats montrent clairement que le modèle développé permet de reproduire fidèlement les profils de température et de teneur en eau proposés par la norme EN 15026. De plus, satisfaire la norme signifie que les résultats numériques correspondent aux résultats expérimentaux avec une tolérance de 2.5%. Sur la base de ces résultats, il est conclu que le modèle proposé est capable de prédire finement le comportement hygrothermique de ce type de matériau proposé par la norme.

V.4. Effet du vieillissement sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre

Dans cette partie, nous allons reprendre les propriétés du béton de chanvre vieilli et non vieilli définies dans le (chapitre IV) afin d'alimenter le modèle développé. Le but étant de mettre en évidence l'effet du vieillissement sur le comportement hygrothermique de ce matériau. Les propriétés vieilles et non vieilles du béton de chanvre sont récapitulées dans le Tableau V-2. Ces dernières représentent les paramètres d'entrées du modèle numérique.

Tableau V-2 Propriétés utilisées pour l'alimentation du modèle numérique

	Non vieilli	Vieilli (I/G/S)
Masse volumique [kg/m³]	484.56	480.27
Conductivité thermique [mW/m.K]	100.73	89.42
Chaleur spécifique [J/(kg.K)]	872.34	902.60
Perméabilité à la vapeur d'eau [kg/(m.s.Pa)]	2.85×10^{-11}	3.94×10^{-11}

Les isothermes d'adsorption et les capacités de stockage d'humidité du béton de chanvre sont présentées dans la Figure V-4.

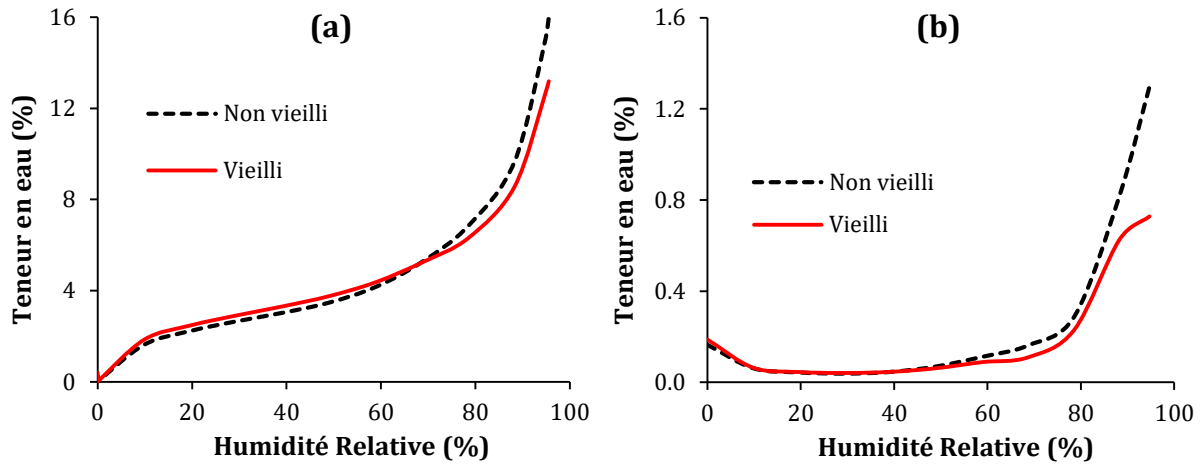


Figure V-4. (a) isotherme d'adsorption et (b) capacité de stockage d'humidité du béton de chanvre vieilli (par immersion/gel/séchage) et non vieilli.

V.4.1. Configurations étudiées

a) Premier cas (T constante et HR variable)

La configuration proposée dans cette étude est schématisée dans la Figure V-5. Elle consiste à simuler le comportement hygrothermique d'un échantillon en béton de chanvre de 20 cm d'épaisseur exposé à un flux d'humidité sur sa surface principale pendant 72 heures. Les autres facettes de l'échantillon sont isolées afin d'assurer un transfert unidirectionnel. La pression totale est considérée constante dans ce cas de figure. Les conditions initiales et aux limites de type flux imposé sont également présentées dans la Figure V-5. Les flux de chaleur (q) et de masse (g) sont donnés comme suit [100]:

$$q = h_c (T_{air} - T_{surf}) \quad (V-25)$$

$$g = h_m (P_{v,air} - P_{v,surf}) \quad (V-26)$$

Avec,

$$h_c [W/(m^2 \cdot K)]$$

Coefficient de transfert de chaleur convectif,

$$h_m = \frac{9.23 \cdot 10^{-5} T}{S_d P_{atm}} [m/s]$$

Coefficient de transfert de masse convectif calculé par la méthode de Lewis,

$$S_d = \mu d [m]$$

Résistance à la diffusion de la vapeur exprimée en (m). elle exprime l'épaisseur d'air de même résistance que le matériau,

$$d [m]$$

Epaisseur de l'échantillon étudié,

$$\mu [-]$$

Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau,

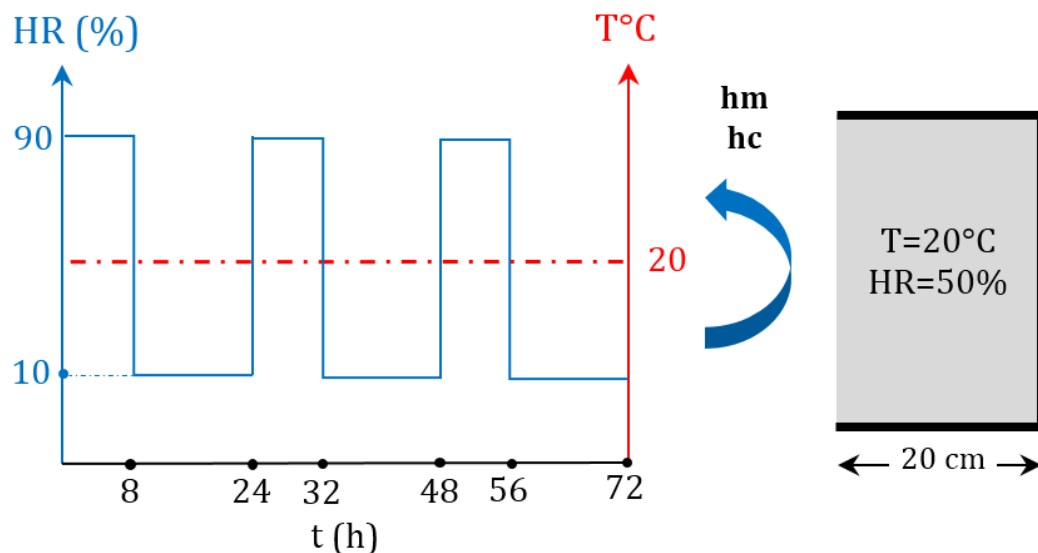


Figure V-5. Schéma montrant les sollicitations hydriques et thermiques appliquées.

Les profils d'humidité relative du béton de chanvre vieilli et non vieilli sont présentés dans la Figure V-6. Compte tenu de ces résultats, il a été remarqué que le béton de chanvre vieilli présente un comportement hydrique différent de celui de référence (non vieilli). Des écarts en humidité relative de 12 % et de 9 % ont été respectivement enregistrés à $t = 1100$ minutes et à $t = 1430$ minutes (voir Figure V-6). Ces écarts sont dus, sans doute, à la modification de la microstructure du matériau après vieillissement suite à la sensibilité des particules végétales aux variations hydriques et thermiques (gonflement/rétrécissement). Cela a été clairement confirmé par les observations microscopiques et par l'augmentation de la porosité totale à l'eau d'environ 6 % (voir chapitre IV).

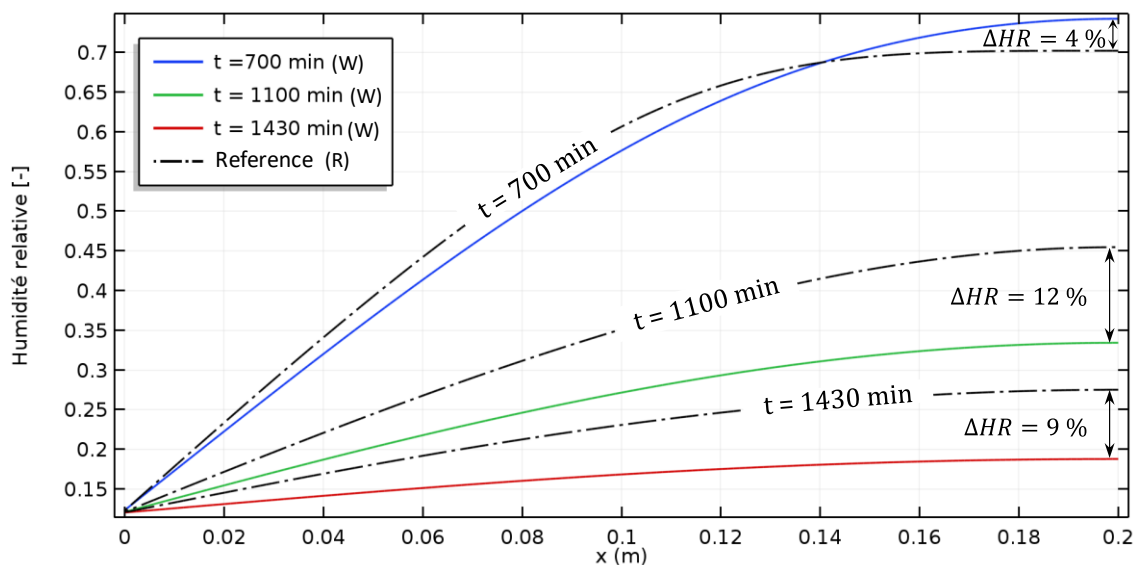


Figure V-6. Cas isotherme : Profils d'humidité relative du béton de chanvre vieilli et non vieilli : (en noir : matériau non vieilli et en couleur : matériau vieilli).

En effet, la modification de la microstructure du béton de chanvre après vieillissement implique des changements de la porosité totale et de la distribution de la taille des pores, ce qui modifie les paramètres physiques des transferts à l'intérieur du matériau et engendre des modifications significatives des valeurs des propriétés hydriques et thermiques du matériau (voir Chapitre IV), d'où les écarts constatés.

De plus, il a été également constaté que la cinétique de transfert d'humidité a été amplifiée après vieillissement. Cette amplification est principalement due à l'augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau vieilli, ce qui s'est traduit par une diminution du facteur de résistance à la diffusion d'humidité. Ceci peut être observé sur la Figure V-7 qui présente l'évolution d'humidité relative en fonction du temps. En effet, lors de l'humidification, la courbe traduisant l'évolution temporelle de l'humidité relative du matériau vieilli passe au-dessus de celle de référence (non vieilli) avec des amplitudes relativement plus importantes. Cependant, dans le cas de séchage, elle passe au-dessous (voir Figure V-7) afin d'atteindre l'humidité relative de consigne plus vite que le matériau de référence en raison de la diminution du facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. Autrement dit, le matériau est devenu plus perméable après vieillissement.

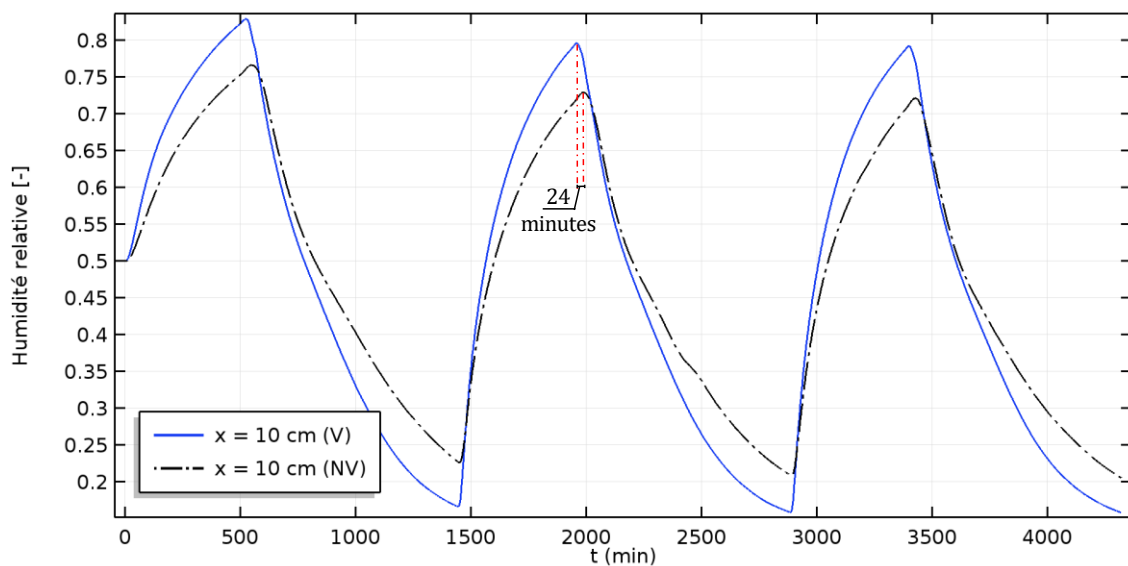


Figure V-7. Cas isotherme : évolution de l'humidité relative du béton de chanvre vieilli et non vieilli (V : Vieilli ; NV : Non Vieilli).

Par ailleurs, un léger déphasage entre le comportement des deux matériaux peut également être noté (Figure V-7). En effet, un déphasage maximal de 24 minutes a été enregistré. Cela donne une information sur la réponse des matériaux aux sollicitations climatiques extérieures. Ainsi, ce résultat montre que le béton de chanvre vieilli répond plus rapidement.

Concernant l'évolution de la température, la différence était pratiquement négligeable et moins marquante entre les deux états du béton de chanvre (voir Figure V-8). Cela peut s'expliquer par le caractère isotherme pris comme hypothèse de l'étude. Malgré cela, de très faibles variations de température ont été observées pour chaque changement du point de consigne de l'humidité relative. Cela est principalement dû aux transferts de chaleur gouvernés par un gradient d'hygrométrie, notamment les transferts latents dus au changement de phase, pris en compte dans le modèle développé.

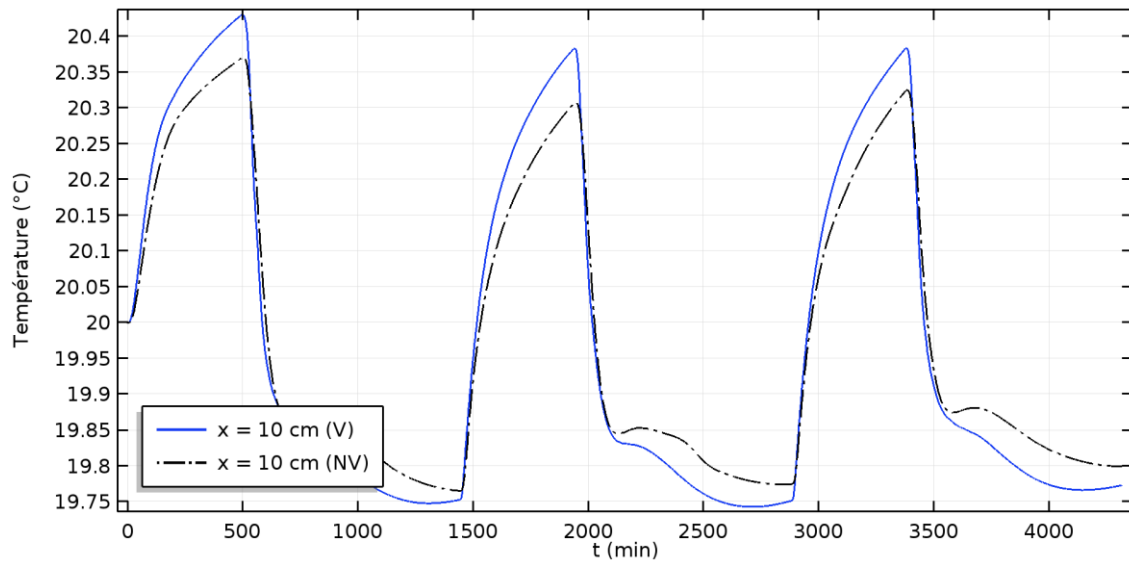


Figure V-8. Cas isotherme : évolution de la température du béton de chanvre vieilli et non vieilli.

b) Deuxième cas (T et HR variables)

Dans ce deuxième cas d'étude, on s'intéresse au comportement des mêmes échantillons décrits précédemment soumis à des conditions climatiques variables. Dans ce cas, l'échantillon sera exposé à un flux unidirectionnel d'humidité et de température respectivement de 80% et de 20°C pendant 72 heures, suivi de 10% et de 5°C pendant 8 heures (Figure V-9). Les conditions aux limites sont de type flux imposé.

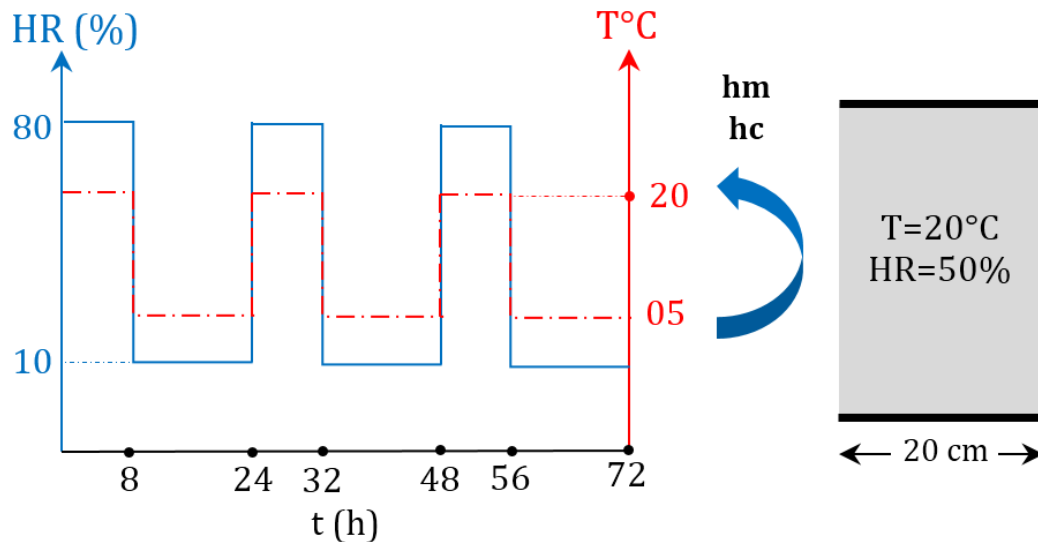


Figure V-9. Sollicitation climatique dynamique appliquées.

La Figure V-10 et la Figure V-11 montrent respectivement les profils spatiaux et temporels de température des deux états du matériau étudié. D'après ces résultats, les écarts de températures enregistrés entre le cas vieilli et non vieilli sont quasiment négligeables (limité à 1°C).

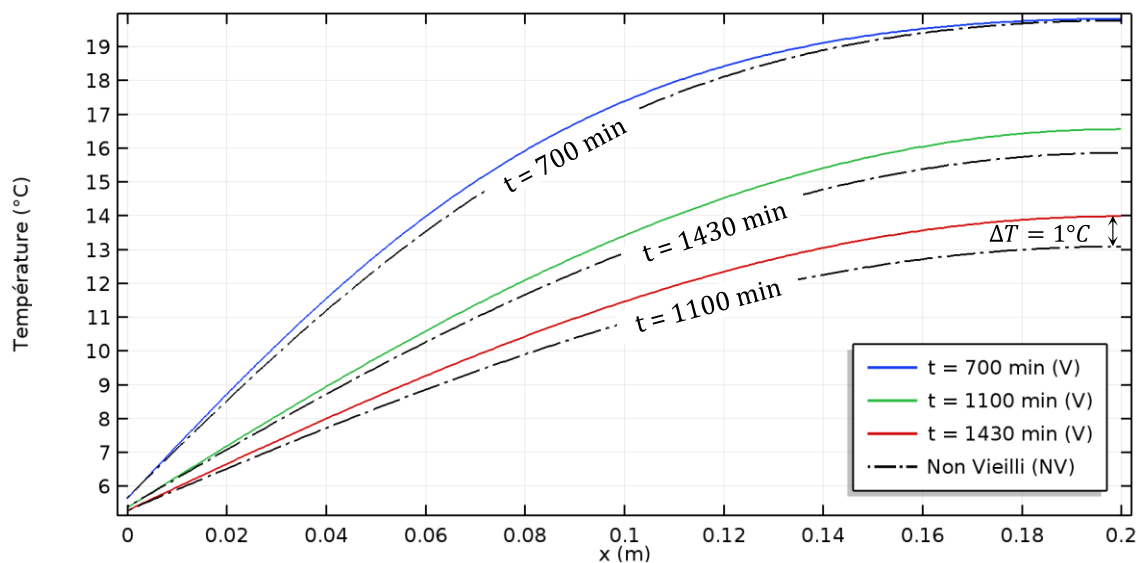


Figure V-10. Cas non isotherme : Profils de température du béton de chanvre vieilli et non vieilli.

Néanmoins, on peut remarquer lors du séchage, que le matériau vieilli présente une cinétique de transfert de chaleur relativement plus lente que le matériau non vieilli avec des amplitudes moins importantes (Figure V-11). Cela peut s'expliquer par la diminution de la conductivité thermique après vieillissement. En effet, la diminution de la conductivité thermique implique l'augmentation de la résistance thermique, ce qui permet d'amortir la transmission de la chaleur dans le matériau et d'avoir, par conséquent, une faible cinétique de transfert de

chaleur. Cependant, lors de l'humidification, les deux courbes sont pratiquement confondues et la cinétique de transfert semble plutôt faible pour le matériau de référence. Cela peut s'expliquer par les apports des transferts de masse qui influent sur les transferts de chaleur (phénomène couplés de chaleur et d'humidité).

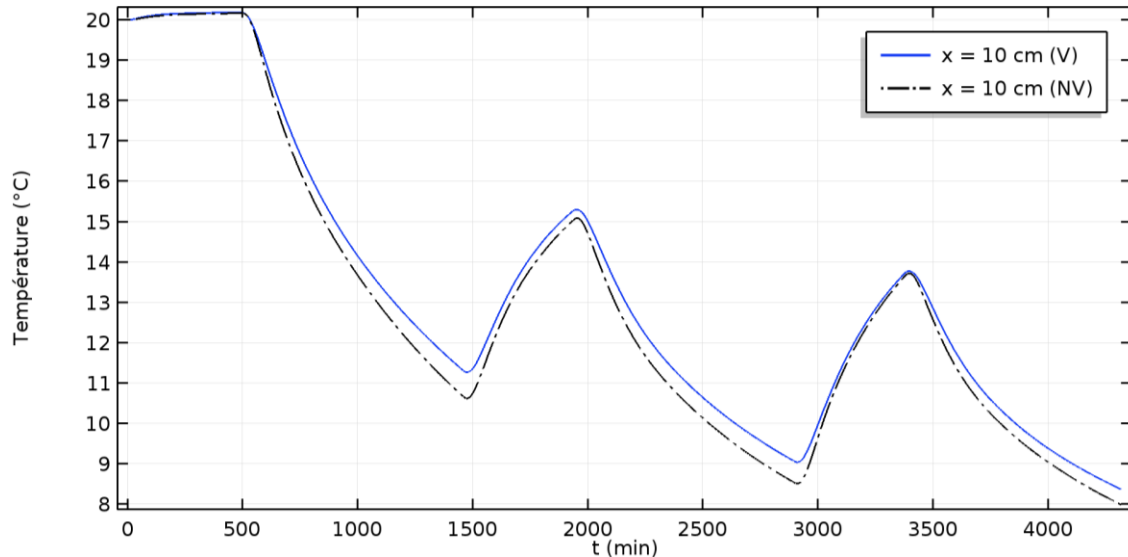


Figure V-11. Cas non isotherme : Evolution de la température au cours du temps du béton de chanvre vieilli et non vieilli.

Par ailleurs, la Figure V-12 montre les profils d'humidité relative des deux cas de matériau étudié. Un écart maximal de 18% a été enregistré à $t=1430$ minutes (Figure V-12). Comme nous l'avons constaté dans la première configuration (cas isotherme), le matériau vieilli présente une cinétique de transfert de masse supérieure à celle du matériau non vieilli. Ce qui s'explique par l'augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau et la diminution du facteur de résistance à la diffusion après vieillissement. Ces écarts entre les cinétiques de transfert hydrique entraînent par conséquent, des écarts non négligeables en terme d'humidité relative entre le cas vieilli et non vieilli.

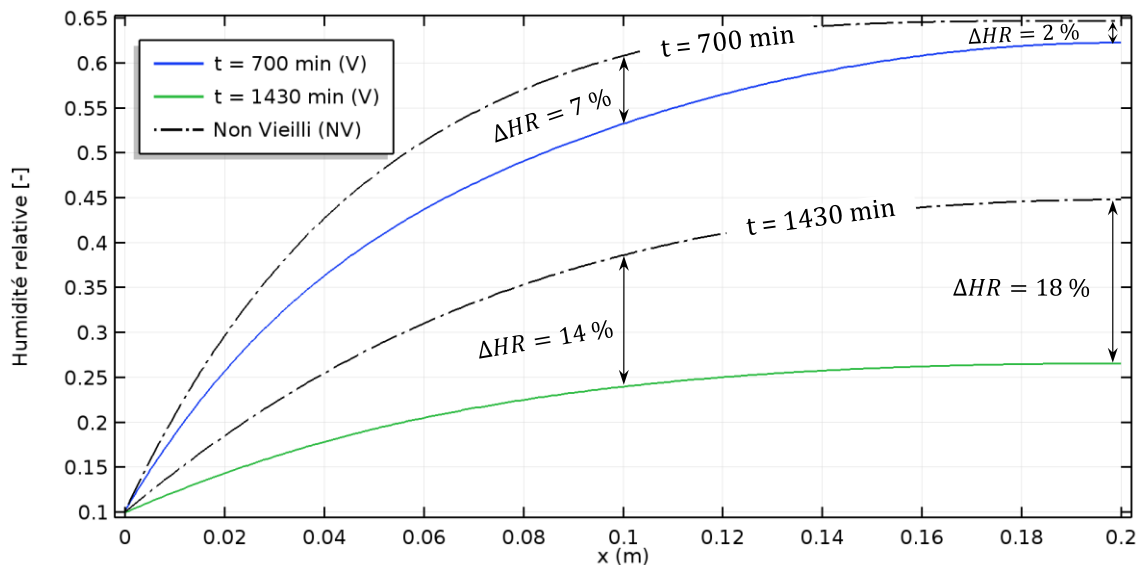


Figure V-12. Cas non isotherme : Profils d'humidité relative du béton de chanvre vieilli et non vieilli.

De plus, on peut clairement remarquer que les écarts constatés dans ce cas (non isotherme) sont beaucoup plus importants que ceux constatés dans la première configuration (cas isotherme). Cela est dû au fait que dans le modèle de prédiction du comportement hygrothermique développé, il a été pris en compte les apports des transferts de masse régis par un gradient de température. En effet, l'humidité relative est étroitement liée à la température. Cela influe localement sur le taux d'humidité dans le matériau causant, par voie de conséquence, une redistribution de l'humidité relative dans le matériau. De plus, un gradient de température provoque un gradient de concentration (effet Soret) connu également sous le phénomène de la thermo diffusion [88,91,172].

Dans la Figure V-13, nous pouvons remarquer également que la cinétique des transferts hydriques est plus importante dans le cas du béton de chanvre vieilli. Comme nous l'avons vu précédemment, les profils d'humidité relative du matériau vieilli passent au-dessus et au-dessous de ceux du matériau de référence, respectivement en humidification et en séchage. Cela peut donc affirmer l'hypothèse annoncée auparavant sur la cinétique du transfert de chaleur qui a été impactée par les transferts de masse. De plus, un déphasage maximal de 40 minutes peut être noté au niveau des points d'inversion (changement des conditions de consigne).

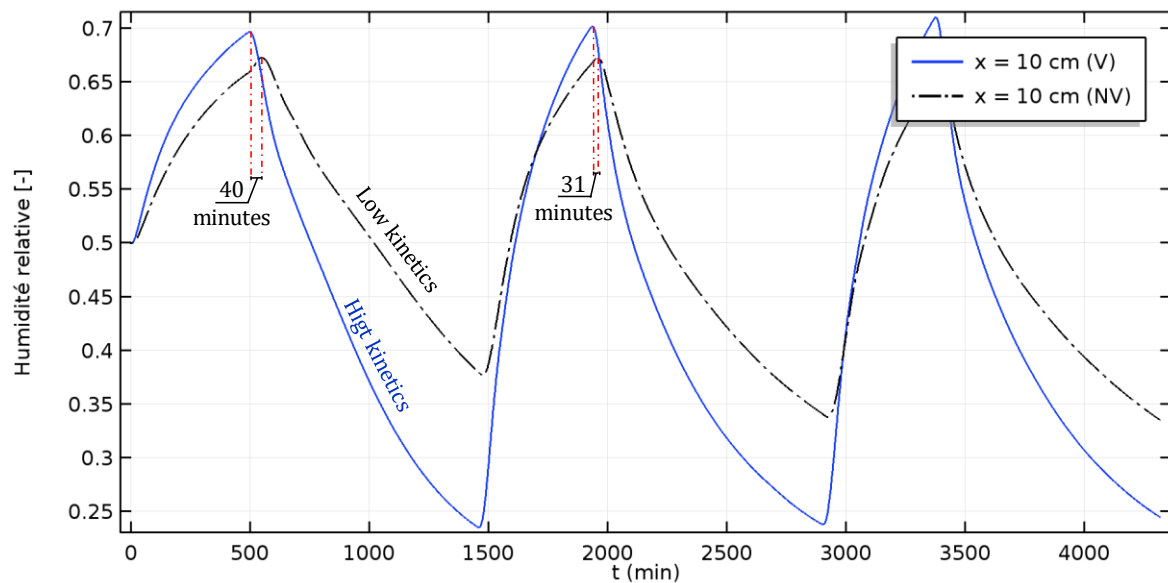


Figure V-13. Cas non isotherme : Evolution de l'humidité relative du béton de chanvre vieilli et non vieilli.

V.4.2. Effet du vieillissement sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre : Application à l'échelle de la paroi

Afin de montrer l'effet du vieillissement à une échelle plus représentatives, des simulations unidimensionnelles supplémentaires sont réalisées. Cela permettra d'évaluer l'impact des effets du vieillissement des matériaux sur l'évaluation de l'efficacité énergétique des bâtiments. Un mur de 20 cm d'épaisseur, construit avec du béton de chanvre, est soumis aux variations climatiques réelles de la ville de La Rochelle, en France. Les conditions aux limites intérieures et extérieures sont données dans la Figure V-14. Une légère augmentation des deux champs se produit pendant la période estivale. La condition initiale est $T = 20^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 50\%$. L'investigation a été effectuée pendant un an dans les deux configurations. La première suppose un matériau de référence, avec les propriétés du matériau non vieilli. La seconde prend en compte une paroi avec des propriétés du matériau vieilli. L'impact sur l'efficacité énergétique est évalué par le calcul des différents flux de chaleur interne j_q et du flux d'humidité interne j_m .

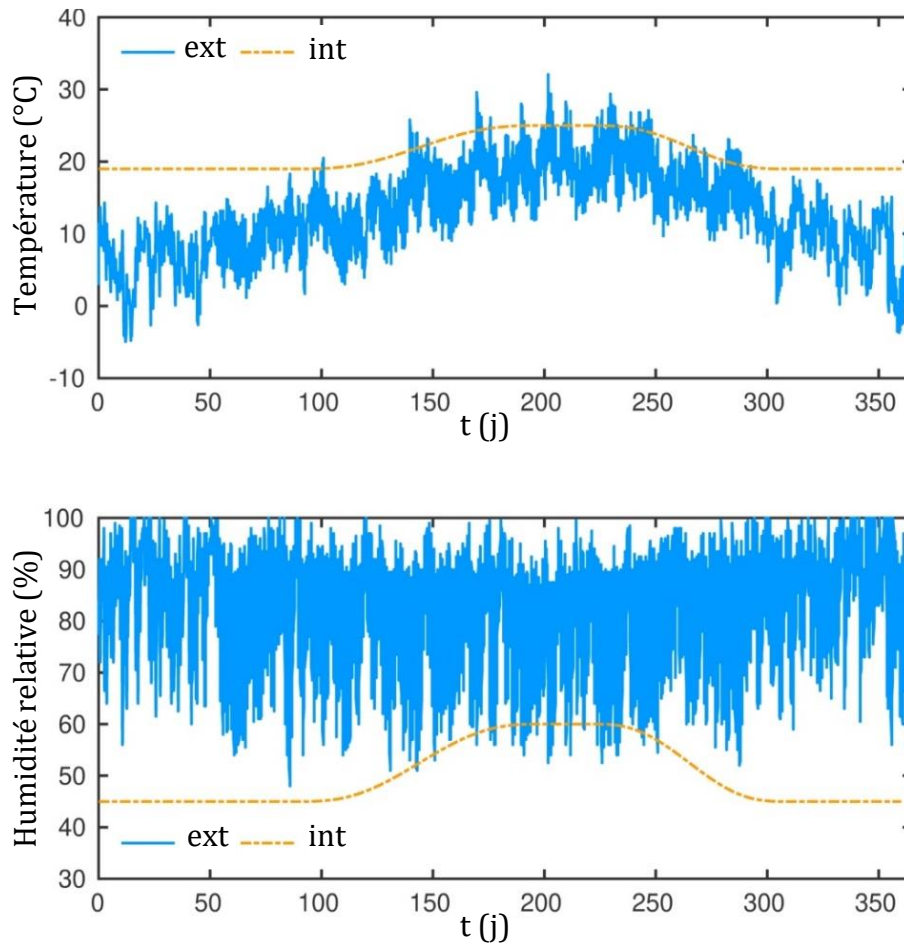


Figure V-14. Conditions aux limites intérieures et extérieures appliquées au mur étudié.

Les Figure V-15 (a, b et c) montrent respectivement l'évolution dans le temps du flux de chaleur latent, sensible et total. Le flux de chaleur sensible est surestimé dans la simulation tenant compte des propriétés du matériau de référence. Inversement, le flux de chaleur latente est sous-estimé pour la même configuration. Ces résultats sont cohérents avec ceux présentés précédemment et avec les modifications constatées sur les propriétés macroscopiques des matériaux, en particulier la perméabilité à la vapeur, la capacité de stockage d'humidité et la conductivité thermique. Nous pouvons remarquer que le flux total est plus élevé dans la configuration de référence. En conséquence, l'efficacité thermique est améliorée avec les matériaux vieilliss.

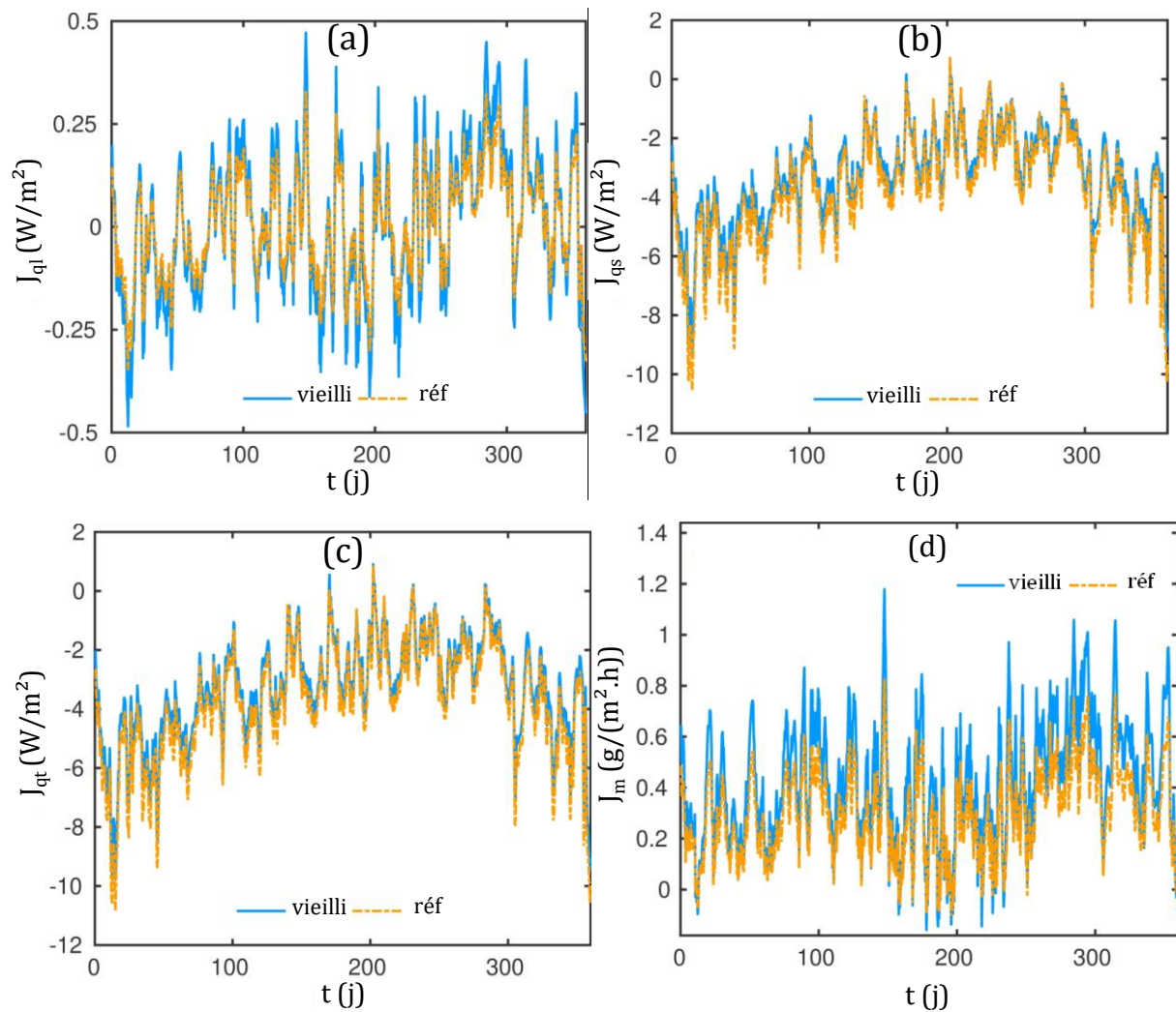


Figure V-15. Évolution temporelle des flux de chaleur (a) latente, (b) sensible et (c). (d) Évolution temporelle de l'humidité sur la face intérieure du mur.

Par ailleurs, la Figure V-15(d) donne l'évolution temporelle du flux d'humidité intérieur. Dans la plupart des cas, la différence entre le flux d'humidité dans les deux configurations est négative. Ainsi, l'ampleur du flux d'humidité est plus élevée pour le matériau vieilli. Par conséquent, plus d'humidité est libérée de la paroi vers la zone d'air intérieur dans le cas du matériau vieilli. Ceci est principalement dû aux modifications microstructurales constatées après vieillissement, notamment l'augmentation de la porosité totale et de la perméabilité à la vapeur d'eau.

En fait, ces résultats ne concernent que ce type de vieillissement accéléré (immersion/gel/séchage). Compte tenu de l'agressivité du protocole de vieillissement accéléré, il est important de noter que ces résultats reflètent le cas de dégradation extrême que le béton de chanvre peut subir après plusieurs années d'utilisation dans des climats sévères comme il est le cas au Canada. Un autre type de vieillissement peut donner lieu à des résultats

différents. Ce phénomène agit sur la microstructure du matériau par plusieurs façons, parmi lesquelles on distingue : (i) le phénomène de gonflement/rétrécissement des particules végétales, (ii) la dégradation de la cohésion à l'interface fibre/liant comme nous l'avons vu dans le chapitre IV et voire même la lixiviation des ions de la solution interstitielle [173–175]. Cela affecte la porosité inter particulaires et la microstructure du matériau en général et par conséquent, son comportement hygrothermique change. Par ailleurs, l'effet du vieillissement ne se limite pas uniquement à des modifications de la microstructure, car il peut également affecter le comportement des composants du matériau, notamment la dégradation de la qualité des particules végétales et du liant. Il est important de noter que le modèle physique développé prend en compte les effets du vieillissement à travers les propriétés macroscopiques du matériau et en aucun cas ne modèle la dégradation de la microstructure.

V.5. Prédiction des déformations du béton de chanvre issues des sollicitations hydriques et thermiques

Nous avons vu dans le Chapitre IV qu'un vieillissement agressif peut modifier la microstructure des matériaux biosourcés par le gonflement et le rétrécissement des particules végétales à cause de leur sensibilité aux variations de température et de l'humidité relative. Bennai *et al.* [162] ont mené une étude dans ce sens dans le but de suivre l'évolution de la microstructure 3D du béton de chanvre sous sollicitations hydriques. Ils ont montré que l'humidification du matériau conduit à un gonflement des particules végétales dû au phénomène d'adsorption d'eau. Ceci peut donc avoir un impact plus ou moins important sur la prédiction du comportement hygrothermique de ces matériaux puisque les modèles numériques utilisés ne tiennent pas compte de ces phénomènes. De plus, parmi les études menées jusqu'à présent sur le béton de chanvre [78,129,132,162,176–178], la prédiction du comportement morphologique suite aux sollicitations hydriques n'a pas été abordée. C'est pourquoi, dans la suite de ce travail, le but consiste à développer un modèle numérique en couplant l'équation du comportement mécanique avec le comportement hygrothermique défini par le système d'équation (V-23). Le but consiste à remonter aux déformations du béton de chanvre, notamment les déformations des particules végétales issues des sollicitations hydriques et thermiques. Pour cela, nous allons d'abord présenter la loi de Hooke dans le cas unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel en axes principaux afin d'arriver au final, à la loi du comportement mécanique que nous allons utiliser pour la simulation des déformations des particules végétales issues des sollicitations

hygrothermiques. Ensuite, une approche microscopique basée sur des résultats expérimentaux et numériques est présentée pour la validation du modèle développé.

V.5.1. Loi de Hooke : cas unidimensionnel (1D)

Dans le cas unidimensionnel, le matériau subit une traction et/ou une compression dans un seul sens, la loi de Hooke est donc la suivante :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_e \quad (V-27)$$

Avec,

E [Pa] est le module d'élasticité du matériau isotrope,

ε_e [-] est la déformation élastique,

σ [Pa] est la contrainte exercée sur le matériau,

Dans le cas où on considère les déformations dues aux gradients de T et de P_v , les déformations deviennent comme suit [179] :

$$\varepsilon = \varepsilon_{total} = \varepsilon_e + \varepsilon^{T,P_v} \quad (V-28)$$

Donc,

$$\varepsilon_e = \varepsilon - \varepsilon^{T,P_v} \quad (V-29)$$

Avec,

$$\varepsilon^{T,P_v} = (\varphi \Delta T + \beta \Delta P_v) = (\varepsilon_{ther} + \varepsilon_{hyd}) \quad (V-30)$$

ΔT et ΔP_v représentent respectivement la différence de température et de pression de vapeur d'eau.

φ [1/K] et β [1/Pa] sont respectivement les coefficients de dilatation thermique et du gonflement hydrique.

V.5.2. Loi de Hooke : cas bidimensionnel (2D)

Dans le cas (2D), le matériau peut subir une traction ou une compression dans les deux sens comme expliqué dans la Figure V-16.

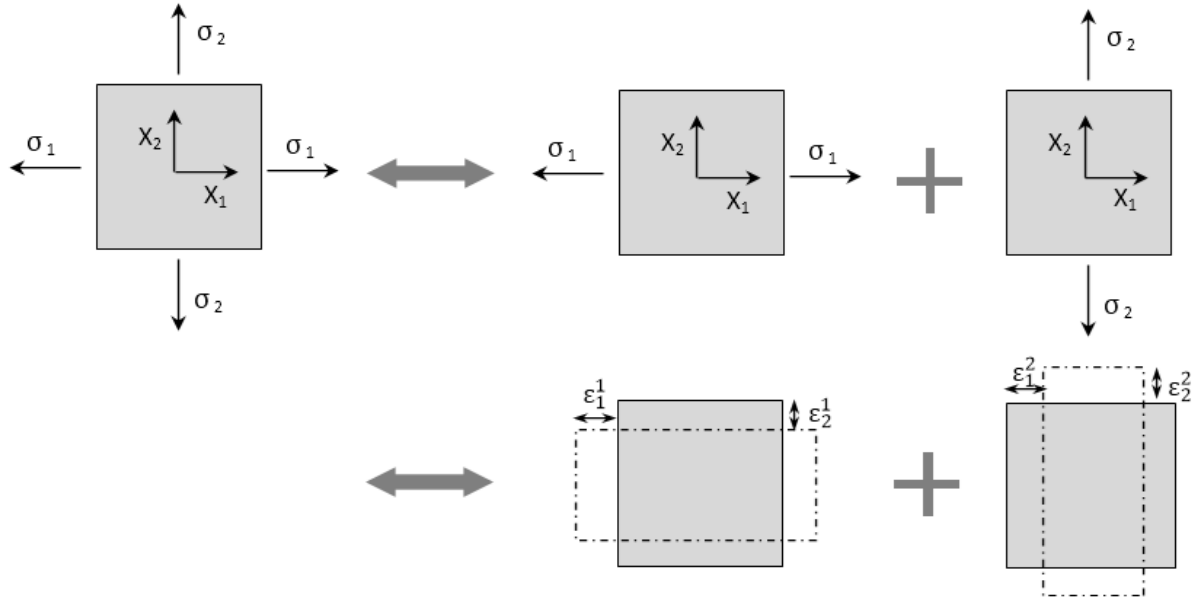


Figure V-16. Déformations d'une géométrie 2D soumises à des contraintes dans les deux directions.

Avec,

$\varepsilon_{e_i}^j$ est la déformation dans le sens X_i provoquée par la contrainte σ_j ,

Expression des déformations sous l'effet de σ_1

$$\begin{cases} \varepsilon_{e_1}^1 = \frac{\sigma_1}{E} \\ \varepsilon_{e_2}^1 = -\nu \cdot \varepsilon_{e_1}^1 = -\frac{\nu}{E} \sigma_1 \end{cases} \quad (V-31)$$

Expression des déformations sous l'effet de σ_2

$$\begin{cases} \varepsilon_{e_2}^2 = \frac{\sigma_2}{E} \\ \varepsilon_{e_1}^2 = -\nu \cdot \varepsilon_{e_2}^2 = -\frac{\nu}{E} \sigma_2 \end{cases} \quad (V-32)$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \varepsilon_{e_1} = \varepsilon_{e_1}^1 + \varepsilon_{e_1}^2 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu}{E} \sigma_2 \\ \varepsilon_{e_2} = \varepsilon_{e_2}^1 + \varepsilon_{e_2}^2 = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\nu}{E} \sigma_1 \end{cases} \quad (V-33)$$

Avec,

ν est le coefficient de Poisson,

Au final, les contraintes peuvent être exprimées donc comme suit :

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_{e1} + \nu \cdot \varepsilon_{e2}) \\ \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_{e2} + \nu \cdot \varepsilon_{e1}) \end{cases} \quad (V-34)$$

Si on l'exprime sous forme matricielle, on aura :

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{e1} \\ \varepsilon_{e2} \end{pmatrix} \quad (V-35)$$

V.5.3. Loi de Hooke : cas tridimensionnel (3D)

Dans le cas tridimensionnel, on aura les déformations ε_1 , ε_2 et ε_3 provoquées par les contraintes σ_1 , σ_2 et σ_3 .

Le système d'équation des déformations sera donc par analogie au cas (2D) comme suit :

$$\begin{cases} \varepsilon_{e1} = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \varepsilon_{e2} = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_3) \\ \varepsilon_{e3} = \frac{\sigma_3}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \end{cases} \quad (V-36)$$

Par conséquent, les contraintes deviennent comme suit :

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_{e1} + \nu(\varepsilon_{e2} + \varepsilon_{e3})] \\ \sigma_2 = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_{e2} + \nu(\varepsilon_{e1} + \varepsilon_{e3})] \\ \sigma_3 = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_{e3} + \nu(\varepsilon_{e1} + \varepsilon_{e2})] \end{cases} \quad (V-37)$$

Si on exprime le système (V-40(V-37) sous forme matricielle, on aura :

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu \\ \nu & (1-\nu) & \nu \\ \nu & \nu & (1-\nu) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{e1} \\ \varepsilon_{e2} \\ \varepsilon_{e3} \end{pmatrix} \quad (V-38)$$

Si on exprime le système d'équation précédent en utilisant la notation indicielle, on aura :

$$\sigma_{ij} = 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{eij} + \tau \cdot \varepsilon_{e_{kk}} \cdot \delta_{ij} \quad (V-39)$$

Avec,

$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i=j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$ est le symbole de Kronecker,

$$\begin{cases} \mu = \frac{E}{2(1+\gamma)} \\ \tau = \frac{E\gamma}{(1+\gamma)(1-2\gamma)} \end{cases} \text{ Sont les coefficients de Lamé,}$$

$$\varepsilon_{ekk} \cdot \delta_{ij} = \text{trace}(\varepsilon) = \varepsilon_{e11} + \varepsilon_{e22} + \varepsilon_{e33}$$

Pour rappel, l'expression de cette déformation qui tient compte du gonflement de la chènevotte est la suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_{total} = \varepsilon_e + \varepsilon^{T,P_v}$$

Donc,

$$\varepsilon_e = \varepsilon - \varepsilon^{T,P_v}$$

Sous l'hypothèse des déformations infinitésimales, les déformations peuvent être exprimées en fonction des déplacements :

On a :

$$\varepsilon_{eij} = \frac{1}{2} (u_{e,i,j} + u_{e,j,i}) \quad (V-40)$$

Avec,

u_e [m] représente le déplacement,

$u_{e,i,j} = \frac{\partial u_{ei}}{\partial x_j}$ est la dérivée de u_{ei} par rapport à la direction x_j ,

L'équation d'équilibre mécanique dans le cas statique nous permet d'écrire :

$$\text{div}(\sigma) - F = 0 \quad (V-41)$$

Avec,

F est la force volumique qui s'exerce (à négliger dans notre cas),

Au final, le système d'équation qui définit le modèle thermo-hygro-morphique est le suivant :

$$\begin{cases} \rho_s C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}((K_l^P + \delta_p) \nabla P_v + K_l^T \nabla T + k_f \nabla P) \\ \rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda^* \nabla T + \chi \nabla P_v + \gamma \nabla P) \\ C_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(k_f \nabla P) \\ \text{div}(\sigma) = 0 \end{cases} \quad (\text{V-42})$$

Sachant que dans le cas 3D, les contraintes selon x, y et z sont données comme suit :

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)(\varepsilon_x - \beta \Delta P_v - \phi \Delta T) + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z - 2(\beta \Delta P_v - \phi \Delta T))] \\ \sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)(\varepsilon_y - \beta \Delta P_v - \phi \Delta T) + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z - 2(\beta \Delta P_v - \phi \Delta T))] \\ \sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)(\varepsilon_z - \beta \Delta P_v - \phi \Delta T) + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y - 2(\beta \Delta P_v - \phi \Delta T))] \end{cases} \quad (\text{V-43})$$

V.5.4. Sensibilité du modèle numérique vis-à-vis des paramètres du comportement mécanique

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la sensibilité des déformations vis-à-vis des coefficients du comportement mécanique présentés dans le système d'équations (V-43). Le but étant de repérer les paramètres du modèle les plus influant pour pouvoir les identifier à travers une étude paramétrique. Ces paramètres ont été évalués pour des incréments relatifs (par rapport à la valeur initiale) de 100%. La Figure V-17, la Figure V-18 et la Figure V-19 présentent respectivement la sensibilité du modèle numérique vis-à-vis du module de Young (E), du coefficient de Poisson (ν) et du coefficient de gonflement (β).

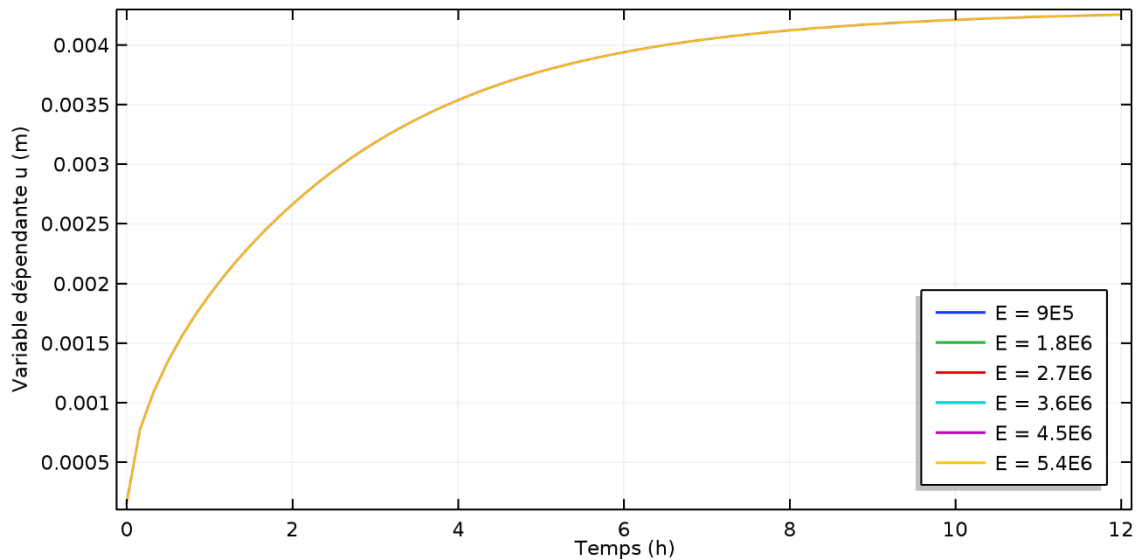


Figure V-17. Sensibilité des déplacements (u) vis-à-vis du module de Young (E en MPa) à $x=e/2$.

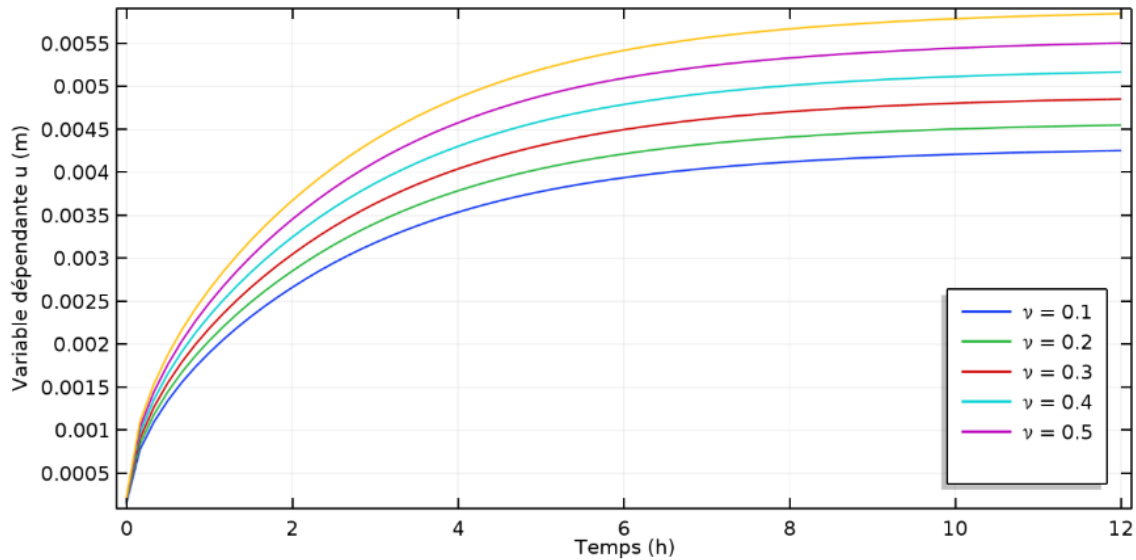


Figure V-18. Sensibilité des déplacements (u) vis-à-vis du coefficient de Poisson (ν) à $x=e/2$.

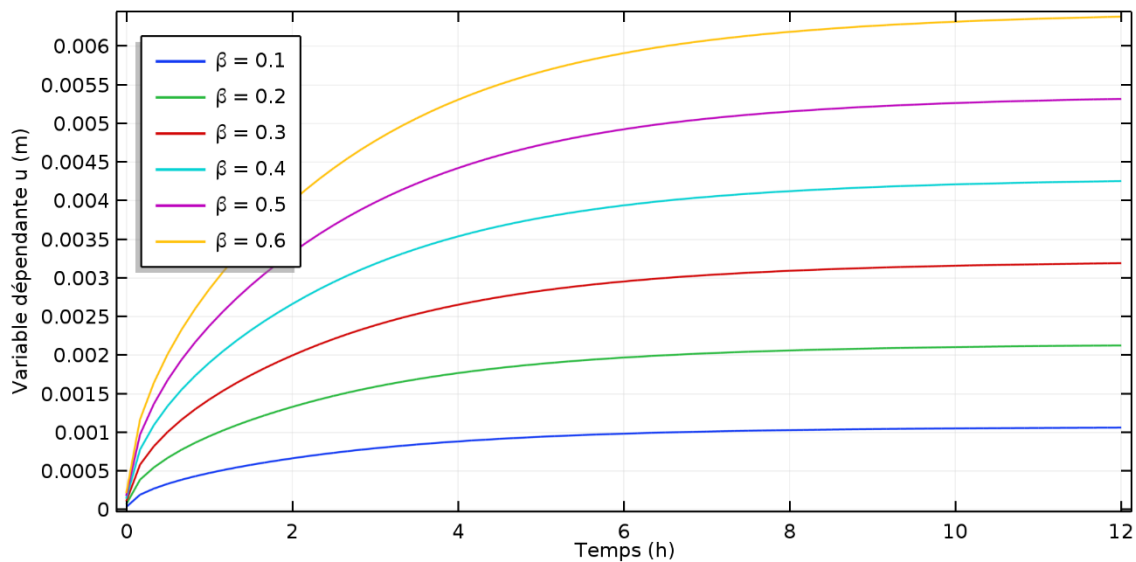


Figure V-19. Sensibilité des déplacements (u) vis-à-vis du coefficient de gonflement (β) à $x=e/2$.

Ces résultats nous montrent clairement que la sensibilité de ce modèle numérique est pratiquement négligeable vis-à-vis du module de Young (E). Cependant, le modèle est plus sensible au coefficient de gonflement (β) et un peu moins au coefficient de Poisson (ν). Cela semble logique puisque nous avons considéré que les sollicitations hydriques (pas de sollicitations mécaniques). Donc, vu que l'influence du module de Young sur les déplacements (u) est pratiquement négligeable, l'identification va concerner uniquement le coefficient de gonflement et le coefficient de Poisson pour la validation du modèle.

V.5.5. Validation du modèle

La déformation des particules végétales dans le béton de chanvre provoquée par les sollicitations hygrothermiques se produisent à l'échelle microscopique. C'est pourquoi, la démarche proposée pour la validation du modèle numérique développé se base sur une approche microscopique. Cette dernière consiste à confronter les résultats 2D des déformations obtenues numériquement à ceux obtenues expérimentalement par corrélation d'image. Pour ce faire, nous avons fait appel à des résultats issus des travaux entrepris par Bennai *et al.* [162]. Ces résultats ont été obtenus en réalisant deux scans du béton de chanvre par la micro-tomographie aux rayons X à deux hygrométries différentes (0% et 85%). Ensuite, une corrélation d'image entre deux interfaces 2D de ces scans à deux hygrométries différentes a été effectuée afin de remonter aux déformations issues des sollicitations hydriques (Figure V-20).

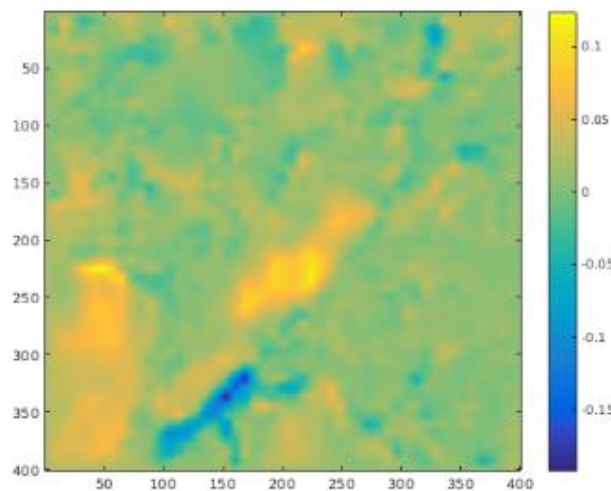


Figure V-20. Déformations obtenues par corrélation d'image [5].

Notre but consiste à reproduire numériquement ces étapes expérimentales afin de pouvoir comparer les résultats obtenus et de valider le modèle développé. Pour cela, le système d'équation (V-42) a été appliqué sur chaque phase du béton de chanvre comme il est montré sur la Figure V-21.

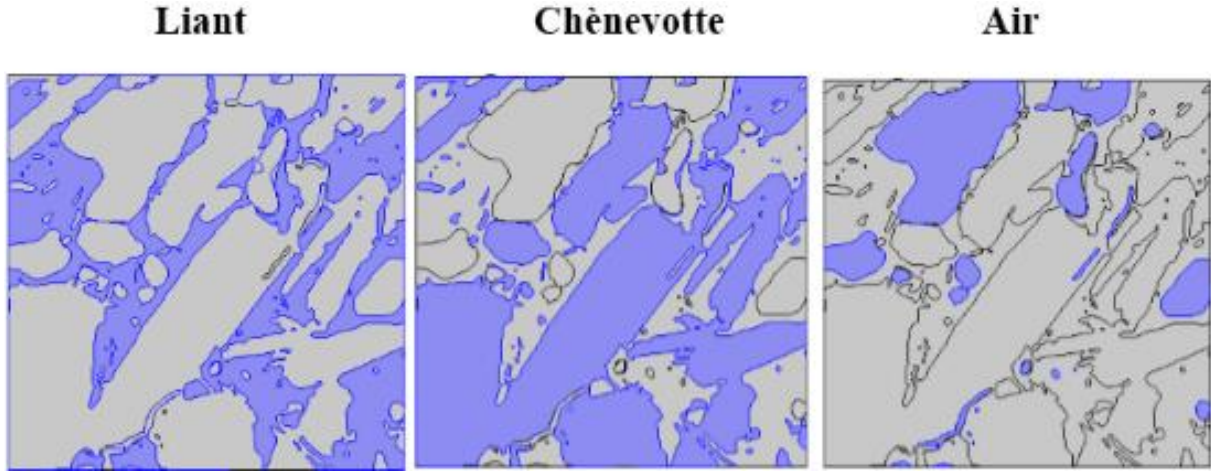


Figure V-21. Différentes phases de la configuration du béton de chanvre étudiée.

Les systèmes d'équations appliqués pour chaque phase sont les suivants :

- **Phase liant (l)**

$$\begin{cases} \rho_{s,l} C_{m,l} \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}((K_{l,l}^P + \delta_{p,l}) \nabla P_v + K_{l,l}^T \nabla T + k_{f,l} \nabla P) \\ \rho_{s,l} C_{p,l} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_l^* \nabla T + \chi_l \nabla P_v + \gamma_l \nabla P) \\ C_{a,l} \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(k_{f,l} \nabla P) \\ \text{div}(\sigma) = 0 \end{cases} \quad (\text{V-44})$$

Avec,

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E_l}{1 - \nu_l^2} (\epsilon_x - \beta_l \Delta P_v - \phi_l \Delta T + \nu_l (\epsilon_y - \beta_l \Delta P_v - \phi_l \Delta T)) \\ \sigma_y = \frac{E_l}{1 - \nu_l^2} (\epsilon_y - \beta_l \Delta P_v - \phi_l \Delta T + \nu_l (\epsilon_x - \beta_l \Delta P_v - \phi_l \Delta T)) \end{cases}$$

- **Phase chènevotte (c)**

$$\begin{cases} \rho_{s,c} C_{m,c} \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}((K_{l,c}^P + \delta_{p,c}) \nabla P_v + K_{l,c}^T \nabla T + k_{f,c} \nabla P) \\ \rho_{s,c} C_{p,c} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_c^* \nabla T + \chi_c \nabla P_v + \gamma_c \nabla P) \\ C_{a,c} \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(k_{f,c} \nabla P) \\ \text{div}(\sigma) = 0 \end{cases} \quad (\text{V-45})$$

Avec,

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} (\varepsilon_x - \beta_c \Delta P_v - \varphi_c \Delta T + \nu_c (\varepsilon_y - \beta_c \Delta P_v - \varphi_c \Delta T)) \\ \sigma_y = \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} (\varepsilon_y - \beta_c \Delta P_v - \varphi_c \Delta T + \nu_c (\varepsilon_x - \beta_c \Delta P_v - \varphi_c \Delta T)) \end{cases}$$

• **Phase air (a)**

$$\begin{cases} \rho_{s,a} C_{m,a} \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}((K_{l,a}^P + \delta_{p,a}) \nabla P_v + K_{l,a}^T \nabla T + k_{f,a} \nabla P) \\ \rho_{s,a} C_{p,a} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_a^* \nabla T + \chi_a \nabla P_v + \gamma_a \nabla P) \\ C_{a,a} \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(k_{f,a} \nabla P) \\ \text{div}(\sigma) = 0 \end{cases} \quad (\text{V-46})$$

Avec,

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E_a}{1 - \nu_a^2} (\varepsilon_x - \beta_a \Delta P_v - \varphi_a \Delta T + \nu_a (\varepsilon_y - \beta_a \Delta P_v - \varphi_a \Delta T)) \\ \sigma_y = \frac{E_a}{1 - \nu_a^2} (\varepsilon_y - \beta_a \Delta P_v - \varphi_a \Delta T + \nu_a (\varepsilon_x - \beta_a \Delta P_v - \varphi_a \Delta T)) \end{cases}$$

Une fois le modèle est intégré dans le logiciel de simulation Comsol Multiphysics, nous procédons à la génération du maillage sur l'interface 2D étudiée (Scan effectué à 0%). La Figure V-22 présente le résultat du maillage obtenu.

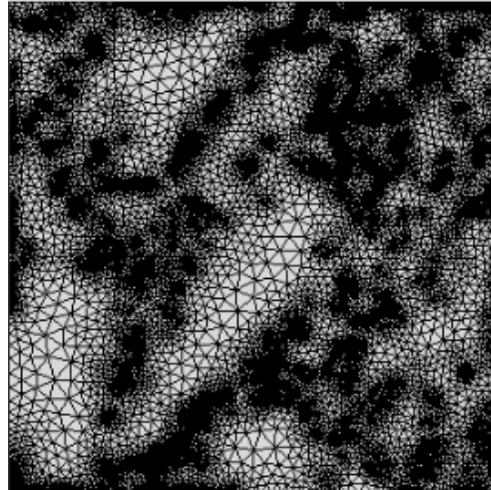


Figure V-22. Maillage de la configuration étudiée.

La condition initiale appliquée est HR = 0 % et T = 20°C. Quant aux conditions aux limites, elles sont de type Dirichlet. Cela consiste à appliquer dans des conditions isothermes (T=20°C), une humidité relative de 85% sur les quatre facettes de l'échantillon.

La Figure V-23 présente la confrontation des déformations obtenues numériquement et expérimentalement. Tout d'abord, nous remarquons que la chènevotte est la plus sensible aux sollicitations hydriques par rapport aux autres phases et elle présente des déformations relativement élevées. Cela est dû la forte hygroscopicité de la particule végétale et sa capacité à stocker et à libérer l'humidité relative. En effet, l'humidification du matériau provoque le gonflement des granulats végétaux en causant ainsi une diminution de la porosité intergranulaire, ce qui peut donc modifier la cinétique des transferts de chaleur et de masse.

Sur la base de la Figure V-23, nous pouvons remarquer, qu'en général, ces résultats sont pratiquement identiques et les déformations sont du même ordre.

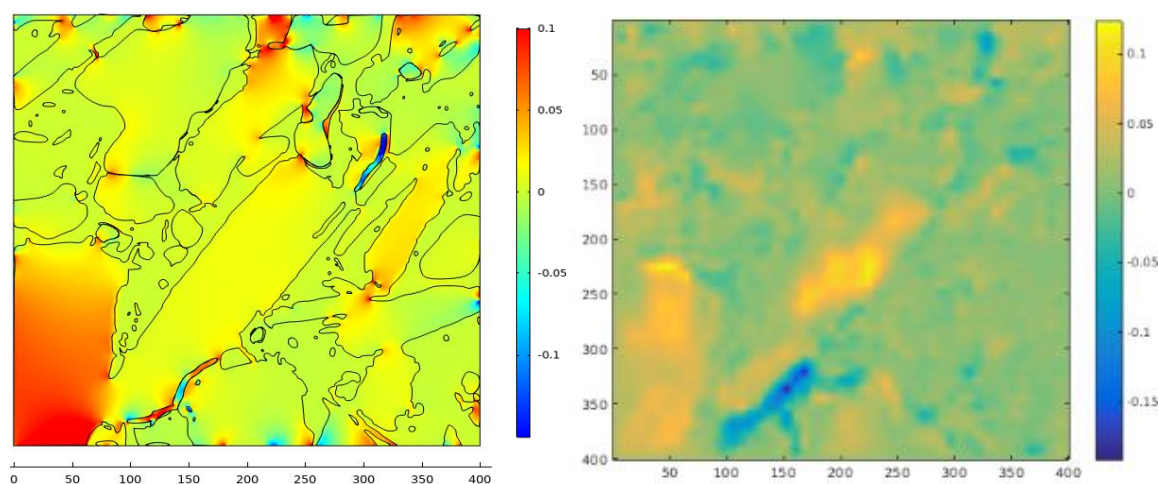


Figure V-23. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

Néanmoins, il existe quelques endroits ponctuels où les déformations expérimentales et numériques se divergent. Pour mieux illustrer cette confrontation, nous avons rajouté dans le Tableau V-3 une comparaison ponctuelle entre différents points pris sur les différentes phases du béton de chanvre (chènevotte, air et liant) (voir Figure V-24).

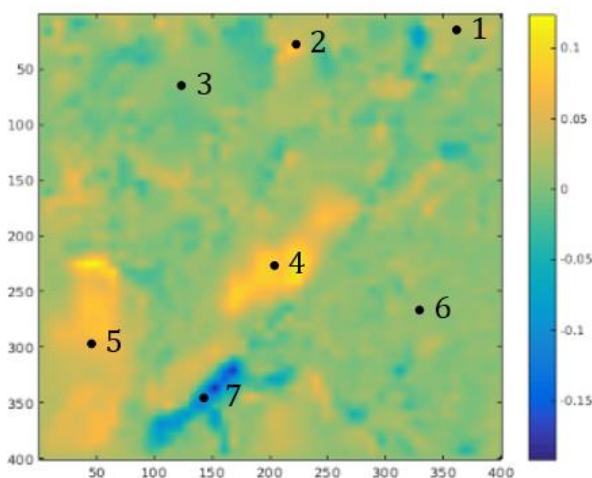


Figure V-24. Points sélectionnés pour la comparaison ponctuelle.

Compte tenu de ces résultats, nous remarquons que les déformations expérimentales et numériques sont pratiquement identiques, sauf pour les points 4 et 7 où la marge d'erreur est importante et l'écart est de l'ordre de 0,07 et 0,06, respectivement. Cela est dû, d'une part, aux erreurs de segmentation, et d'autre part, à l'identification des paramètres d'entrée du modèle numérique. D'autres investigations s'avèrent nécessaires pour l'améliorer davantage.

Tableau V-3. Confrontation ponctuelle entre les déformation numériques et expérimentales

Points	$\varepsilon_{exp} [-]$	$\varepsilon_{num} [-]$
1	0,050	0,060
2	0,090	0,080
3	0,010	0,010
4	0,105	0,035
5	0,070	0,075
6	-0,001	-0,002
7	-0,140	-0,080

D'une façon générale, nous pouvons admettre que le modèle développé est capable de reproduire avec précision les déformations issues des sollicitations hygrothermiques et peut donc être utilisé pour prédire le comportement hygrothermique du béton de chanvre ainsi que les déformations qui en résultent.

V.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une investigation expérimentale et numérique sur l'effet du vieillissement sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre ainsi que la prédiction des déformations issues des sollicitations hydriques et thermiques. Pour cela, un modèle numérique de prédiction du comportement hygrothermique a été développé et validé expérimentalement. Ce dernier a été ensuite alimenté par les données d'entrée constituées des propriétés des matériaux que nous avons caractérisés dans le chapitre précédent afin de pouvoir comparer les comportements hygrothermiques du béton de chanvre vieilli et non vieilli. L'analyse des résultats permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Le modèle développé a pu reproduire avec précision les profils expérimentaux de température et de teneur en eau proposés par la norme EN 15026. Une telle reproductibilité signifie que les résultats numériques correspondent aux résultats expérimentaux avec une tolérance de 2.5%, d'où la validation du modèle développé. Par ailleurs, les résultats de simulation ont révélé que le comportement hydrique du béton de chanvre vieilli est différent de celui de référence. Des écarts sensibles et significatifs d'environ 18 % ont été enregistrés sur les profils d'humidité relative,

tandis que les écarts de température étaient quasiment négligeables dont le maximum est de 1°C. De plus, la réponse aux sollicitations climatiques du béton de chanvre est plus rapide après vieillissement avec une cinétique de transfert de masse amplifiée, ce qui a engendré, par conséquent, un déphasage d'environ 40 minutes entre les deux cas.

- Les deux cas de figure étudiés (isotherme et non isotherme) ont clairement montré l'effet et l'apport des transferts de chaleur sur les transferts de masse. Dans le cas isotherme, l'écart maximal entre les profils d'humidité relative des deux cas du béton de chanvre était de 12 %. Cet écart a augmenté de 6 % dans le cas non isotherme, ce qui met en exergue les effets du couplage entre les transferts de chaleur et ceux de masse. Enfin, ces résultats ont permis de mettre en évidence expérimentalement et numériquement l'effet du vieillissement sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre. Il est cependant important de noter que le modèle physique développé prend en compte les effets du vieillissement à travers les propriétés macroscopiques du matériau et en aucun cas ne modèle la dégradation de la microstructure. De plus, compte tenu de l'agressivité du protocole de vieillissement accéléré, il est important de souligner que ces résultats reflètent le cas de dégradation extrême que le béton de chanvre peut subir après plusieurs années d'utilisation dans des climats sévères comme il est le cas au Canada.
- Par ailleurs, un modèle de prédiction du comportement thermo-hygro-morphique a été développé grâce à un couplage entre les systèmes d'équations du comportement mécanique et du comportement hygrothermique. Ce dernier a été ensuite validé par le biais d'une approche microscopique basée sur l'exploitation des scans tomographiques. Le modèle développé permet donc de prédire fidèlement le comportement hygrothermique du béton de chanvre ainsi que les déformations qui en résultent des sollicitations hydriques et thermiques.

Le modèle numérique présenté dans ce chapitre a été développé en considérant que la courbe d'adsorption et de désorption sont identiques. Autrement dit, nous avons négligé le phénomène d'hystérésis de sorption de vapeur d'eau. Pour s'affranchir de cette hypothèse, nous allons en tenir compte dans le chapitre suivant. Le but est de mettre en évidence l'effet d'hystérésis sur le comportement hygrothermique et énergétique à plusieurs échelles.

Chapitre VI : Etude multi-échelle de l'effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique et énergétique des matériaux biosourcés

VI.1. Introduction

La mesure expérimentale des isothermes d'adsorption/désorption des matériaux de construction montre que le comportement du matériau durant la phase d'adsorption est différent de celui de la phase de désorption. Cela est dû au phénomène d'hystérésis qui peut être expliqué par plusieurs causes comme la variation de l'angle de contact liquide-solide, le rayon de courbure de l'interface fluide-vapeur et l'effet « bouteille d'encre » [30,57,59]. Par conséquent, pour une humidité relative donnée, la teneur en eau à considérer dans les simulations numériques se situe dans un intervalle limité par les courbes d'adsorption et de désorption principales. Cela sous-entend que lors de la modélisation du comportement hygrothermique des matériaux, le fait de ne tenir compte que de la courbe d'adsorption ou de désorption principale va engendrer des écarts non négligeables entre les résultats numériques et expérimentaux [43]. En effet, les courbes de sorption principales ne décrivent pas le comportement hydrique réel d'un matériau. Ces dernières constituent en quelque sorte les limites physiques de l'évolution de la teneur en eau [36,37,50,59,180]. Autrement dit, la teneur en eau réelle du matériau va dépendre en plus des conditions climatiques réelles, de l'histoire thermo-hydrique du matériau [58,59,176] et sera décrite par des courbes intermédiaires situées entre les courbes principales. Donc, en plus du phénomène de vieillissement que nous avons étudié dans les chapitres précédents et avons montré la nécessité d'en tenir compte dans la modélisation, nous nous intéressons également au phénomène d'hystérésis qui nécessite une attention particulière. C'est pourquoi la prise en compte de ce phénomène complexe fait l'objet de ce chapitre. L'étude a été réalisée à différentes échelles : de l'échelle du matériau à l'échelle de l'enveloppe en passant par l'échelle de la paroi. Nous commençons d'abord par la présentation du modèle d'hystérésis et son couplage avec le modèle de transferts hygrothermiques développé dans le chapitre précédent. Ensuite, nous passons à l'implémentation de l'ensemble des équations fortement couplées dans le logiciel Comsol Multiphysics. Après la validation du modèle à différentes échelles, nous étudions l'effet de ce phénomène sur le comportement hygrothermique et les performances énergétiques du béton de chanvre à l'échelle de la paroi et du bâtiment. Ceci

permettra, d'une part, de mieux appréhender l'effet du phénomène d'hystérésis à plusieurs échelles, et d'autre part, de montrer la nécessité d'en tenir compte lors des simulations numériques pour améliorer la qualité de la prédiction des modèles de transferts couplés de chaleur et d'humidité.

VI.2. Modèle d'hystérésis

Comme nous avons vu dans le chapitre I, il existe plusieurs types de modèle d'hystérésis, à savoir : des modèles mathématiques, physiques et empiriques. Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser le modèle physique de Carmeliet (2005) [49] qui se base sur le modèle de Mualem (1974) [50]. Ce choix a été motivé suite à des études comparatives dans la littérature où les auteurs ont conclu que le modèle conceptuel de Mualem donne de meilleurs résultats que les modèles empiriques à cause des effets de pompages liés à la non fermeture des boucles de sorption [47,57,58]. Les auteurs ont donc recommandé ce type de modèle pour le cas de la modélisation des transferts hygrothermiques dans les matériaux de construction exposés à des conditions climatiques dynamiques.

VI.2.1. Présentation du modèle

Le modèle d'hystérésis choisi peut être schématisé dans un espace à deux dimensions qu'on appelle espace de Mualem (voir Figure VI-1).

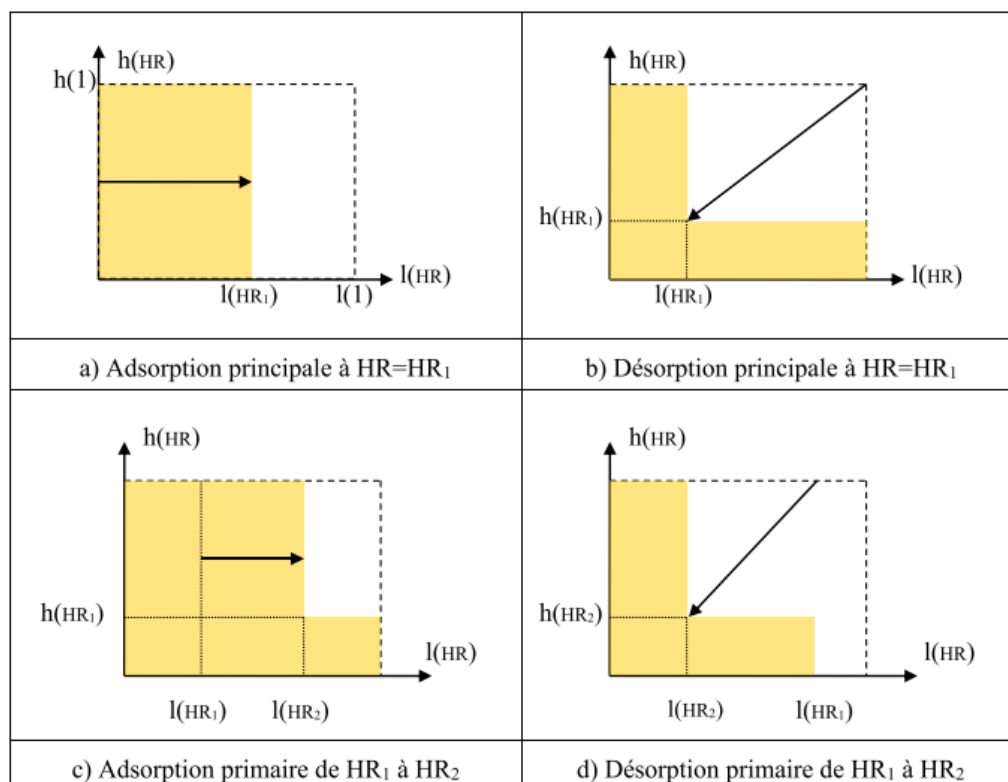


Figure VI-1. Schématisation des cycles d'adsorption/désorption principaux (a et b) et intermédiaires (c et d) dans l'espace 2D de Mualem [54].

Dans ce cas, la teneur en eau est obtenue en intégrant, dans le domaine rempli de cet espace (couleur jaune de la Figure VI-1), la fonction l qui caractérise la distribution des sites de sorption et la fonction normalisée h qui traduit l'accessibilité à ces sites de sorption.

En phase d'adsorption principale, la teneur en eau est évaluée par l'expression (VI-1) :

$$W_{ads}(HR_1) = \int_0^{HR_1} l(HR)dHR \int_0^1 h(HR)dHR = L(HR_1)H(1) \quad (VI-1)$$

Avec F et H sont respectivement les fonctions primitives de l et h .

Comme nous l'avons mentionné en haut, la fonction $h(HR)$ est normalisée, donc son intégrale $HR(1) = 1$, ce qui permet de déduire l'expression de $L(HR)$ comme suit :

$$L(HR) = W_{ads}(HR) \quad (VI-2)$$

Lors de la phase de désorption principale qui se produit dans la plage d'humidité relative de 1 à HR_1 , seuls les pores accessibles à la désorption dans cette plage sont affectés. Les autres pores restent remplis et l'eau se trouve piégée à l'intérieur en raison de l'effet 'bouteille d'encre' expliqué dans le Chapitre 1. Cette configuration peut être traduite par l'expression (VI-3) :

$$W_{des}(HR_1) = \int_0^{HR_1} l(HR)dHR \int_0^1 h(HR)dHR + \int_{HR_1}^1 l(HR)dHR \int_0^{HR_1} h(HR)dHR \quad (VI-3)$$

Après simplification de l'expression (VI-3), nous obtenons l'équation (VI-4) :

$$W_{des}(HR_1) = W_{ads}(HR_1) + (W_{sat} - W_{ads}(HR_1)).H(HR_1) \quad (VI-4)$$

Sur la base de l'expression (VI-4), nous pouvons déduire l'expression de $H(HR)$:

$$H(HR) = \frac{W_{des}(HR) - W_{ads}(HR)}{W_{sat} - W_{ads}(HR)} \quad (VI-5)$$

Avec W_{sat} est la teneur en eau à saturation ;

En suivant ce même raisonnement et en l'appliquant sur la Figure VI-1(c) et la Figure VI-1(d), nous obtenons les expressions des courbes d'adsorption et de désorption intermédiaires décrites comme suit :

$$W_{ads,hys}(HR) = W_i + (W_{ads}(HR) - W_{ads}(HR_i)).\frac{W_{sat} - W_{des}(HR_i)}{W_{sat} - W_{ads}(HR_i)} \quad (VI-6)$$

$$W_{des,hys}(HR) = W_j - \left(W_{ads}(HR_j) - W_{ads}(HR) \right) \cdot \frac{W_{sat} - W_{des}(HR)}{W_{sat} - W_{ads}(HR)} \quad (VI-7)$$

Avec :

(HR_i, W_i) est le point d'inversion entre la désorption et l'adsorption ;

(HR_j, W_j) est le point d'inversion entre l'adsorption et la désorption ;

La dérivée des expressions (VI-7) et (VI-7) par rapport à l'humidité relative permet de donner la capacité de stockage d'humidité pour les différentes courbes intermédiaires :

$$C_{m\ ads,hys} = \frac{\partial W_{ads,hys}}{\partial HR} \quad (VI-8)$$

$$C_{m\ des,hys} = \frac{\partial W_{des,hys}}{\partial HR} \quad (VI-9)$$

En effet, le phénomène d'hystérésis se traduit par la variation de la pente des isothermes d'adsorption/désorption intermédiaires par rapport à celles des courbes principales. C'est pourquoi la prise en compte de ce phénomène se fait par le biais de la capacité de stockage d'humidité qui constitue un paramètre important des modèles de transferts couplés de chaleur et d'humidité.

VI.2.2. Implémentation du modèle d'hystérésis

L'implémentation du modèle d'hystérésis dans les logiciels de simulations se fait généralement via un couplage entre un logiciel de programmation comme Matlab où le modèle d'hystérésis est programmé, et un logiciel (solver) de simulation comme Comsol où le modèle hygrothermique est résolu. Dans ce travail, nous avons opté pour une nouvelle méthode d'implémentation du modèle d'hystérésis. Ce dernier a été totalement programmé dans le logiciel Comsol Multiphysics et sans avoir besoin à un autre langage de programmation. Cela est possible grâce à la possibilité de récupérer la solution précédente d'une fonction sur Comsol.

Le modèle hygrothermique présenté dans le chapitre V (système d'équation V-23) a été donc adapté à notre problème en choisissant cette fois-ci l'humidité relative et la température comme moteurs de transferts afin qu'il soit compatible avec le modèle d'hystérésis présenté en haut. Un couplage fort entre les deux modèles a été donc assuré pour chaque pas de temps (t). Après avoir mis en place le modèle hygrothermique, la géométrie à étudier et les

conditions initiales et aux limites sur le logiciel Comsol Multiphysics, nous procédons à l'implémentation du modèle d'hystérésis. Pour ce faire, nous avons créé plusieurs interfaces de type EDO. A titre d'exemple, pour récupérer la solution précédente de l'humidité relative (HR), nous avons créé une fonction (hr) dans laquelle nous stockons les valeurs d'humidité relative du pas de temps précédent. Cette fonction (hr) ne doit pas être prise en compte dans l'évaluation de la matrice Jacobienne du système, d'où l'utilité d'utiliser la fonction « nojac » comme suit :

$$hr = nojac(HR) \quad (VI-10)$$

Ensuite, pour obtenir la valeur de la variable (HR) au pas de temps précédent, nous introduisons la variable (hr) dans l'opérateur « previous solution » qui se trouve dans le solveur de Comsol Multiphysics. Dans ce cas, la variable (hr) correspondra à (HR) au pas de temps précédent. Le même raisonnement a été appliqué pour les autres variables. La programmation du reste du modèle a été effectué grâce à l'instruction « if » dans le logiciel. La Figure VI-2 et la Figure VI-3 montrent un exemple sur l'évolution de l'humidité relative et de la teneur en eau aux instants (t) et (t-1), ainsi que l'évolution du point de transition (Pinv) entre l'adsorption et la désorption et sa teneur en eau (uinv).

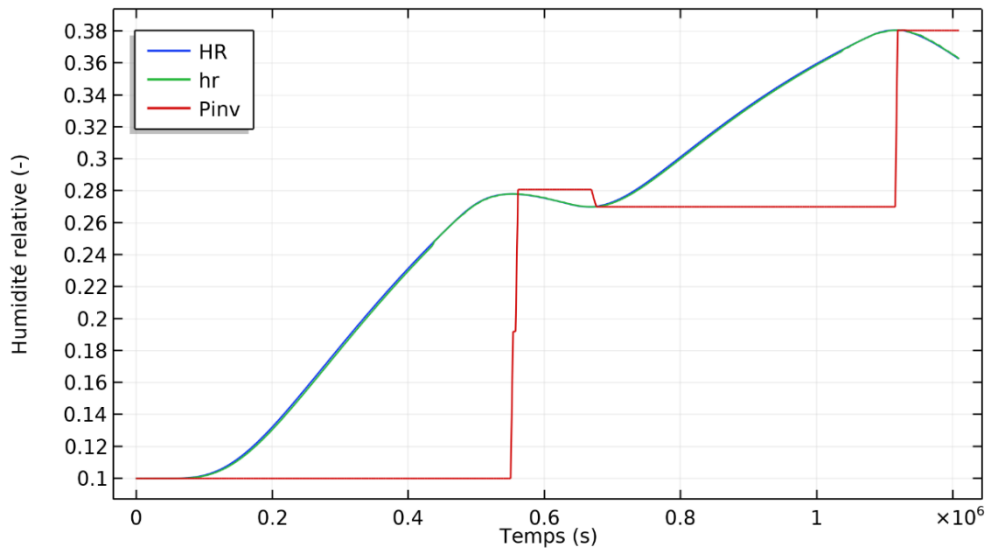


Figure VI-2. Evolution de l'humidité relative à l'instant (t : HR) et (t-1 : hr) ainsi que l'évolution de l'humidité relative d'inversion entre l'adsorption et la désorption (Pinv).

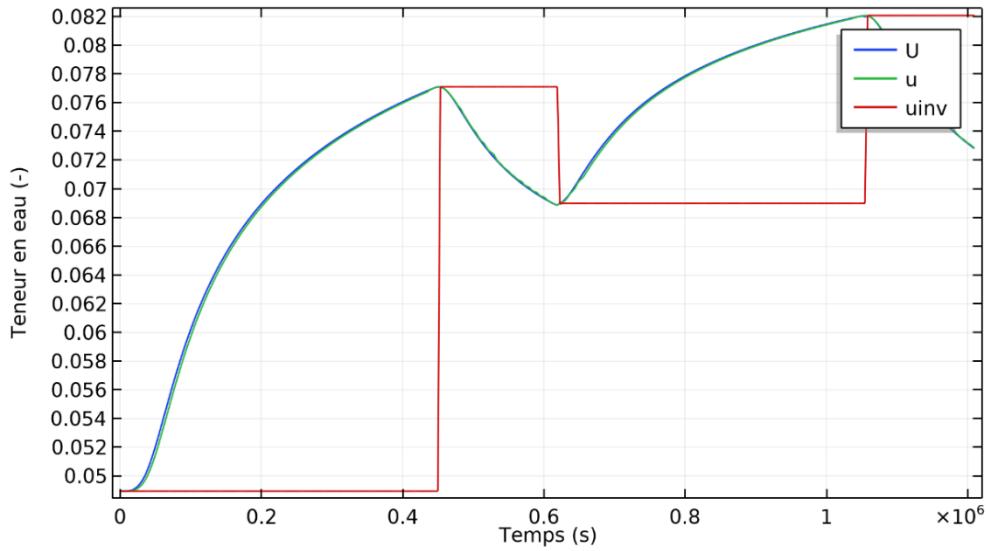


Figure VI-3. Evolution de la teneur en eau à l'instant (t : U) et ($t-1$: u) ainsi que l'évolution de la teneur en eau d'inversion entre l'adsorption et la désorption (u_{inv}).

La transition entre l'adsorption et la désorption a été assurée grâce à la condition suivante :

$$P_{inv,i} = (HR(t) - HR(t - \Delta t)) \times (HR(t - \Delta t) - P_{inv,i-1}) \quad (VI-11)$$

Avec :

$HR(t)$ et $HR(t - \Delta t)$ représentent respectivement l'humidité relative du matériau à l'instant (t) et à l'instant précédent ($t - \Delta t$). $P_{inv,i}$ est le point d'inversion à l'instant (t), et $P_{inv,i-1}$ est le point d'inversion précédent ;

Si ($P_{inv,i} < 0$), cela signifie qu'il y a une phase de transition entre les courbes d'adsorption et de désorption. Dans ce cas, nous devons mettre à jour les valeurs des points d'inversion en termes d'humidité relative et de teneur en eau. Cependant, dans le cas où ($P_{inv,i} > 0$), cela signifie qu'il n'y a pas d'inversion et nous restons sur le même chemin d'humidification ou de séchage. Les valeurs du point d'inversion seront donc maintenues. La Figure VI-4 présente un autre exemple sur l'évolution des variables HR , hr et P_{inv} en utilisant des conditions climatiques réelles de la ville de Montréal au Canada appliquées pendant un an. Ce résultat montre clairement que le modèle implémenté est capable de détecter fidèlement les différents points d'inversions face à des conditions climatiques réelles.

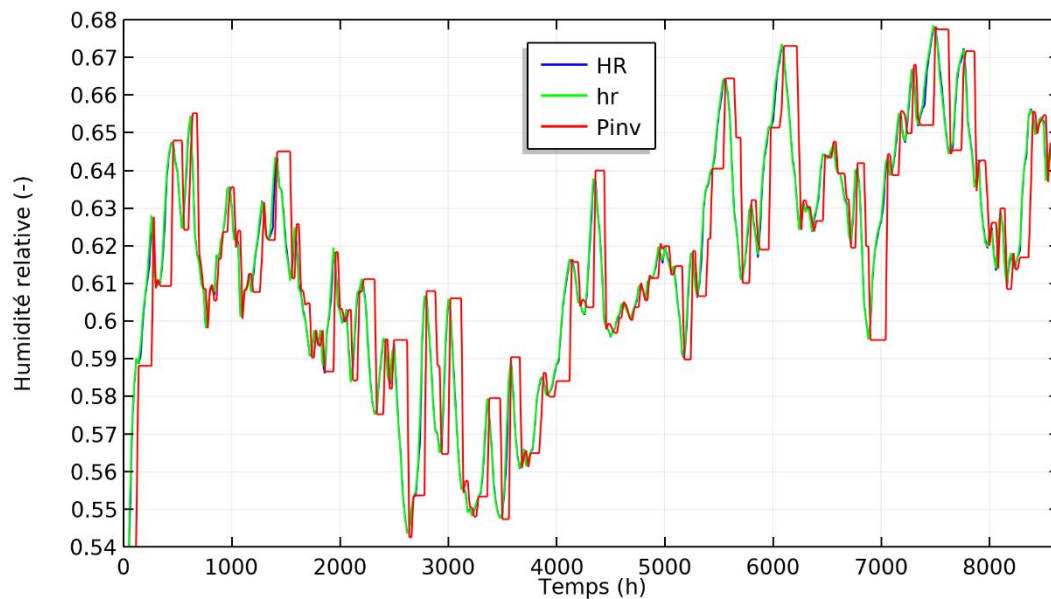


Figure VI-4. Evolution à mi épaisseur de HR, hr et Pinv vis-à-vis des conditions climatiques réelles de la ville de Montréal (Canada) pendant une année.

VI.2.3. Validation du modèle

Pour valider le modèle de prédiction du comportement hygrothermique en tenant compte du phénomène d'hystérésis, nous avons réalisé deux campagnes expérimentales : la première a été faite à l'échelle du matériau et l'autre à l'échelle de la paroi.

a) Validation à l'échelle du matériau

La validation expérimentale des résultats de prédiction numérique a été effectuée sur le béton de chanvre que nous avons présenté et caractérisé dans le chapitre IV. Pour cela, un échantillon du béton de chanvre de $(10 \times 10 \times 10)$ cm³ a été choisi. Cinq facettes de cet échantillon ont été isolées à l'aide d'un ruban adhésif en aluminium de manière à assurer un transfert suivant une seule facette comme il est illustré dans la Figure VI-5.

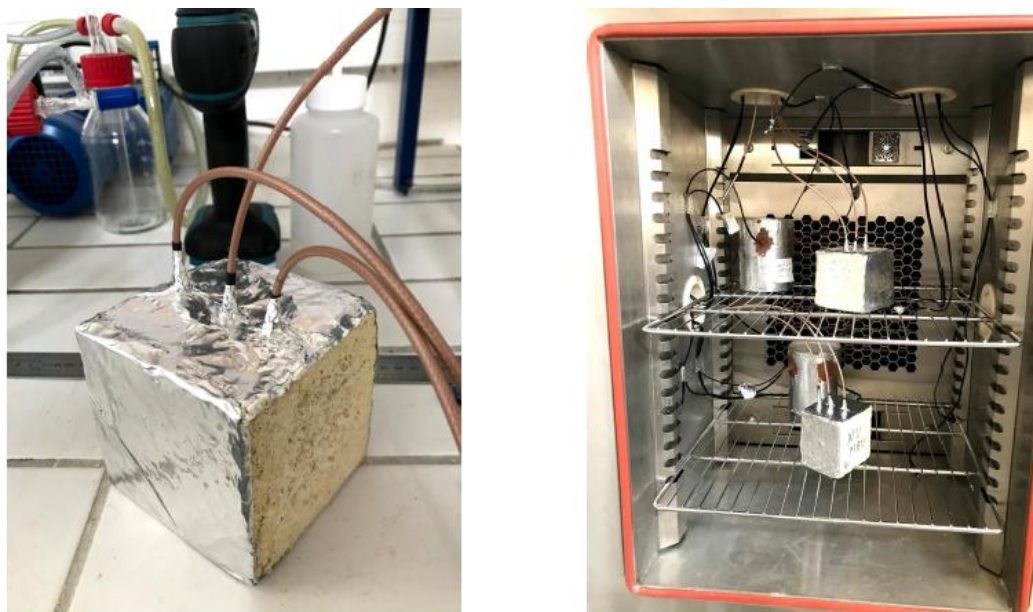


Figure VI-5. Photos montrant la campagne expérimentale de validation à l'échelle du matériau.

Afin de remonter à l'évolution de la température et de l'humidité relative dans le temps, des capteurs (T et HR) de type « ALMEMO » ont été insérés à différentes profondeurs de l'échantillon (1,5 cm ; 4,5 cm et 7,5 cm) (voir Figure VI-5). Cela va nous permettre de comparer les résultats expérimentaux avec les résultats du modèle numérique, et ce, avec et sans la prise en compte du phénomène d'hystérésis.

Les conditions aux limites sont de types Fourier. Il s'agit d'une succession de cycles d'humidité relative entre 23 % et 75 % à une température constante de 23°C comme illustré dans la Figure VI-6.

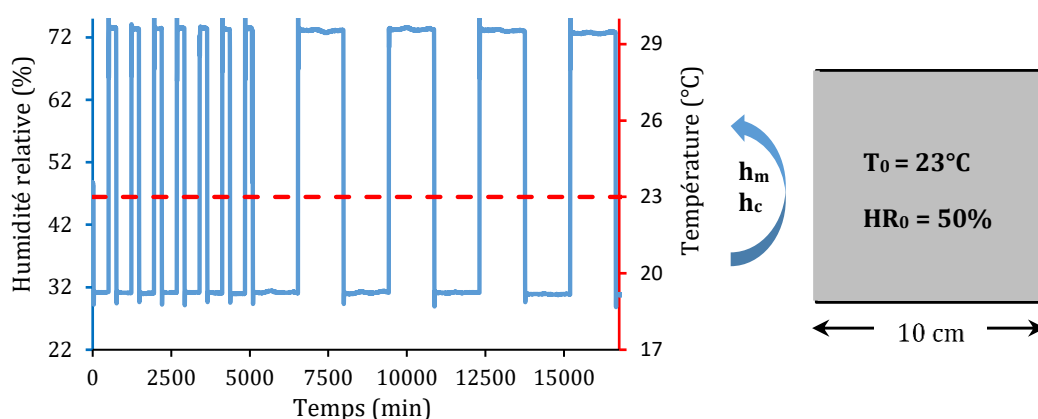


Figure VI-6. Conditions initiales et aux limites appliquées.

Les flux de chaleur (q) et de masse (g) échangés entre l'enceinte et la surface de l'échantillon sont exprimés comme suit [100]:

$$q = h_c(T_{air} - T_{surf}) \quad (VI-12)$$

$$g = h_m(P_{v,air} - P_{v,surf}) \quad (VI-13)$$

Les résultats de la confrontation des profils d'humidités relatives et de températures (expérimentaux et numériques) sont présentés respectivement dans la Figure VI-7 et la Figure VI-9. Les résultats numériques ont été obtenus en considérant l'isotherme d'adsorption (noté : HR_Uads), l'isotherme de désorption (noté : HR_Udes), l'isotherme moyenne entre l'adsorption et la désorption (noté : HR_Umoy) et enfin en tenant compte du phénomène d'hystérésis (noté : HR avec hyst).

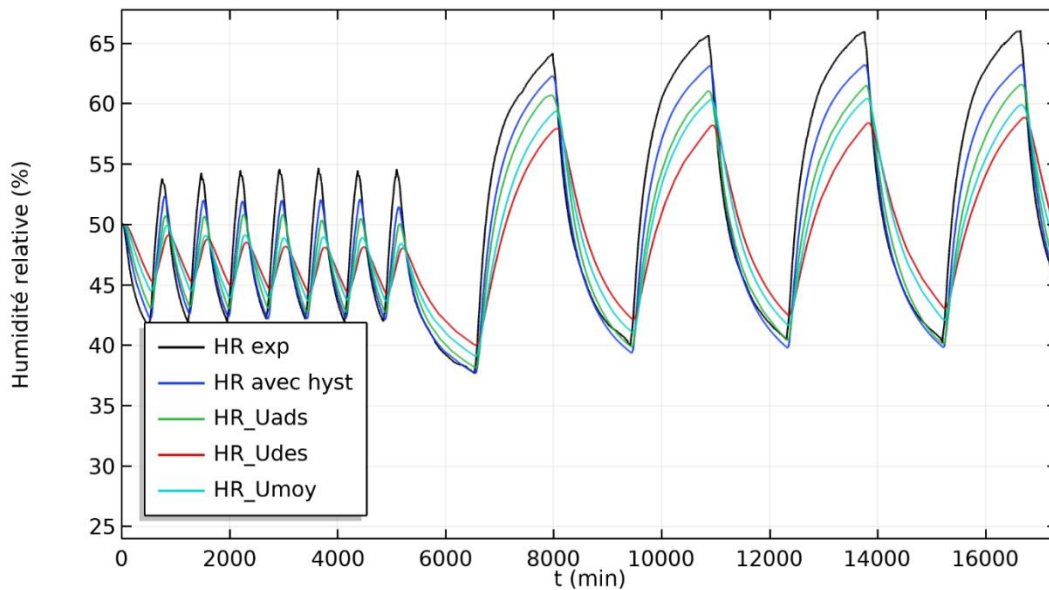


Figure VI-7. Evolution de l'humidité relative dans le temps à ($x = 1,5$ cm).

Sur la Figure VI-7, nous pouvons clairement remarquer que dans le cas d'omission du phénomène d'hystérésis (RH_Uads, RH_Udes et RH_Umoy), la cinétique de transfert de masse est légèrement faible par rapport aux résultats expérimentaux. De plus, l'évolution de l'humidité relative sans la prise en compte d'hystérésis présente de faibles amplitudes, notamment dans le cas des simulations avec la courbe de désorption principale et moyenne (voir Figure VI-7). Un léger déphasage peut également être observé. Par conséquent, les écarts relatifs aux résultats expérimentaux sont plus importants dont le maximum est de l'ordre de 16 % (voir Figure VI-8).

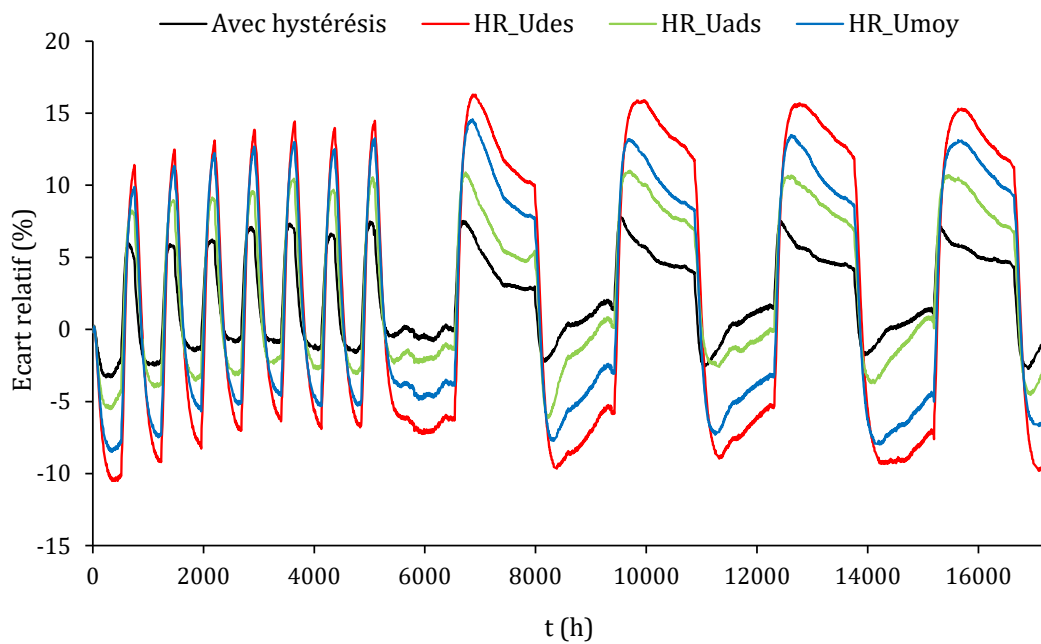


Figure VI-8. Ecarts relatifs aux résultats expérimentaux de HR (sans et avec la prise compte du phénomène d'hystérésis).

Cependant, la prise en compte du phénomène d'hystérésis, qui traduit la prise en compte de la teneur en eau réelle du matériau, a permis de réduire considérablement les écarts entre les résultats expérimentaux et numériques. L'amplitude de variation de l'humidité relative a été amplifiée et les résultats sont devenus plus cohérents avec les mesures expérimentales, ce qui a permis de réduire les écarts relatifs maximaux de HR à 6 % (Figure VI-7 et Figure VI-8).

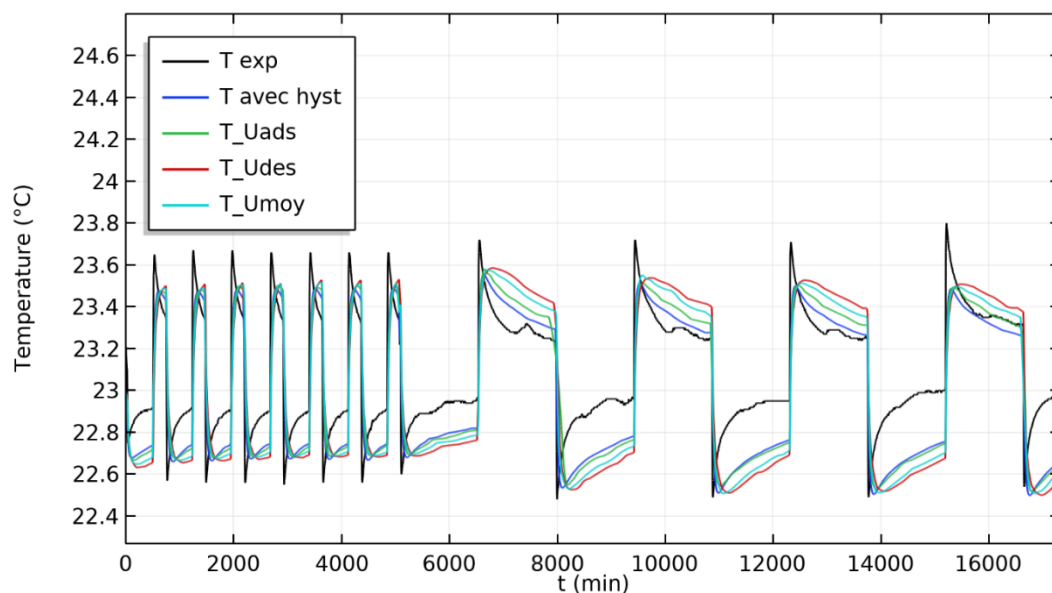


Figure VI-9. Evolution de la température dans le temps (à $x = 1,5$ cm).

Quant à l'évolution de la température dans le temps, les variations ont été pratiquement négligeables (configuration isotherme comme illustré dans la Figure VI-6). Malgré cela, la

prise en compte du phénomène d'hystérésis a permis d'améliorer la qualité de la prédiction des températures en donnant des allures plus proches des résultats expérimentaux.

b) Validation à l'échelle de la paroi

La validation du modèle développé à l'échelle de la paroi a été effectuée sur une paroi du béton de chanvre à l'aide d'une enceinte bi climatique disponible au LaSIE (voir Figure VI-10).

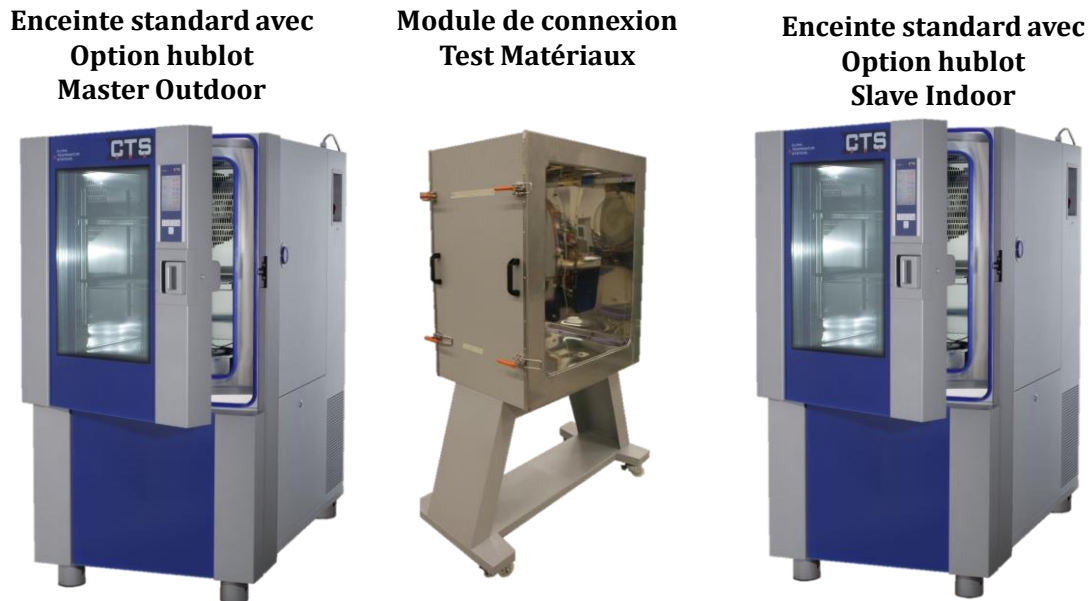


Figure VI-10. Photo de l'enceinte bi - climatique disponible au LaSIE.

Pour ce faire, une paroi en béton de chanvre de $(90 \times 90 \times 10)$ cm³ a été fabriquée au laboratoire. Les quatre facettes définissant l'épaisseur de cette paroi ont été isolées à l'aide d'un ruban adhésif en aluminium pour assurer un transfert unidirectionnel. Afin de suivre l'évolution de l'humidité relative et de la température dans le temps, des capteurs de type ALMEMO ont été insérés à différentes profondeurs de la paroi comme illustré sur la Figure VI-11.

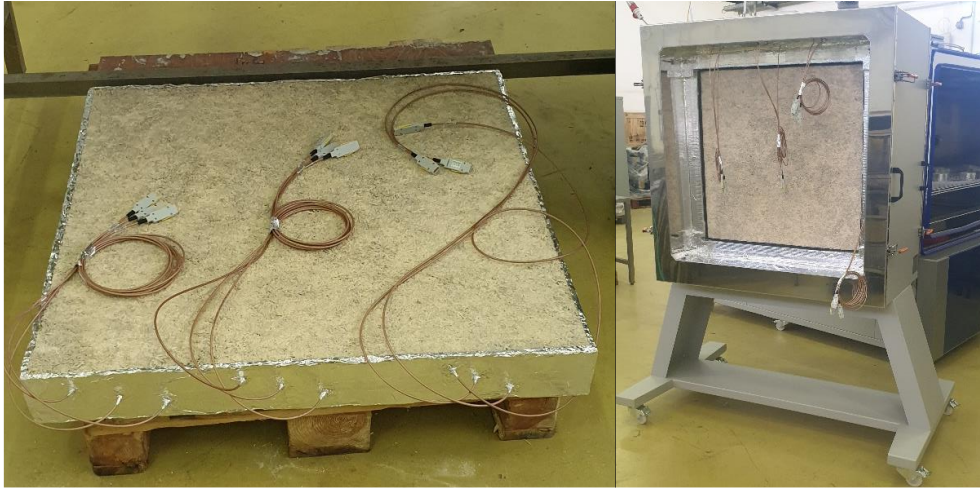


Figure VI-11. Photo de la paroi du béton de chanvre étudiée.

Après avoir préparé la paroi, cette dernière a été soigneusement placée entre les deux compartiments de l'enceinte bi climatique dont l'un représente le climat intérieur et l'autre le climat extérieur comme il est montré sur la Figure VI-12. Les capteurs de température et d'humidité relative sont connectés à une centrale d'acquisition qui permet de stocker et de visualiser les résultats.



Figure VI-12. Photo montrant l'enceinte bi climatique durant l'expérience.

Les conditions aux limites sont de types flux imposés (voir équations (VI-12) et (VI-13)). Les conditions climatiques appliquées sont présentées dans la Figure VI-13.

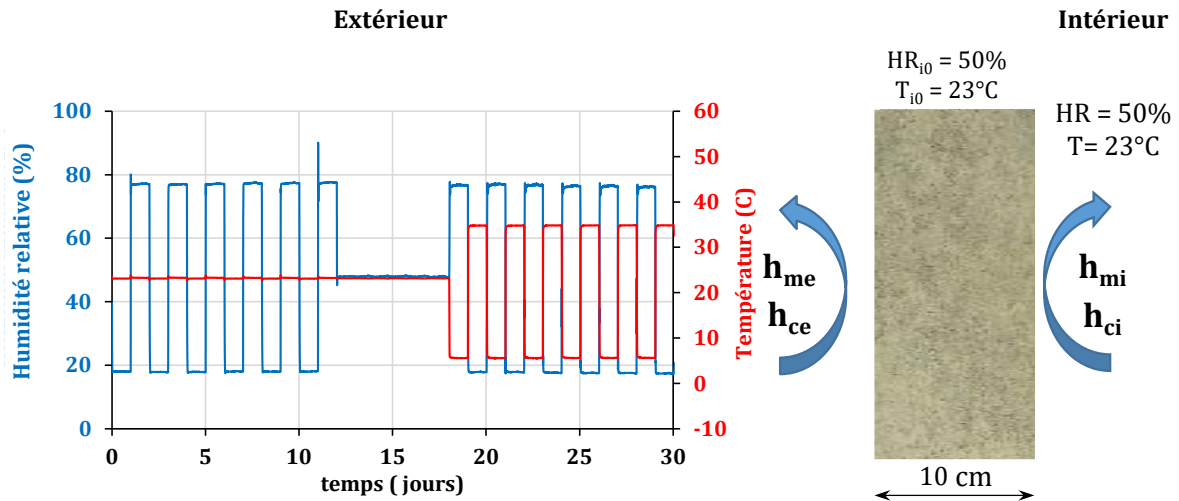


Figure VI-13. Configuration étudiée et conditions climatiques appliquées pour le cas de validation à l'échelle de la paroi.

L'évolution de l'humidité relative et de la température dans le temps à 2,5 cm de la surface extérieure de la paroi sont présentées respectivement dans les Figure VI-14 et Figure VI-15. Les simulations sans hystérésis ont été effectuées en considérant les courbes d'isothermes d'adsorption (U_{ads}), de désorption (U_{des}) et moyenne (U_{moy}) de la paroi du béton de chanvre. Ces résultats ont été ensuite comparés avec les résultats expérimentaux et ceux tenant compte du phénomène d'hystérésis (HR avec hyst).

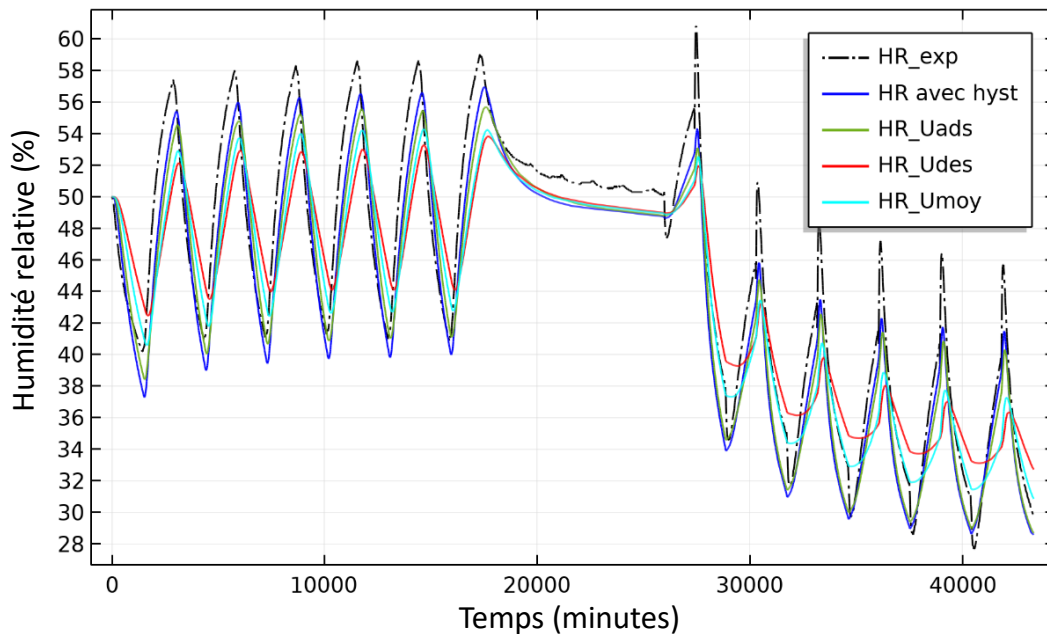


Figure VI-14. Evolution de l'humidité relative dans le temps à ($x = 2,5$ cm de la surface extérieure).

La Figure VI-14 montre que la prise en compte du phénomène d'hystérésis dans la modélisation permet de mieux prédire l'évolution de l'humidité relative dans le temps. Des écarts non négligeables ont été obtenus dans le cas d'omission de ce phénomène. La prise en

compte de ce dernier donne des résultats plus satisfaisants. L'effet d'hystérésis est cependant peu marquant vis-à-vis de l'évolution de la température comme il est montré dans la Figure VI-15. Nous pouvons toutefois remarquer que la prise en compte de ce phénomène donne des allures de températures plus proches à celles obtenues expérimentalement. En général, l'estimation de la teneur en eau du matériau face à des conditions climatiques dynamiques joue un rôle important sur la qualité de la prédiction du modèle numérique. Ce qui requiert encore une fois la nécessité de tenir compte du phénomène d'hystérésis dans la modélisation.

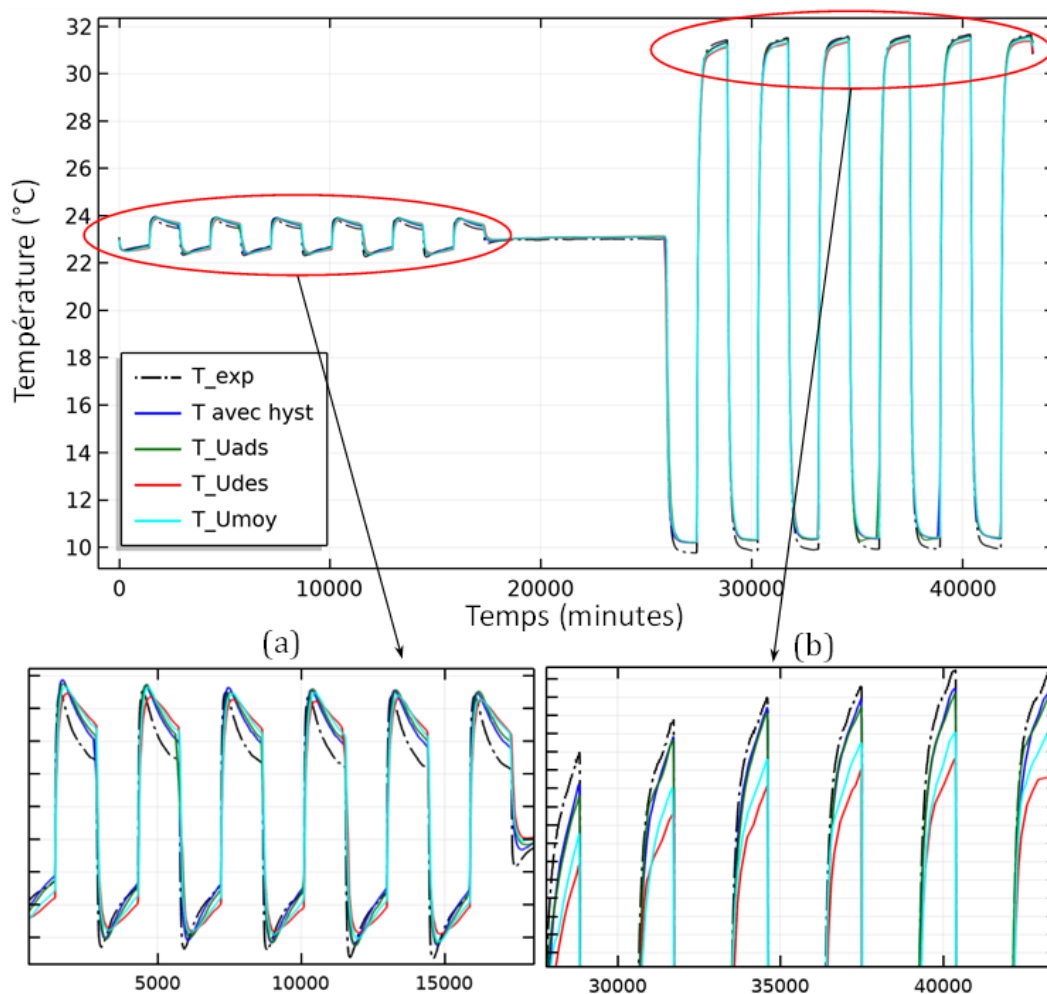


Figure VI-15. Evolution de la température dans le temps à ($x = 2,5$ cm de la surface extérieure).

A base de ces résultats, nous admettons que le modèle développé et la nouvelle méthode d'implémentation du phénomène d'hystérésis sur le logiciel Comsol Multiphysics sont validés et le modèle tenant compte d'hystérésis permet de donner des résultats plus proches de ceux obtenus expérimentalement. Nous pouvons donc l'utiliser dans les prochaines simulations.

VI.3. Effet du phénomène d'hystérésis sur la conductivité thermique du béton de chanvre

La conductivité thermique des matériaux de construction, notamment des matériaux biosourcés, est fortement dépendante de leur teneur en eau. Plus la conductivité thermique augmente, plus le matériau devient thermiquement conductible. Cela s'explique par la conductivité thermique de l'eau qui est trop élevée par rapport à celle de l'air. Comme nous l'avons présenté en haut, la prise en compte du phénomène d'hystérésis entre l'adsorption et la désorption, donne lieu à une teneur en eau du matériau différente de celle des courbes de sorption principales. Cette teneur en eau est décrite par les courbes intermédiaires qui sont comprises entre les deux courbes d'enveloppes (courbes d'adsorption et de désorption principales). Donc l'évaluation de la conductivité thermique du matériau en fonction de la teneur en eau décrite par les courbes d'enveloppes peut être différente de celle évaluée par la teneur en eau réelle qui tient compte d'hystérésis. Afin de confirmer cela, nous avons repris un résultat de la conductivité thermique du béton de chanvre qui dépend de la teneur en eau [5]. Deux simulations ont été effectuées sur la même configuration et les mêmes sollicitations présentées dans la Section (VI.2.3. b)). La première a été lancée en tenant compte du phénomène d'hystérésis et la deuxième en utilisant la teneur en eau moyenne des isothermes d'adsorption/désorption.

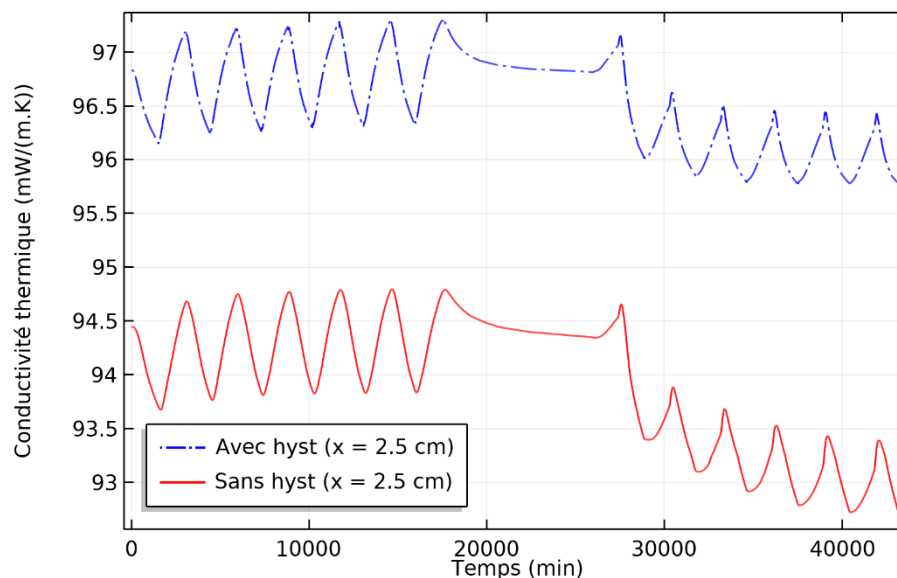


Figure VI-16. Effet d'hystérésis de la teneur en eau sur la conductivité thermique du béton de chanvre.

La Figure VI-16 montre l'effet du phénomène d'hystérésis sur l'évolution de la conductivité thermique du béton de chanvre. Nous remarquons que le fait de négliger le phénomène d'hystérésis conduit à la sous-estimation de la conductivité thermique réelle du béton de

chanvre. Cela est bien évidemment dû à la sous-estimation de la teneur en eau dans le cas d'omission de ce phénomène. Les écarts de conductivité thermique entre les deux cas étudiés sont de l'ordre de $3 \text{ mW}/(\text{m.K})$. De plus, il est important de rappeler que la simulation sans hystérésis a été effectuée en considérant la teneur en eau moyenne de l'isotherme de sorption. Autrement dit, cette conductivité thermique peut être sous-estimée ou surestimée davantage dans le cas où nous considérons respectivement l'isotherme d'adsorption ou de désorption principale.

Cette différence de conductivité thermique peut également engendrer des écarts sur la prédiction du comportement hygrothermique du béton de chanvre. En effet, les modèles de transferts sont sensibles aux variations de la conductivité thermique, cela peut donc affecter le comportement énergétique global de l'enveloppe du bâtiment. Afin de quantifier l'effet d'hystérésis de la conductivité thermique sur le comportement hydrique et thermique du béton de chanvre, deux simulations doivent être lancées en considérant le phénomène d'hystérésis de la teneur en eau. La seule différence entre les deux simulations sera donc au niveau de l'expression de la conductivité thermique : l'une sera lancée sans hystérésis et l'autre avec hystérésis.

Les résultats présentés dans la Figure VI-17 et la Figure VI-18 montrent l'effet d'hystérésis de la conductivité thermique sur les densités des flux d'humidité et de chaleur respectivement à l'intérieur de la paroi ($x = 10 \text{ cm}$).

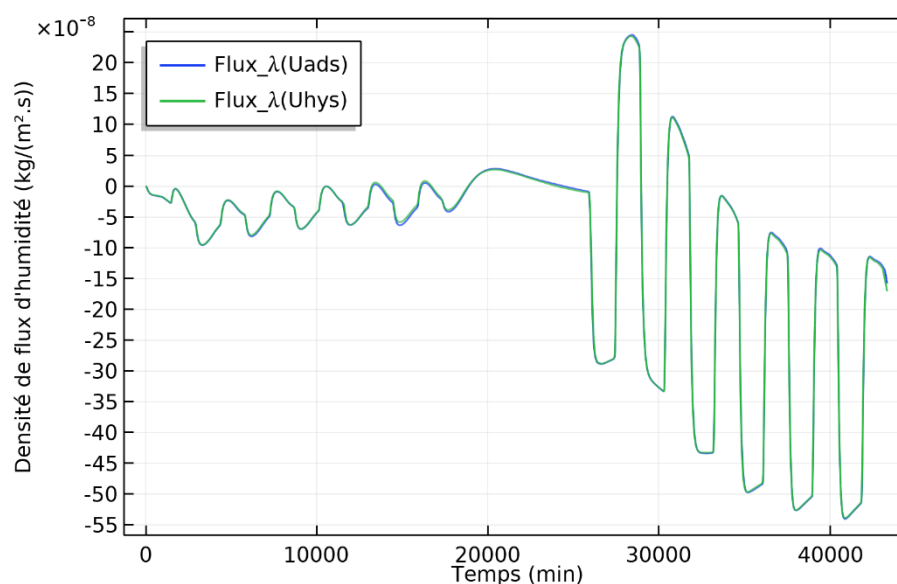


Figure VI-17. Effet d'hystérésis de la conductivité thermique sur la densité de flux hydrique : $Flux_{\lambda}(U_{ads,hys})$ signifie la densité de flux hydrique simulée en considérant la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau d'adsorption et d'hystérésis, respectivement.

Les résultats de la Figure VI-17 montrent clairement que l'hystérésis de la conductivité thermique n'a pratiquement pas d'effet sur la densité de flux d'humidité. Cela s'explique par les faibles apports des transferts thermiques aux transferts hydriques. Cependant, nous pouvons remarquer sur la Figure VI-18 que ce phénomène a un impact sur la densité de flux de chaleur totale. Les écarts dépassent 1 W/m^2 , notamment dans la phase où les conditions aux limites ont été prises non isothermes. Dans le cas où la conductivité thermique est estimée en considérant le phénomène d'hystérésis, le matériau est plus conducteur par rapport au cas où ce phénomène est négligé et par conséquent, le flux de chaleur total est légèrement plus élevé en raison de la cinétique de transfert de la chaleur. A base de ces résultats, nous pouvons conclure que le phénomène d'hystérésis a également un impact direct sur la conductivité thermique, qui à son tour, a un impact sur le comportement hygrothermique du matériau.

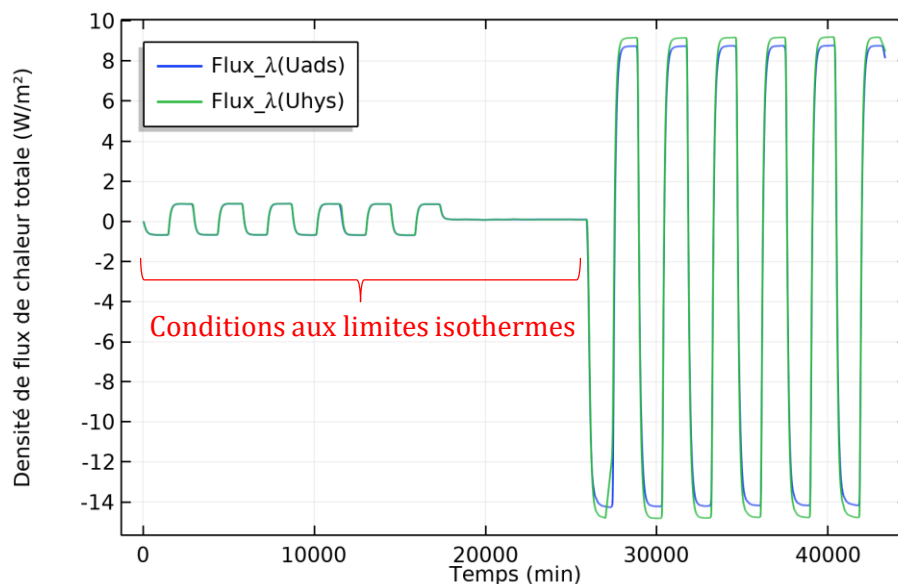


Figure VI-18. Effet d'hystérésis de la conductivité thermique sur la densité de flux chaleur totale : $Flux_{\lambda}(U_{ads,hys})$ signifie la densité de flux de chaleur simulée en considérant la conductivité thermique en fonction respectivement de la teneur en eau d'adsorption et d'hystérésis.

VI.4. Effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre

Dans cette partie, nous allons utiliser le modèle développé et validé sans et avec hystérésis afin d'évaluer le comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre soumise à des conditions climatiques réelles. L'objectif est de mettre en exergue l'effet du phénomène d'hystérésis sur la prédiction du comportement hygrothermique de ce matériau.

VI.4.1. Configurations étudiées

Afin de parvenir aux objectifs souhaités, nous avons considéré une configuration simple constituée d'une paroi en béton de chanvre de 20 cm d'épaisseur.

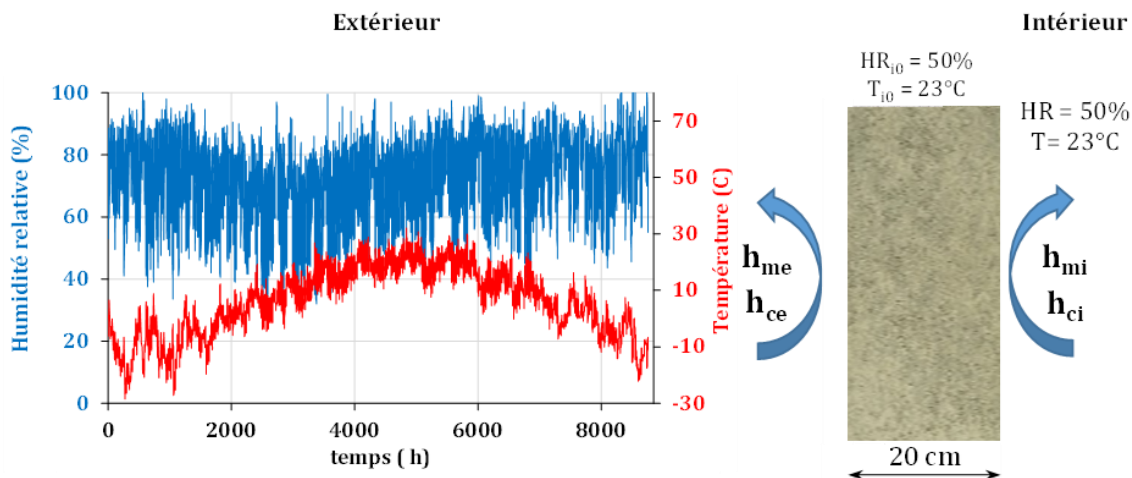


Figure VI-19. Configuration étudiée et conditions climatiques appliquées : Ville de Montréal au Canada.

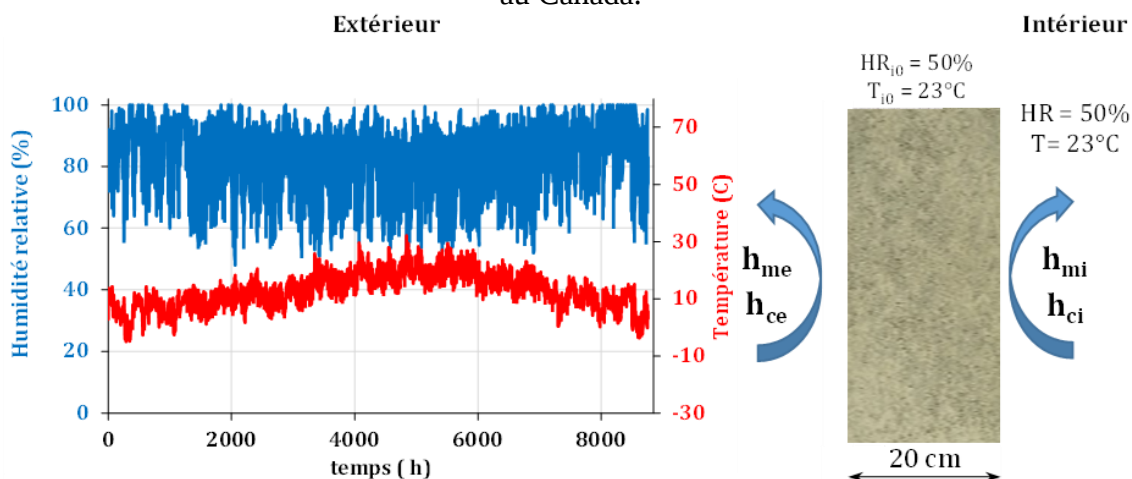


Figure VI-20. Configuration étudiée et conditions climatiques appliquées : Ville de La Rochelle en France.

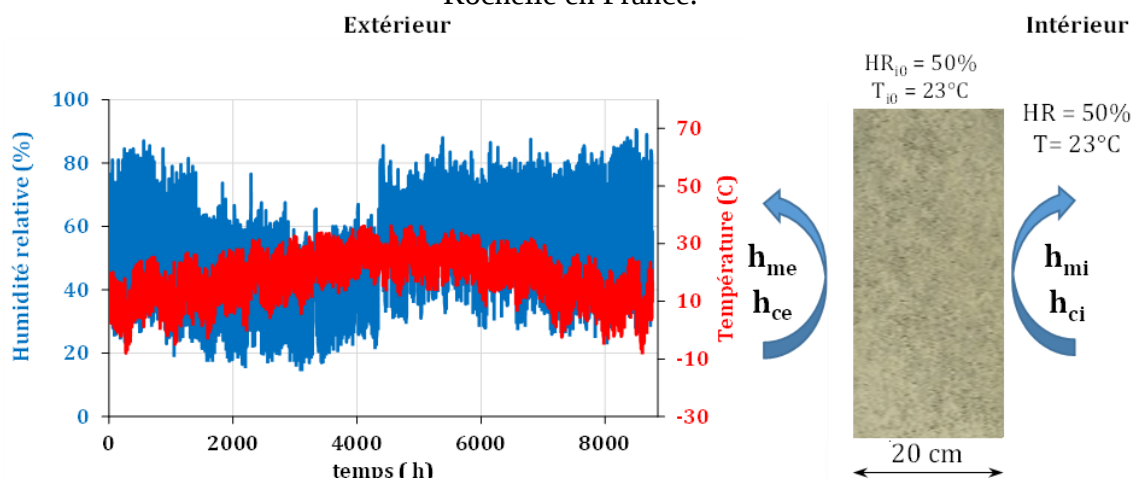


Figure VI-21. Configuration étudiée et conditions climatiques appliquées : Ville Chihuahua au Mexique.

Dans ce cas de figure, nous avons appliqué des conditions climatiques réelles de différentes villes, à savoir : La Rochelle en France, Montréal au Canada et Chihuahua au Mexique. Les conditions initiales et les différentes conditions climatiques (aux limites) appliquées sont présentées respectivement dans les Figure VI-19, Figure VI-20 et Figure VI-21. L'évolution de la température et de l'humidité relative dans le temps a été comparée à trois profondeurs de la paroi étudiée, à savoir : à 5 cm, 10 cm et à 15 cm de la surface extérieure.

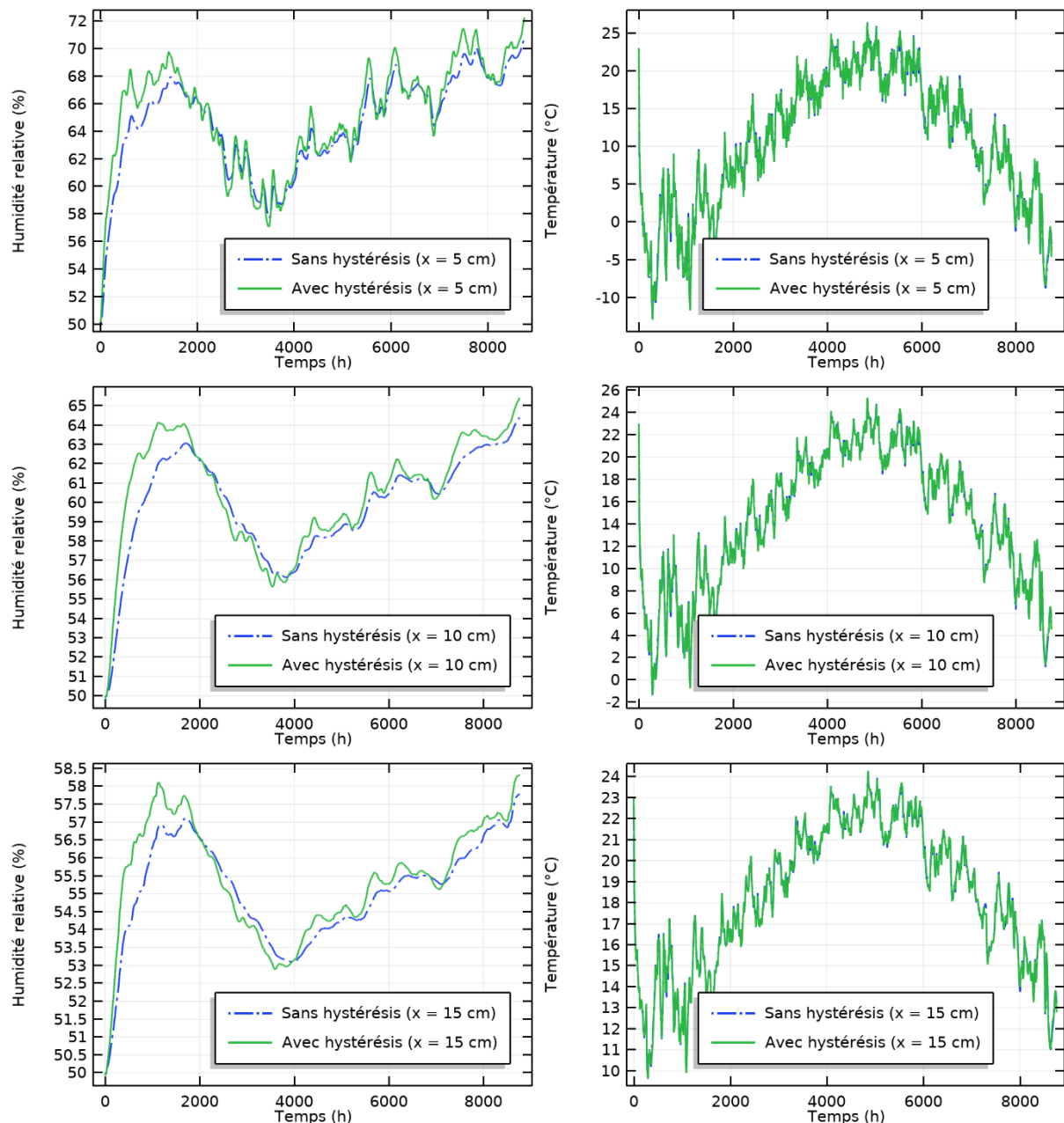


Figure VI-22. Evolution de l'humidité relative (à gauche) et de la température (à droite) dans le temps à différentes profondeurs (sans et avec hystérésis) : Ville de Montréal.

La Figure VI-22, Figure VI-23 et la Figure VI-24 présentent les résultats des simulation numériques en termes de température et d'humidité relative effectuées respectivement sur les villes de Montréal, La Rochelle et Chihuahua. Les simulations ont été réalisées sur une

période d'un an en commençant par le mois de janvier. Les simulations sans hystérésis ont été obtenues en considérant la courbe de désorption. Tout d'abord, nous pouvons remarquer, pour les différentes profondeurs et les différents climats, que la réponse du matériau aux sollicitations hydriques extérieurs est importante dans le cas où le phénomène d'hystérésis est pris en compte. En effet, l'amplitude de variation d'humidité relative est sous-estimée dans le cas où le phénomène d'hystérésis est négligé. Ces écarts sont dus au fait que le modèle d'hystérésis estime les teneurs en eau sur les boucles de sorption intermédiaires limitées par les courbes de sorption principales.

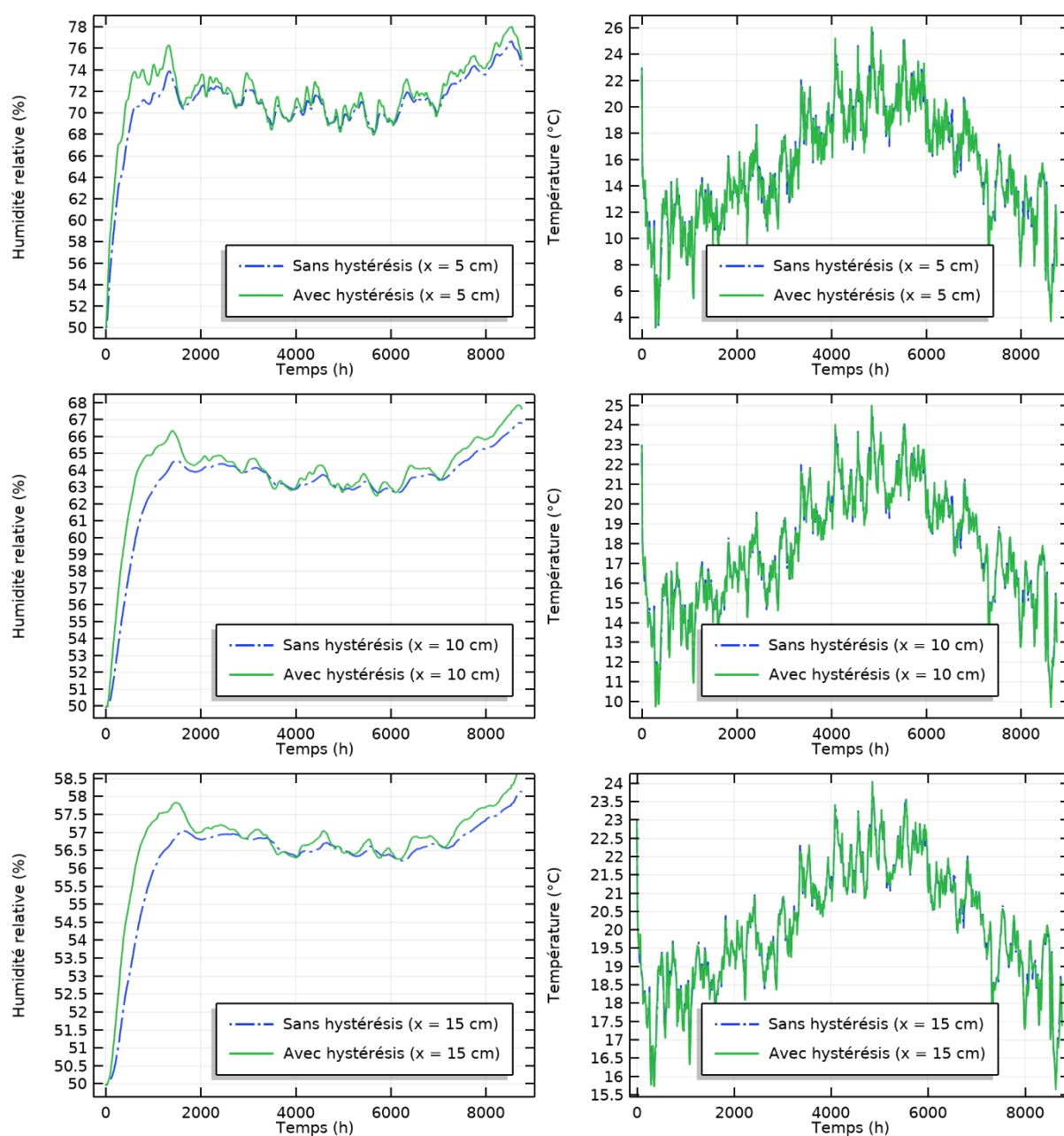


Figure VI-23. Evolution de l'humidité relative (à gauche) et de la température (à droite) dans le temps à différentes profondeurs (sans et avec hystérésis) : Ville de La Rochelle.

L'utilisation de la courbe d'adsorption principale conduit à la sous-estimation de la teneur en eau du matériau et l'utilisation de la courbe de désorption principale conduit à l'inverse. Nous pouvons remarquer également que la prise en compte de ce phénomène a permis d'amplifier légèrement la cinétique de transfert de masse. Le matériau répond donc plus rapidement aux sollicitations extérieures et les amplitudes de variation des humidités relatives ont augmenté de plus de 3%, notamment à 5 cm de profondeur.

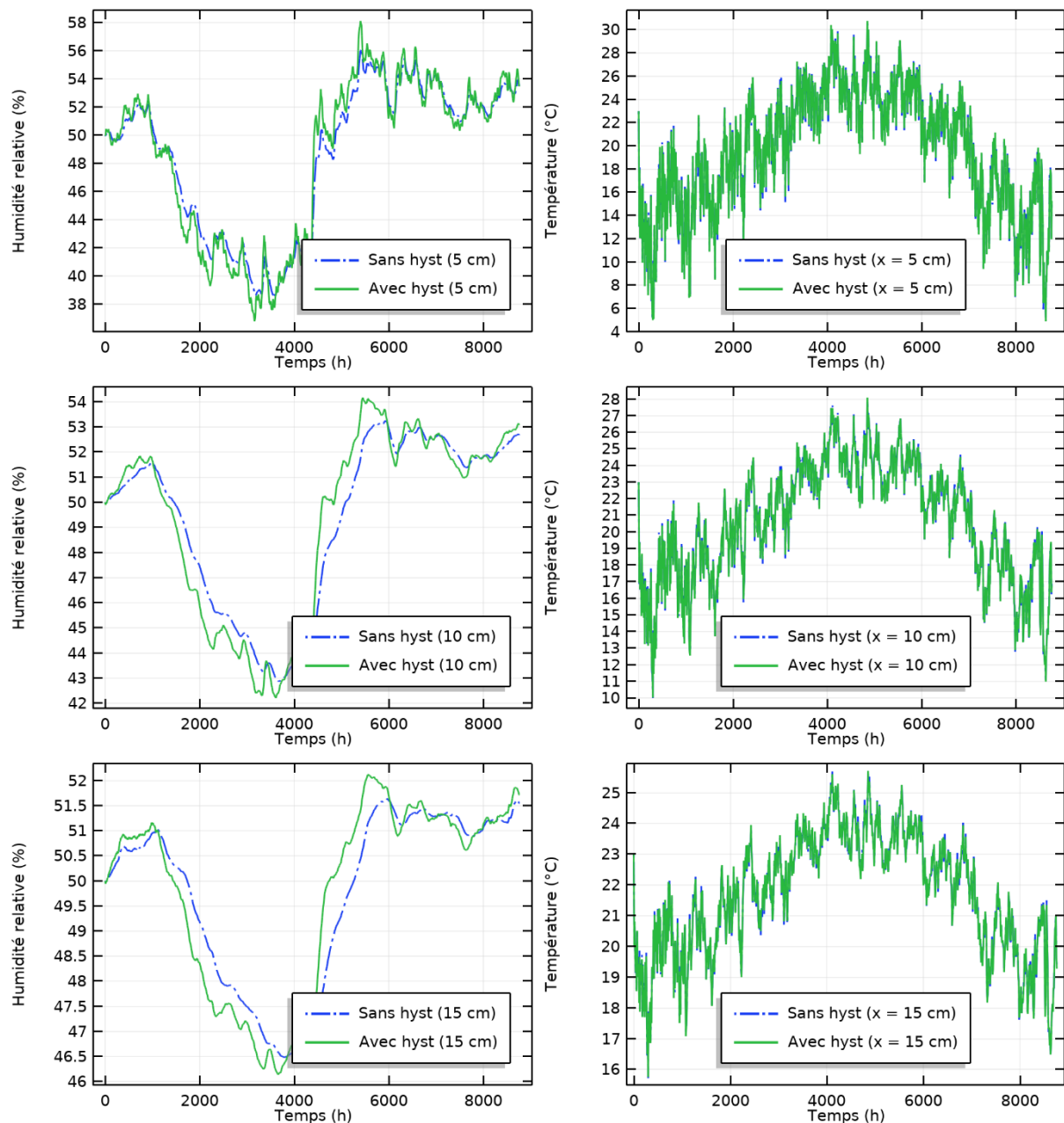


Figure VI-24. Evolution de l'humidité relative (à gauche) et de la température (à droite) dans le temps à différentes profondeurs (sans et avec hystérésis) : Ville de Chihuahua.

Ces écarts peuvent être amplifiés davantage en fonction des conditions climatiques appliquées comme nous l'avons vu dans le cas de la validation du modèle numérique en haut. En effet, la

prise en compte du phénomène d'hystérésis donne lieu à une évolution de l'humidité relative supérieure à celle que nous pouvons prédire dans le cas où ce phénomène est négligé. Cela peut donc avoir des conséquences non négligeables sur les risques de condensation et de développement des moisissures dans les parois. Par conséquent, cela peut affecter non seulement la durabilité de ces matériaux, mais aussi la santé des occupants, d'où la nécessité d'en tenir compte pour améliorer la qualité de la prédiction du comportement hygrothermique des matériaux de construction.

Concernant les transferts de chaleur, nous n'avons pratiquement pas noté d'effet significatif de ce phénomène sur l'évolution de la température dans le temps. Cela s'explique par le fait que le phénomène d'hystérésis est pris en compte via la capacité de stockage d'humidité qui affecte principalement les transferts de masse. Les écarts enregistrés sur l'évolution de l'humidité relative dans le temps entre les deux cas de simulations (sans et avec hystérésis) n'étaient pas suffisants pour induire des modifications notables sur les transferts de chaleur. Par conséquent, les écarts qui peuvent être survenues de la contribution des transferts de masse, notamment les transferts dus aux flux latents étaient également négligeables, ce qui justifie les résultats obtenus sur l'évolution de la température dans le temps.

VI.5. Effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique et la consommation énergétique à l'échelle du bâtiment

Nous avons vu précédemment que l'effet du phénomène d'hystérésis est plus visible sur les transferts de masse. Il serait donc intéressant de s'intéresser et de quantifier les flux hydriques au niveau de la surface intérieure de la paroi étudiée afin d'évaluer leurs impacts sur l'humidité relative et la température de l'ambiance habitable. En effet, les parois extérieures représentent un siège des flux thermiques et hydriques. Selon les conditions climatiques appliquées, ces parois qui sont en contact direct avec l'ambiance habitable peuvent donc être considérées comme une source de production ou de perte de la vapeur d'eau et de la chaleur. Autrement dit, ces apports et/ou pertes de flux provenant de la paroi et qui doivent être pris en compte dans le bilan global méritent d'être quantifiés afin de voir l'effet du phénomène d'hystérésis sur les différents paramètres de l'ambiance habitable.

VI.5.1. Présentation du cas d'étude

Le cas d'étude proposé dans cette partie consiste à combiner le modèle des transferts couplés de chaleur et de masse (implémenté dans Comsol : avec et sans hystérésis) avec un code de simulation thermique dynamique du bâtiment (TRNSYS). L'objectif de cette démarche est de

prendre en compte les apports et/ou pertes des flux hydriques provenant de la paroi en contact avec l'environnement extérieur. De plus, cela permettra d'assurer, d'une part, une meilleure qualité de prédiction, et d'autre part, de déduire l'effet du phénomène d'hystérésis sur les performances hygrothermiques globales de l'ambiance habitable et la consommation énergétique du bâtiment. Pour cela, un exemple d'une maison occupée a été proposée (voir Figure VI-25).

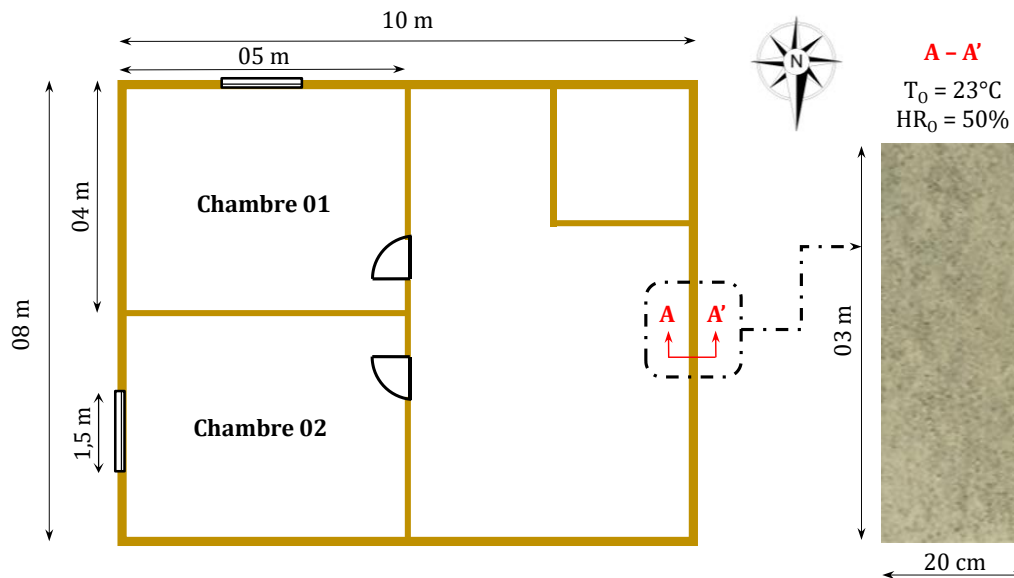


Figure VI-25. Schéma de la maison étudiée (à gauche) et coupe transversale de la paroi extérieure (à droite).

La maison étudiée est construite sur une ossature en bois et l'enveloppe extérieure de la construction est supposé être entièrement réalisée en béton de chanvre. Dans les simulations, seul le mur en béton de chanvre de 20 cm d'épaisseur a été considéré. Les conditions initiales et aux limites extérieures de la paroi présentées dans la Section VI.4.1. sont maintenues dans ce cas d'étude sauf les conditions aux limites intérieures qui ont été calculées sur la base des scénarios appliqués sur TRNSYS pour modéliser l'ambiance habitable de la maison proposée (voir Figure VI-26). La chambre 01 accueille deux personnes (parents), tandis que la chambre 02 accueille une seule personne (enfant). Nous supposons que le métabolisme de l'adulte et celui de l'enfant sont identiques.

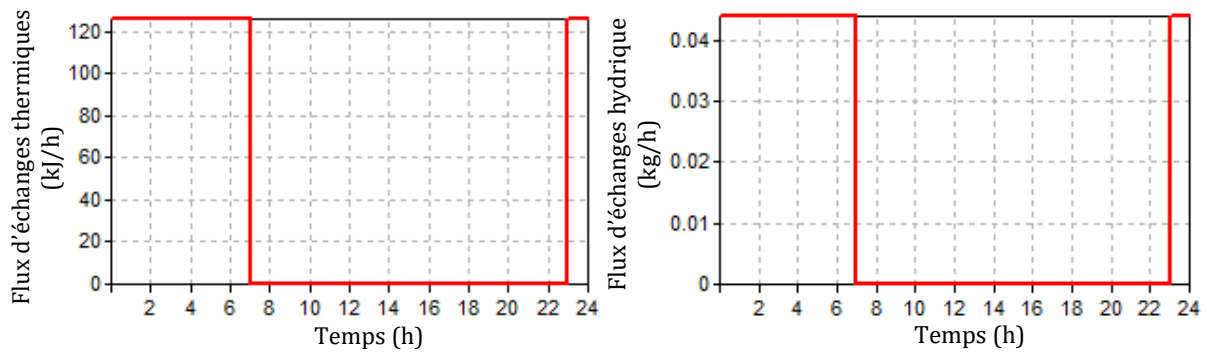


Figure VI-26. Scénarios d'échanges thermiques (à gauche) et hydriques (à droite) d'une seule personne en état de repos dans l'ambiance habitable.

Quant à la ventilation, elle a été assurée par insufflation sur les deux chambres ($T = 20^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 50\%$) et ensuite par extraction au niveau des salles humides (cuisine + WC). Le calcul a été effectué conformément à la réglementation définissant les débits minimaux et maximaux dans un logement. Nous avons supposé un débit maximal de 4 heures et un débit minimal de 20 heures. Dans notre cas, la maison proposée est un T2. Nous obtenons donc un débit simplifié total soufflé de $67.5 \text{ m}^3/\text{h}$. Ce qui donne un débit de $33.75 \text{ m}^3/\text{h}$ pour chaque chambre, $15 \text{ m}^3/\text{h}$ extrait en WC et $52.5 \text{ m}^3/\text{h}$ extrait en cuisine.

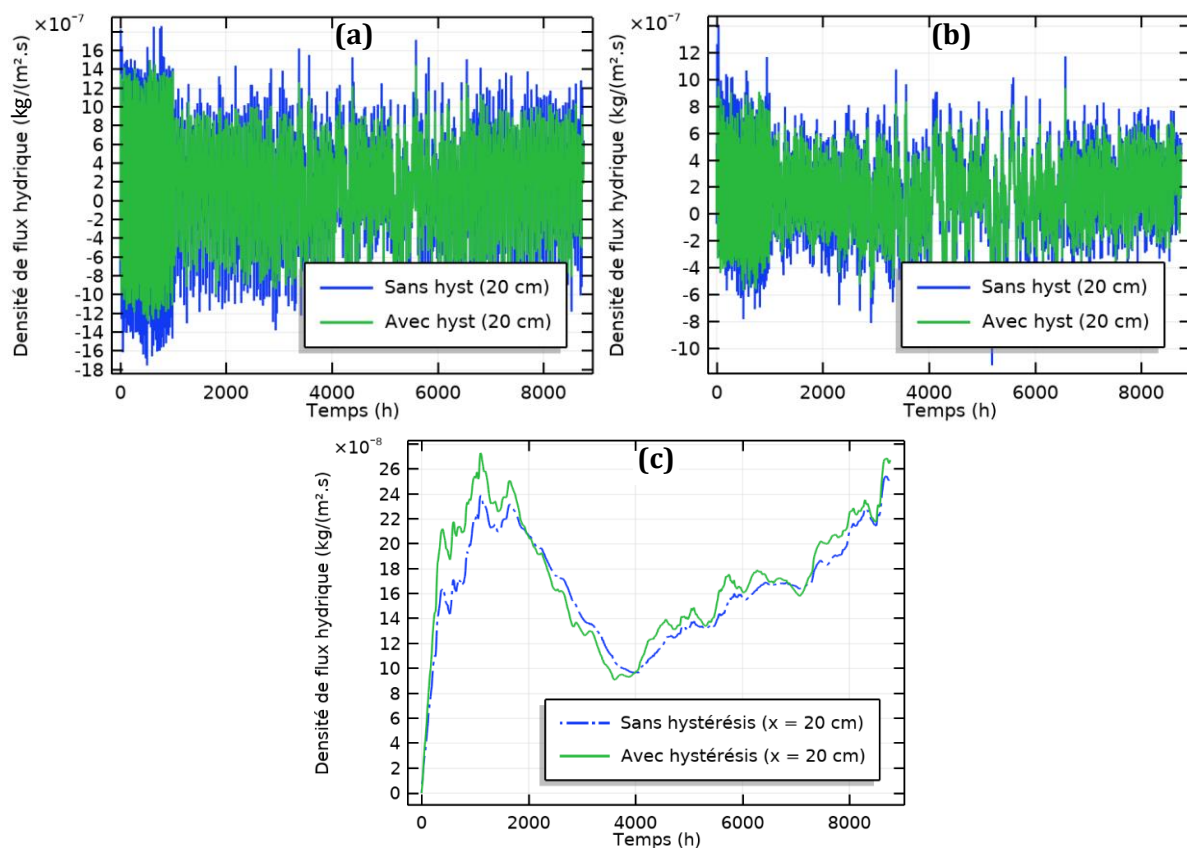


Figure VI-27. Evolution des flux hydriques dans le temps (sans et avec hystérésis) pour différentes conditions aux limites intérieures: (a) en tenant compte des conditions réelles de la

chambre 01, (b) en tenant compte des conditions réelles de la chambre 02 et (c) en supposant des conditions constantes ($T = 23^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 50\%$) dans l'ambiance habitable.

La Figure VI-27(a) et (b) présente les flux hydriques (sans et avec hystérésis) évalués sur la surface intérieure de la paroi étudiée (à 20 cm de la surface extérieure) pour des conditions climatiques extérieures de la ville de Montréal. La Figure VI-27(c) a été obtenue pour des conditions aux limites intérieures constantes ($\text{HR} = 50\%$ et $T = 23^{\circ}\text{C}$) et les résultats des Figure VI-27(a) et VI-27(b) ont été obtenues pour des conditions aux limites intérieures dynamiques calculées à partir des scénarios modélisant l'intérieur des chambres 01 et 02 de la maison étudiée. Les résultats montrent des écarts non négligeables entre les deux cas de simulation. Ces écarts varient en fonction des conditions climatiques appliquées. En effet, dans le cas des conditions climatiques intérieures constantes, la négligence du phénomène d'hystérésis sous-estime les flux hydriques intérieurs. Cependant, dans le cas des conditions aux limites intérieures dynamiques, l'omission de ce phénomène conduit à la surestimation de ces flux d'humidité. Ceci est principalement dus aux gains et pertes hydriques à travers la paroi étudiée. Il est important de préciser que ce constat concerne uniquement les conditions aux bords de la paroi.

En effet, le code de simulation thermique TRNSYS ne prend en compte que les transferts thermiques en raison du manque d'un modèle hydrique représentant la paroi. L'objectif de cette partie consiste donc à prendre en compte l'effet du phénomène d'hystérésis à l'échelle de la paroi afin d'évaluer son impact sur le comportement hygrothermique des ambiances habitables ainsi que sur la consommation énergétique de la maison étudiée en couplant les deux logiciels Comsol et TRNSYS. Cela permet d'intégrer les apports de masse provenant des parois extérieures dans le bilan global. Dans cette partie, les simulations concernent uniquement le cas des conditions intérieures dynamiques en appliquant les flux hydriques (a et b) présentés dans la Figure VI-27. L'étude sera concentrée donc sur les chambres 01 et 02. De plus, nous présentons uniquement les résultats obtenus sur la ville de Montréal au Canada.

La Figure VI-28 et la Figure VI-29 présentent respectivement l'évolution de la température et de l'humidité relative dans l'ambiance habitable des chambres 01 et 02 en considérant la contribution hygrothermique provenant des parois extérieures de la maison (sans et avec hystérésis). Nous remarquons clairement que l'effet d'hystérésis n'a aucun impact sur l'évolution des températures dans l'ambiance des deux chambres de la maison. Cependant, ce phénomène a un impact non négligeable sur l'évolution de l'humidité relative où les écarts dépassent les 5%. Nous pouvons également constater que l'effet de ce phénomène est plus

marquant durant les deux premiers mois de la période hivernale (janvier et février). Cela peut s'expliquer par le fait que les conditions aux limites intérieures appliquées en termes d'humidité relative ont une amplitude importante et varient d'une manière un peu homogène durant ces deux mois par rapport aux autres mois. Pour mieux illustrer cela, nous avons rajouté une comparaison entre les humidités relatives de la première semaine de février et celle de juillet (voir Figure VI-29).

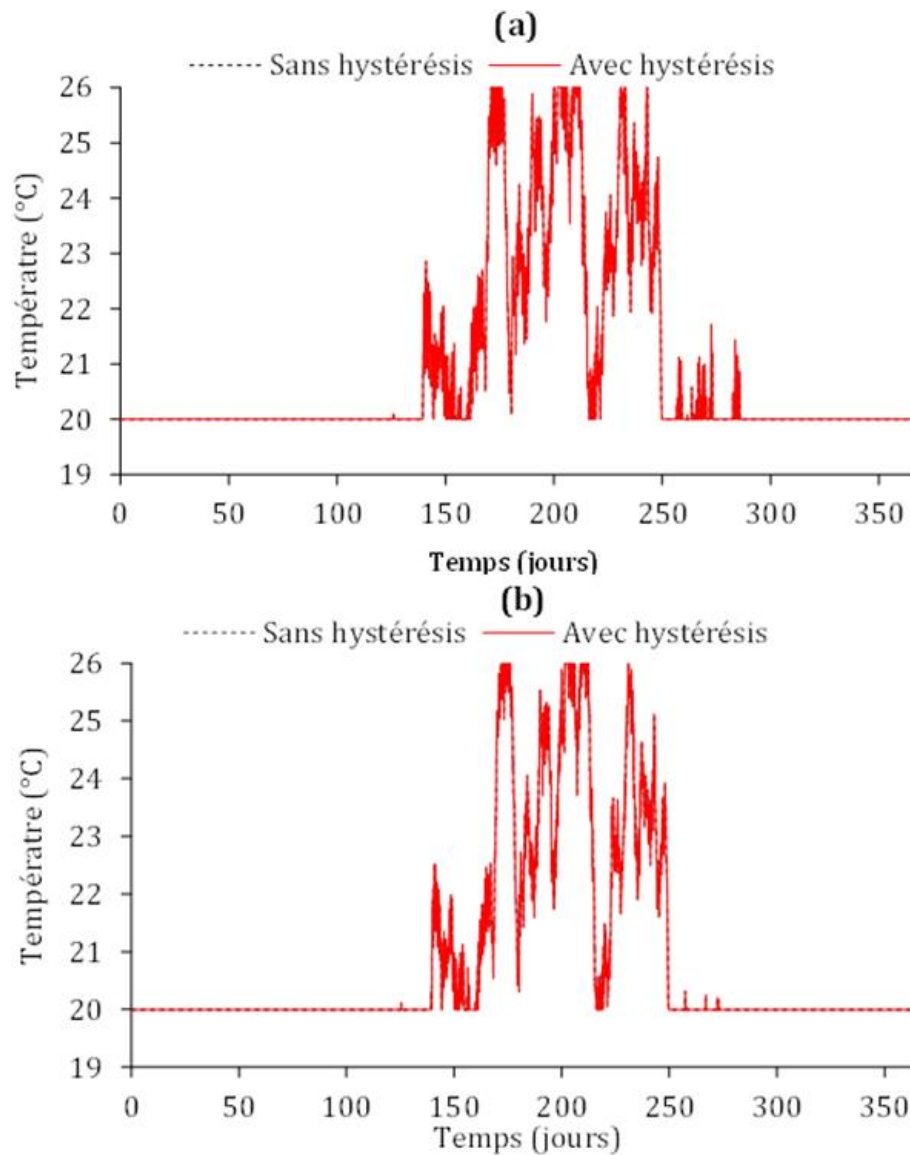


Figure VI-28. Evolution de la température dans la chambre 01 (a) et la chambre 02 (b) pendant un an : Climat de Montréal.

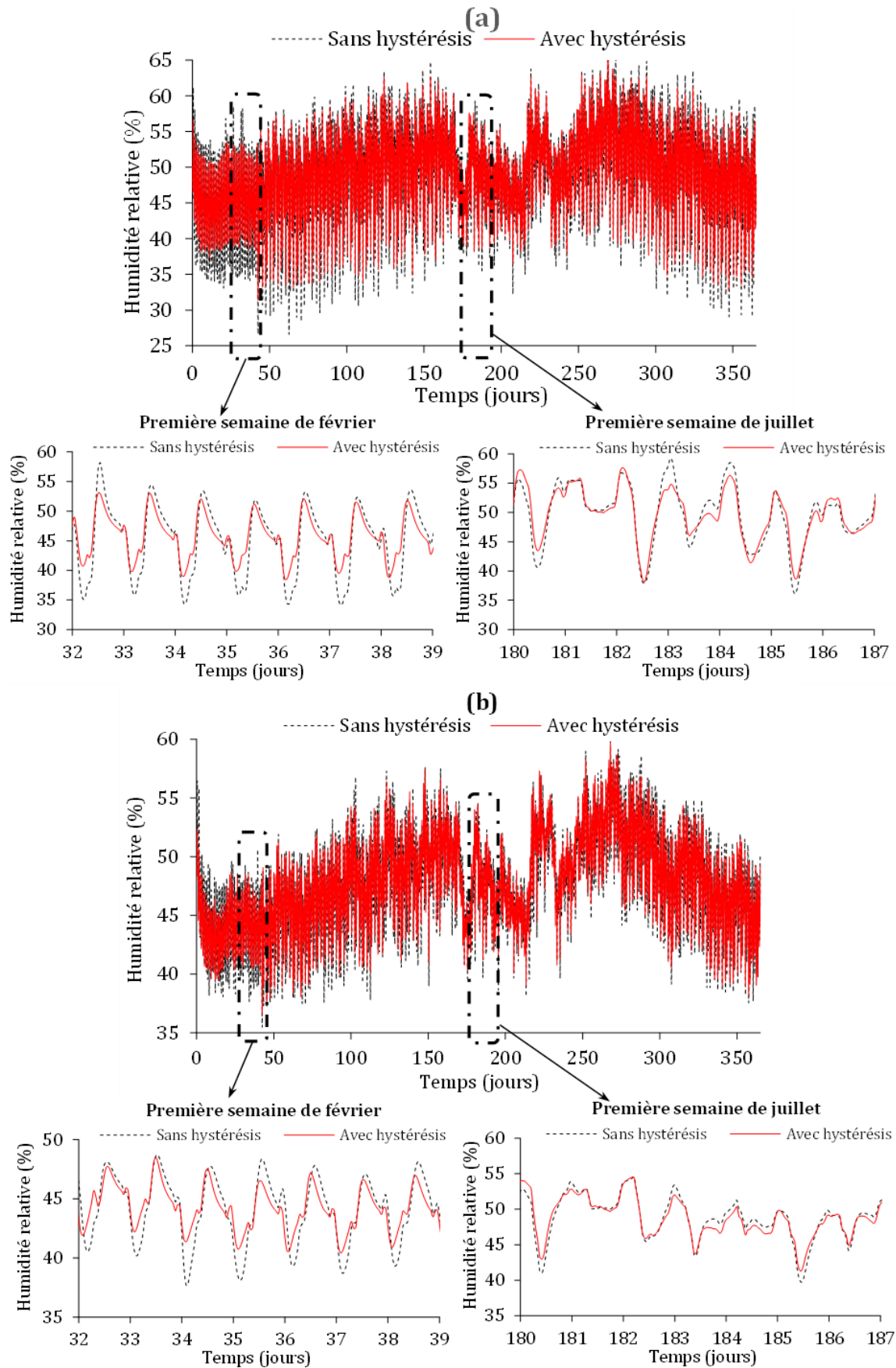


Figure VI-29. Evolution de l'humidité relative dans la chambre 01 (a) et la chambre 02 (b) pendant un an : Climat de Montréal.

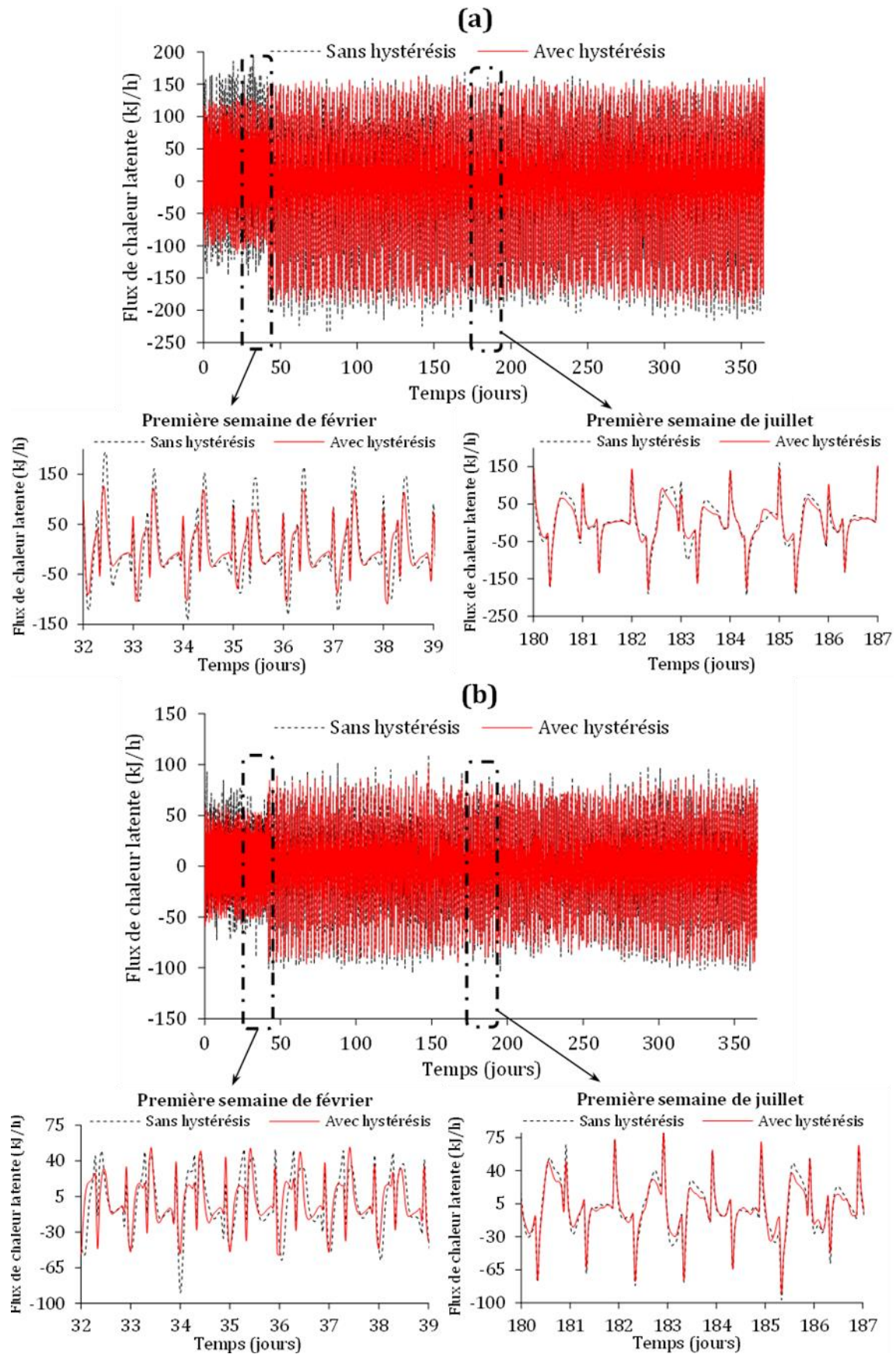


Figure VI-30. Evolution des flux de chaleur latente dans la chambre 01 (a) et la chambre 02 (b) pendant un an : Climat de Montréal.

Comme nous l'avons présenté précédemment, le phénomène d'hystérésis n'a pas d'impact significatif sur l'évolution de la température dans le temps. Cela n'aura donc pas d'impact sur les flux de chaleur sensible. Cependant, l'effet de ce phénomène a un impact sur l'évolution de l'humidité relative. Cela peut donc avoir un impact sur l'évolution des flux de chaleur latente qui sont directement liés à la consommation énergétique de la maison. C'est pourquoi nous avons quantifié ces derniers afin de montrer clairement l'effet du phénomène d'hystérésis. La Figure VI-30 montre l'évolution des flux de chaleur latente dans les deux chambres 01 et 02. Les résultats montrent des écarts significatifs entre les deux cas de simulation (sans et avec hystérésis), notamment dans la chambre 01 qui accueille deux personnes. Ce constat est plus visible dans la Figure VI-31 qui montre les écarts des flux de chaleur latente entre les deux cas de simulations dans les deux chambres.

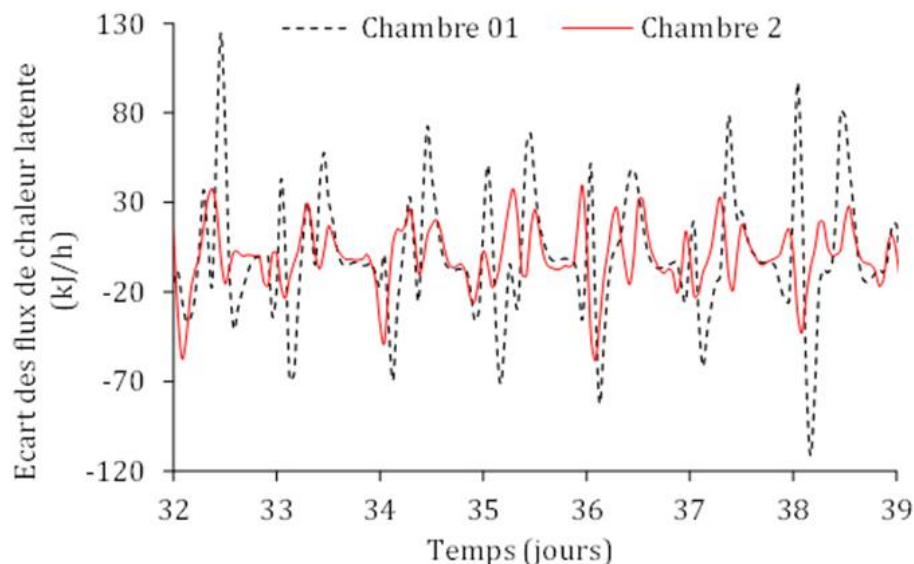


Figure VI-31. Ecarts entre les flux de chaleur latente des deux cas de simulation (sans et avec hystérésis) dans les chambres 01 et 02 durant la première semaine de février : Climat de Montréal.

Nous remarquons que les écarts des flux latents entre les deux cas de simulation dépassent les 120 kJ/h dans la chambre 01 et 60 kJ/h dans la chambre 02. Le phénomène d'hystérésis a donc un impact non seulement sur la prédiction de l'humidité relative dans l'ambiance habitable, mais aussi sur la prédiction de la consommation énergétique. C'est pourquoi la prise en compte de ce phénomène est primordiale pour mieux appréhender les performances hygrothermiques des enveloppes des bâtiments.

Par ailleurs, afin de mieux illustrer l'effet de ce phénomène sur la prédiction des gains et/ou pertes des flux de chaleur totale dans les deux chambres, nous avons rajouté le cumule des

flux entrants et sortants durant les premières semaines des mois de février (période hivernale) et de juillet (période estivale) (voir Figure VI-32 et Figure VI-33).

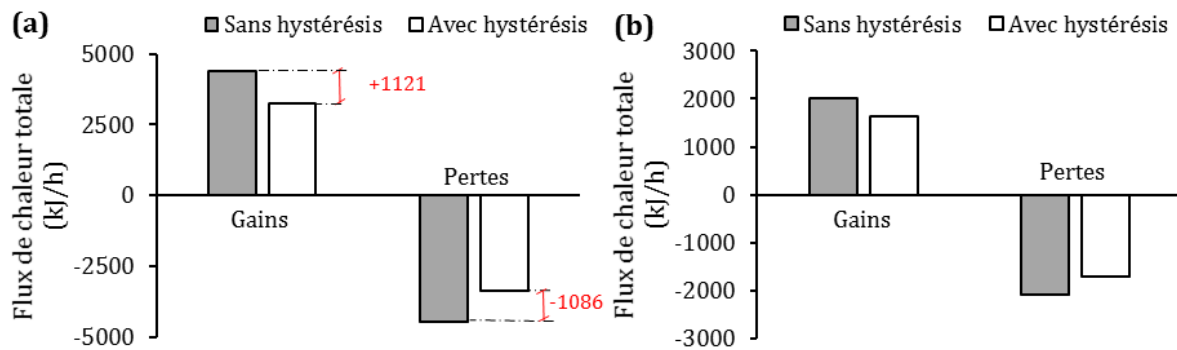


Figure VI-32. Gains et pertes de flux de chaleur totale durant la première semaine de février dans la chambre 01 (a) et la chambre 02 (b).

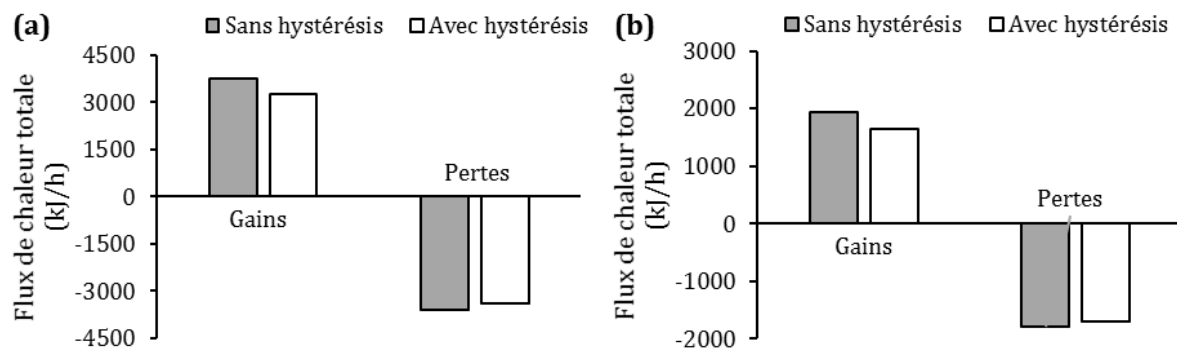


Figure VI-33. Gains et pertes des flux de chaleur totale durant la première semaine de juillet dans la chambre 01 (a) et la chambre 02 (b).

Les résultats présentés dans la Figure VI-32 et la Figure VI-33 mettent en exergue l'effet d'hystérésis sur les flux de chaleur entrants et sortants. Nous avons enregistré respectivement des écarts (sans et avec hystérésis) de gain et de perte maximaux de 1121 kJ/h et 1086 kJ/h dans la chambre 01 durant la première semaine de février (hiver). Ces écarts sont sensiblement liés, d'une part, au nombre de personnes présentes dans l'ambiance habitable, et d'autre part, aux conditions climatiques appliquées. Enfin, pour une meilleure prédiction du comportement hygrothermique et de la consommation énergétique à différentes échelles, la prise en compte du phénomène d'hystérésis est indispensable.

VI.6. Conclusion

Ce chapitre met en évidence l'importance de s'affranchir de l'hypothèse de la non prise en considération du phénomène d'hystérésis entre les isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau pour améliorer la qualité de la prédiction du comportement hygrothermique des matériaux. Pour cela, le modèle physique d'hystérésis de Carmeliet basé

sur le modèle de Mualem a été couplé au modèle de transferts couplés de chaleur et de masse présenté dans le chapitre précédent. Une nouvelle méthode d'implémentation a été réalisée en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics et sans avoir besoin à un autre outil de programmation, et ce, grâce à la possibilité de récupérer la solution précédente des variables pour chaque pas de temps. Le modèle développé a été ensuite validé en confrontant les résultats numériques à ceux issus de l'expérimental à l'échelle du matériau et à l'échelle de la paroi. Cette confrontation a montré une amélioration de la qualité de la prédiction du modèle de transfert de chaleur et de masse tenant compte du phénomène d'hystérésis. Par ailleurs, l'effet de ce phénomène sur la conductivité thermique a été également étudié. Les résultats ont montré que l'hystérésis a un impact direct sur la conductivité thermique, qui à son tour, a un impact sur le comportement hygrothermique du matériau.

Plusieurs simulations ont été ensuite effectuées sur une paroi en béton de chanvre soumise à des conditions climatiques dynamiques réelles de plusieurs villes, à savoir : la ville de La Rochelle en France, Montréal au Canada et enfin Chihuahua au Mexique. L'objectif étant de déduire l'effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi. Les résultats obtenus sur les différents climats ont montré des écarts sensibles en humidité relative entre les deux cas de simulations (sans et avec hystérésis). En effet, la négligence du phénomène d'hystérésis conduit à la sous-estimation des variations d'humidité relative dans le matériau. De plus, la cinétique des transferts de masse est également sous-estimée. Cela peut donc conduire à une mauvaise prédiction, non seulement des risques de condensation dans les parois, mais aussi des risques de développement des moisissures qui causent la dégradation du matériau et affectent la santé des occupants.

Etant donné que la paroi du béton de chanvre est en contact direct avec l'ambiance habitable, elle peut donc être considérée comme une source de production ou de perte de la vapeur d'eau et de la chaleur. Ces apports et/ou pertes de flux hydriques ont été évalués sans et avec hystérésis sur la surface intérieure de la paroi. Nous avons remarqué sur les limites de la paroi du béton de chanvre, que lorsque les conditions aux limites intérieures sont constantes, les flux hydriques intérieurs sont sous-estimés dans le cas d'omission du phénomène d'hystérésis. Cependant, ces derniers sont surestimés dans le cas des conditions aux limites intérieures dynamiques. L'impact du phénomène d'hystérésis sur les performances hygrothermiques de l'ambiance habitable d'une maison ainsi que sur sa consommation énergétique a été donc évalué en couplant les deux logiciels Comsol Multiphysics et TRNSYS. Les résultats ont montré des écarts sensibles en termes d'humidité relative dans l'ambiance habitable.

Cependant, aucune différence n'a été enregistrée sur les températures. Par ailleurs, les flux de chaleur totale ont été également affectés par le phénomène d'hystérésis en raison des flux de chaleur latente qui dépendent des variations de l'humidité relative. Des écarts de gain et de perte maximaux des flux de chaleur totale, respectivement de 1121 kJ/h et 1086 kJ/h ont été enregistrés durant la première semaine du mois de février (période hivernale). Pour conclure, la prise en compte du phénomène d'hystérésis dans la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité est indispensable pour assurer une meilleure qualité de prédiction des modèles numériques. La considération de ce phénomène permettra non seulement d'améliorer la prédiction du comportement hygrothermique des matériaux à différentes échelles, mais aussi la prédiction de la consommation énergétique dans l'ambiance habitable.

Conclusion générale et perspectives

Le bâtiment est l'un des secteurs les plus énergivores et consommateurs d'énergie fossile. Il est responsable d'émission importante de quantité de gaz à effet de serre et contribue significativement au réchauffement climatique. L'une des solutions envisagées permettant de remédier à ce constat alarmant a consisté à prêter une attention particulière aux choix des matériaux de construction en privilégiant le recours et l'utilisation des matériaux biosourcés à base de ressources locales et renouvelables.

Dans ces recherches, les performances hygrothermiques et mécaniques de deux matériaux biosourcés à base d'anas de lin et de chanvre ont été analysées. L'objectif final recherché est de lever certains verrous scientifiques qui demeurent en suspens. Parmi ces derniers on peut citer l'effet de la formulation et du vieillissement sur la microstructure et les propriétés fonctionnelles de ces matériaux. Aussi, l'effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre de l'échelle du matériau à celle du bâtiment constitue aussi une préoccupation de la communauté scientifique.

A cette fin, une revue bibliographique a été entreprise dans le but de réaliser un état de l'art des connaissances et mécanismes élucidés dédiée à la thématique de recherche doctorale. Nous avons présenté et décrit les différents modèles de références des transferts de chaleur et de masse ainsi que les différentes méthodes de caractérisation expérimentales permettant de mesurer les paramètres d'entrées de ces modèles. Cela nous a permis de comprendre les différents modes de fixation d'eau à l'échelle microscopique et de mieux appréhender les mécanismes mis en jeu lors de ces transferts. Cet état de l'art a permis de cerner la thématique abordée sur les transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux et de montrer l'importance de faire un choix adéquat des matériaux de construction pour préserver l'environnement.

Ensuite, nous avons présenté dans le chapitre qui suit, les matériaux étudiés et les différentes méthodes de caractérisation expérimentales permettant d'évaluer leurs propriétés microstructurales, hydriques, thermiques, physiques et mécaniques. De plus, un programme expérimental permettant d'étudier l'effet de la formulation et du vieillissement sur ces matériaux a été présenté. Concernant l'effet de la formulation sur les propriétés hygrothermiques et mécaniques du béton de lin, plusieurs formulations ont été analysées en variant la taille et la teneur en particules végétales incorporées dans le matériau. Les

observations microscopiques au MEB ont montré que les anas de lin présentent une microstructure poreuse et complexe. L'incorporation de ces particules végétales dans un liant à base de la chaux (Tradical PF 70) a permis d'obtenir un matériau léger avec des propriétés hygrothermiques prometteuses. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la quantité de ces anas dans la matrice entraîne, d'une part, une augmentation de la porosité totale à l'eau, de la capacité de tampon à l'humidité (MBV) et de la teneur en eau maximale absorbée, et d'autre part, une réduction de la masse volumique apparente, de la conductivité thermique et de la résistance à la compression. De plus, une dépendance entre la taille des anas de lin et du MBV a été notée. En effet, il a été constaté que plus la taille de ces particules végétales augmente, plus la capacité du matériau à réguler l'humidité augmente. Ce constat a été légèrement observé sur la conductivité thermique. Cependant, une forte dépendance de ces anas de lin est attribuée plutôt à leur disposition et leur arrangement dans le matériau qu'à leurs tailles. Les propriétés du béton de lin ont été ensuite comparées à celles du béton de chanvre dans l'optique de montrer les performances hydriques et thermiques de ce nouveau matériau.

Par ailleurs, une autre campagne expérimentale dédiée au vieillissement du béton de chanvre a été réalisée. Le but étant de mettre en évidence l'impact de ce phénomène sur l'évolution de sa microstructure et de ses propriétés fonctionnelles. La comparaison entre le béton de chanvre vieilli et celui de référence a montré que ses propriétés dépendent principalement de sa microstructure, notamment de la cohésion de l'interface liant/chènevotte. Plusieurs fissures ont été observées sur cette interface. Cela a provoqué l'augmentation de la porosité totale du matériau. Ainsi, ces modifications de la microstructure ont causé non seulement une diminution du facteur de résistance à la diffusion d'humidité, de la valeur du tampon hydrique (MBV) et de la résistance à la compression, mais aussi une augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau et de la profondeur de pénétration. En outre, l'analyse chimique réalisée sur la solution d'immersion après vieillissement a mis en évidence la présence du Calcium, du Potassium et du Magnésium. Ces derniers proviennent de la dissolution et de la lixiviation de certains hydrates initialement présents dans la matrice solide, ce qui peut également avoir un impact sur les modifications de la microstructure après vieillissement. L'analyse thermogravimétrique (ATG) a permis d'illustrer que les deux composants du béton de chanvre (chènevotte et liant), qu'ils soient vieillis ou non, ont pratiquement le même comportement à haute température. Quant au pH du béton de chanvre, les protocoles de vieillissement appliqués n'ont pas eu un impact significatif sur cet indicateur. Tous les

matériaux (vieilli et de référence) ont présenté un pH supérieur à 10, ce qui écarte le risque de développement des moisissures.

Les propriétés hydriques et thermiques mesurées sur le béton de chanvre vieilli et de référence ont été ensuite utilisées comme paramètres d'entrée permettant d'alimenter le modèle numérique développé et validé. Cela a été effectué dans l'optique de prendre en compte numériquement l'effet du vieillissement sur comportement hygrothermique du béton de chanvre. Les résultats ont montré des écarts sensibles et significatifs d'environ 18 % sur les profils d'humidité relative, tandis que les écarts de température étaient quasiment négligeables avec un maximum de 1°C. Pour des conditions aux limites isothermes, l'écart maximal entre les profils d'humidité relative des deux cas du béton de chanvre était de 12 %. Ce dernier a augmenté de 6 % dans le cas non isotherme, ce qui met en exergue l'importance des phénomènes couplés entre les transferts de chaleur et de masse. En outre, la cinétique de transfert de masse du béton de chanvre a été amplifiée après vieillissement. La réponse du matériau aux sollicitations climatiques extérieures est devenue donc plus rapide, ce qui a engendré, par conséquent, un déphasage d'environ 40 minutes entre les deux cas étudiés.

Par ailleurs, un modèle de prédiction thermo-hygro-morphique a été développé et validé à l'échelle microscopique moyennant l'exploitation des images 2D issus de micro-tomographie aux rayons X. Ce modèle permet non seulement de prédire le comportement hygrothermique du matériau, mais aussi les déformations engendrées par les variations de température et d'humidité relative dans le temps.

Enfin, nous avons examiné l'effet du phénomène d'hystérésis sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre en s'affranchissant de l'hypothèse fixée initialement sur les isothermes de sorption. Deux validations ont été entreprises : l'une à l'échelle du matériau et l'autre à l'échelle de la paroi de 1x1 m² en utilisant une enceinte bi climatique. La prise en compte du phénomène d'hystérésis a montré une bonne concordance entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux. Après la validation du modèle, l'effet de ce phénomène sur la conductivité thermique a été analysé. Les résultats ont montré que l'hystérésis impacte la conductivité thermique du béton de chanvre, qui à son tour, se répercute sur le comportement hygrothermique du matériau. Par ailleurs, plusieurs simulations ont été réalisées (sans et avec hystérésis) sur une paroi en béton de chanvre soumises à des conditions climatiques réelles des villes de Montréal au Canada, de La

Rochelle en France et de Chihuahua au Mexique. Les résultats ont montré des écarts sensibles en humidité relative entre les deux cas de simulation et que l'omission de l'hystérésis dans la modélisation conduit à la sous-estimation des profils d'humidité relative. Cela conduit par conséquent à une mauvaise prédiction des risques de condensation et de développement des moisissures dans le matériau. L'effet de ce phénomène a été ensuite analysé sur une échelle plus grande. Pour cela, la contribution des flux hydriques (sans et avec hystérésis) provenant des parois extérieures d'une maison occupée a été pris en compte dans le bilan global de l'ambiance habitable, et ce, grâce à une co-simulation « Heat, Air and Moisture » et « Building Energy Simulation », HAM-BES, basée sur l'utilisation d'un solveur éléments finis à l'échelle de la paroi, Comsol Multiphysics, et un environnement de simulation thermique dynamique à l'échelle du bâtiment, TRNSYS. L'incidence de ce phénomène sur l'évolution des températures est quasiment négligeable. Cependant, des écarts notables ont été enregistrés sur les valeurs des humidités relatives de l'ambiance habitable pour les deux cas de simulation. Par conséquent, des écarts significatifs entre les flux de chaleur latents ont été constatés. Cela a eu donc un effet direct sur les flux de chaleur totale où des écarts de gain et de perte maximaux, respectivement de 1121 kJ/h et 1086 kJ/h ont été enregistrés durant la première semaine du mois de février. La prise en compte du phénomène d'hystérésis permet donc non seulement d'améliorer la prédiction du comportement hygrothermique des matériaux à différentes échelles, mais aussi l'amélioration de la prédiction de la consommation énergétique au sein des bâtiments et des ambiances habitables.

Perspectives

Les travaux présentés permettent d'ouvrir de multiples perspectives et pistes de réflexion que ce soit au niveau de la formulation des matériaux durables et à propriétés adaptés, de la caractérisation des matériaux, la modélisation numérique et expérimentale du comportement thermo-hydro-morphique à double échelle (microscopique-macroscopique) ou aussi quant à la réponse des biomatériaux aux sollicitations dynamiques sévères (vieillessement).

Concernant l'évolution des propriétés des matériaux en fonction de l'âge et des sollicitations sévères (vieillessement), d'autres matériaux biosourcés à l'instar du béton de lin, qui présente de bonnes propriétés hygrothermiques. Il serait judicieux d'examiner son vieillissement afin de montrer son comportement vis-à-vis des conditions climatiques sévères et surtout de mieux appréhender l'évolution de ses propriétés et de sa microstructure dans les cas extrêmes. De plus, des simulations numériques doivent être réalisées sur ce matériau afin de pouvoir étudier

ses performances en tant que matériau de construction soumis à des conditions climatiques réelles.

Dans nos travaux de thèse, nous avons tenu compte numériquement du phénomène du vieillissement à travers les propriétés intrinsèques vieilles mesurées expérimentalement. Cependant, le modèle numérique n'intègre pas la dégradation de la cohésion, l'évolution des propriétés en fonction du temps ou l'effet du gonflement/rétrécissement sur les transferts hygrothermiques. Il serait utile de mener une investigation expérimentale et numérique dans ce sens afin de mieux appréhender le vieillissement des matériaux biosourcés et de pouvoir proposer un modèle numérique pertinent dont les propriétés qui constituent les paramètres d'entrées du modèle seront exprimées en fonction du temps et de l'évolution de la microstructure. Par ailleurs, les protocoles de vieillissements accélérés appliqués dans nos travaux permettent d'accélérer le processus de vieillissement et d'avoir des matériaux avec des propriétés vieilles. Cependant, nous n'avons pas une idée de la correspondance du nombre d'années simulés par ces protocoles par rapport à la réalité. Il serait donc également intéressant de s'investir dans ce sens en exploitant les lois de similitudes afin de définir le modèle réduit et de réduire la durée de l'investigation.

Proposer d'autres protocoles de vieillissement permettant d'accélérer et de favoriser davantage le processus de développement fongiques est également nécessaire. Cela permettra, d'une part, de mieux appréhender le comportement des matériaux biosourcés dans ce sens, et d'autre part, de quantifier les différents types de moisissures et d'analyser leur impact sur la dégradation du matériau et sur la santé des occupants.

La validation du modèle thermo-hygro-morphique développé a été établie en 2D. Une validation en 3D sera possible en ayant recours à la même démarche développée dans ce rapport mais avec une investigation plus fine. Les déformations volumiques peuvent être obtenues grâce à une corrélation volumique des scans tomographiques en utilisant le logiciel Corelli ou Amira-Avizo. Aussi, la reconstruction de la microstructure réelle en 3D du matériau pourrait être entreprise en exploitant les scans tomographiques et des outils de traitement d'images 3D. Ceci permet de générer des maillages volumiques facilitant la prédiction du comportement des matériaux de construction soumis à des sollicitations climatiques réelles (en régime transitoire).

Le modèle d'hystérésis utilisé dans nos travaux a été pris dans littérature. Certes, ces modèles présentent des imperfections puisqu'ils se basent sur certaines hypothèses. L'objectif des futures études sera donc d'améliorer et/ou de proposer un nouveau modèle d'hystérésis en s'affranchissant des défauts de ceux existants dans la littérature.

Références bibliographiques

- [1] J.-F. Daïan, Equilibre et transferts en milieux poreux I- Etats d'équilibre, (2010) 183 p.
- [2] K.S.W. Sing, D.H. Everett, R.A.W. Haul, L. Moscou, R.A. Pierotti, J. Rouquerol, T. Siemieniewska, Reporting physisorption data for gas / solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity, Pure and Applied Chemistry. (1985). <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
- [3] P. Safinowski, B. Piwakowski, M. Kaczmarek, A. Kosecki, caractérisation du béton à l'aide de la réflectométrie ultrasonore, journées cofrend toulouse, (2008) 1–9.
- [4] F. Dullien, fluid transport and pore structure, Porous media, Academic press, (1991) 574. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-26184-8>
- [5] F. Bennai, Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé, Thèse en cotutelle : La Rochelle Université en France et Université de Bejaia en Algérie, (2017) 186 p.
- [6] R. Peuhkuri, Moisture Dynamics in Building Envelopes, Thesis: Technical University of Denmark, (2003) 239 p.
- [7] Construction & Bioressources, Document Technique: Etat des lieux des connaissances actuelles sur le Fonctionnement Hygrothermique des matériaux biosourcés, Première Edition, (2012).
- [8] S. Gobain, Introduction à la thermique du bâtiment, introduction à la thermique du bâtiment, (2012).
- [9] Y. Tamene, S. Abboudi, C. Bougriou, Etude numérique des transferts de chaleur et d'humidité en régime transitoire dans une paroi bicouche, 20^{ème} Congrès Français de Mécanique, Besançon, France (28 Août/2 Sept. 2011) 1–6.
- [10] E. Gourlay, L. Arnaud, Comportement hygrothermique des murs de béton de chanvre, Proceedings of the Actes Du Congrès SFT , Le Touquet France (2010).
- [11] Y. Jannot, Transfert thermique, Ecole des mines, Nancy, (2012).
- [12] C. Abelé, B. Abraham, J.-L. Salagnac, J. Fontan, D. Quenard, S. Gilliot, C. Pompéo, Guide technique : Transfert d'humidité à travers les parois (2009).
- [13] S. Driss, Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (2008).
- [14] J.R. Philip, D.A. De Vries, Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Eos, Transactions American Geophysical Union. 38 (1957) 222–232. <https://doi.org/10.1029/TR038i002p00222>

- [15] A. Trabelsi, Études numérique et expérimentale des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France (2010).
- [16] B. Delmon, Introduction à la cinétique hétérogène. Edition Technip (1969) 695 p.
- [17] D. Duong, Adsorption analysis : Equilibria and kinetics. Chemical engineering (1998) 916 p. <https://doi.org/10.1142/p111>
- [18] M.Y. Ferroukhi, Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l'humidité, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France (2015).
- [19] K. Abahri, Modélisation des transferts couplés de chaleur , d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de construction, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France (2012).
- [20] F. Collet, Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux. Thèse de doctorat, Rennes : INSA de Rennes, (2004) 252 p.
- [21] Y. Jannot, Isothermes de Sorption : Modeles et détermination (2008) 1–16.
- [22] V. Baroghel-Bouny, Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials: part I: essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure, Cem. Concr. Res. 37 (3) 414–437 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.019>
- [23] M. Wu, B. Johannesson, M. Geiker, A study of the water vapor sorption isotherms of hardened cement pastes: Possible pore structure changes at low relative humidity and the impact of temperature on isotherms, Cement and Concrete Research. 56 (2014) 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.008>
- [24] F. Radjy, E. Sellevold, K. Hansen, Isoteric vapor pressure–temperature data for water sorption in hardened cement paste: enthalpy, entropy and sorption isotherms at different temperatures, Technical Report BYG-DTU R057, Technical University of Denmark (DTU), Lyngby, Denmark (2003).
- [25] Y. Aït Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, C. Lanos, Influence of temperature on sorption process in hemp concrete, Construction and Building Materials. 106 (2016) 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.117>
- [26] M.Y. Ferroukhi, R. Belarbi, K. Limam, A. Si Larbi, A. Nouviaire, Assessment of the effects of temperature and moisture content on the hygrothermal transport and storage properties of porous building materials, Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung. 55 (2019) 1607–1617. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-02550-5>
- [27] L. A D Tran, D. Samri, M. Rahim, O. Douzane, G. Promis, T. Langlet, Effect of Temperature-dependent Sorption Characteristics on the Hygrothermal Behavior of a Hemp Concrete Building. Energy Procedia 78 (2015) 1449-1454. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.169>
- [28] T. Colinart, P. Glouannec, P. Chauvelon, Influence of the setting process and the formulation on the drying of hemp concrete, Construction and Building Materials. 30 (2011) 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.030>
- [29] P. Schiller, M. Wahab, T. Bier, H.J. Mögel, A model for sorption hysteresis in hardened cement paste, Cement and Concrete Research. 123 (2019) 105760.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.005>

- [30] D. Bellini, Transport d'humidité en matériau poreux en présence d'un gradient de température. Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire, Thèse de doctorat, Université de Grenoble (1992).
- [31] G. Costantine, C. Maalouf, T. Moussa, G. Polidori, E. Kinab, Numerical modelling of a hemp concrete wall, E3S Web of Conferences. 85 (2019) 1–7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198508003>
- [32] J. Carette, F. Soleilhet, F. Benboudjema, X. Ma, G. Nahas, K. Abahri, A. Darquennes, R. Bennacer, Identifying the mechanisms of concrete drying: An experimental-numerical approach, Construction and Building Materials. 230 (2020) 117001. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117001>
- [33] R. Belarbi, F. Bennai, M. Ferroukhi, C. Hachem, K. Abahri, Multiscale modelling for better hygrothermal prediction of porous building materials, 02005 (2018) 1–6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902005>
- [34] T. Alioua, B. Agoudjil, A. Boudenne, Numerical modelling and experimental study of heat and moisture properties of a wall based on date palm fibers concrete, E3S Web of Conferences. 85 (2019) 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198502009>
- [35] H. Hens, Heat, Air and Moisture Transfer in Highly Insulated Building Envelopes (Hamtie) Final report, vol. 1, Annex 24 (1996).
- [36] H.C. Huang, Y.C. Tan, C.W. Liu, C.H. Chen, A novel hysteresis model in unsaturated soil, Hydrological Processes. 19 (2005) 1653–1665. <https://doi.org/10.1002/hyp.5594>
- [37] B. Johannesson, M. Janz, A two-phase moisture transport model accounting for sorption hysteresis in layered porous building constructions, Building and Environment. 44 (2009) 1285–1294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.018>
- [38] J. Kwiatkowski, M. Woloszyn, J.J. Roux, Influence of sorption isotherm hysteresis effect on indoor climate and energy demand for heating, Applied Thermal Engineering. 31 (2011) 1050–1057. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.11.030>
- [39] H.L. Frandsen, S. Svensson, L. Damkilde, A hysteresis model suitable for numerical simulation of moisture content in wood, Holzforschung. 61 (2007) 175–181. <https://doi.org/10.1515/HF.2007.031>
- [40] A. Patera, H. Derluyn, D. Derome, J. Carmeliet, Influence of sorption hysteresis on moisture transport in wood, Wood Science and Technology. 50 (2016) 259–283. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0786-9>
- [41] J. Shi, S. Avramidis, Water sorption hysteresis in wood: I review and experimental patterns - Geometric characteristics of scanning curves, Holzforschung. 71 (2017) 307–316. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0120>
- [42] A.D. Werner, D.A. Lockington, Artificial pumping errors in the Kool-Parker scaling model of soil moisture hysteresis, Journal of Hydrology. 325 (2006) 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.012>
- [43] Y. Ait Oumeziane, Y.M.S. Bart, C. Lanos, Modélisation du transfert de chaleur et de Masse : Impact De La Perméabilité À L'Air Et De L'Hystérésis Pour Le Béton De Chanvre, in: XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen (29 au 31 Mai, 2011)

- [44] J. Kwiatkowski, M. Woloszyn, J.J. Roux, Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials, *Building and Environment*. 44 (2009) 633–642. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.006>
- [45] H. Derluyn, D. Derome, J. Carmeliet, E. Stora, R. Barbarulo, Hysteretic moisture behavior of concrete: Modeling and analysis, *Cement and Concrete Research*. 42 (2012) 1379–1388. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.06.010>
- [46] J. Arfvidsson, Moisture penetration depth for periodically varying relative humidity at the boundary, *Nordic Journal of Building Physics* 2 (1999) 75–80.
- [47] Y. Ait Oumeziane, Evaluation des performances hygrothermiques d’une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre, Thèse de doctorat, INSA Rennes (2013).
- [48] P. Lehmann, F. Stauffer, C. Hinz, O. Dury, H. Flühler, Effect of hysteresis on water flow in sand column with a fluctuating capillary fringe, *Journal of Contaminant Hydrology*, 33 (1998) 81–100. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(98\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(98)00066-7)
- [49] J. Carmeliet, M.H.D. De Wit, Hysteresis and moisture buffering of wood (2005).
- [50] Y. Mualem, A Conceptual Model of Hysteresis, *Water Resources Research* (1974). <https://doi.org/10.1029/WR010i003p00514>
- [51] Kool J.B., Parker J.C., 1987, Development and evaluation of closed form expressions for hysteretic soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, 23 (1987) 105–114 <https://doi.org/10.1029/WR023i001p00105>
- [52] P.S. Scott, G.J. Farquhar, et N. Kouwen, Hysteretic effects on net infiltration., *Advances in Infiltration*, (1983) 163–170
- [53] C. R. Pedersen, Transient calculation on moisture migration using a simplified description of hysteresis in sorption isotherms, 2nd Nordic Symposium on Building Physics, Trondheim, Norvège (1990).
- [54] D. Lelièvre, Simulation numérique des transferts de chaleur et d’humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés. Thèse de doctorat, Université de Bretagne-Sud (2015).
- [55] A. Pouloussis, Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domains. *Soil Science*, 93 (1962) 405–412.
- [56] D. Derome, H. Derluyn, W. Zillig, J. Carmeliet, Model for hysteretic moisture behaviour of wood, *Proceedings of the Nordic Symposium on Building Physics* (2008) 959–966.
- [57] Z. Zhang, M. Thiéry, V. Baroghel-Bouny, A review and statistical study of existing hysteresis models for cementitious materials, *Cement and Concrete Research*. 57 (2014) 44–60. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.008>
- [58] Z. Zhang, M. Thiéry, V. Baroghel-Bouny, Numerical modelling of moisture transfers with hysteresis within cementitious materials: Verification and investigation of the effects of repeated wetting-drying boundary conditions, *Cement and Concrete Research*. 68 (2015) 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.012>
- [59] R. Rémond, G. Almeida, P. Perré, The gripped-box model: A simple and robust formulation of sorption hysteresis for lignocellulosic materials, *Construction and Building Materials*. 170 (2018) 716–724.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.116>

- [60] K. Abahri, R. Belarbi, C. El Hachem, Caractérisation macro-hydrigue des matériaux biosourcés, 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet (27 Au 29 Mai 2015).
- [61] N. Issaadi, Effets de la variabilité des propriétés de matériaux cimentaires sur les transferts hygrothermiques : développement d'une approche probabiliste. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France (2015).
- [62] S.Q. Tian, K. Wang, L.W. Fan, Z.T. Yu, J. Ge, Effects of sample length on the transient measurement results of water vapor diffusion coefficient of porous building materials: A case study of autoclave aerated concrete (AAC) with various porosities, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 135 (2019) 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.124>
- [63] F. Bennai, N. Issaadi, K. Abahri, R. Belarbi, A. Tahakourt, Experimental characterization of thermal and hygric properties of hemp concrete with consideration of the material age evolution, *Heat Mass Transfer*. 54 (2017) 1189–1197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00231-017-2221-2>
- [64] N. Issaadi, A. Nouviaire, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, Moisture characterization of cementitious material properties: Assessment of water vapor sorption isotherm and permeability variation with ages, *Construction and Building Materials*. 83 (2015) 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.030>
- [65] European Standard ISO 12572 Building materials – determination of water vapor transmission properties (ISO/DIS 12572:1997) PrEN ISO 12572 (1997).
- [66] P. Mukhopadhyaya, P. Goudreau, M. Kumaran, D. van Reenen, Influence of material properties on the moisture response of an ideal stucco wall: results from hygrothermal simulation, in: *Sixth Nordic Building Physics Symposium*, Trondheim, Norway (2002).
- [67] M. Salonvaara, A. Karagiozis, A. Holm, Stochastic building envelope modeling-The influence of material properties. Performance of exterior envelopes of whole buildings VIII: integration of building envelopes (2001) 8 p.
- [68] J. Kwiatkowski, M. Woloszyn, J.-J. Roux, The influence of material moisture buffering on moulds growth risk on the internal wall surfaces, IX Polish Conference “The problems of indoor air” (2007).
- [69] T. Padfield, Humidity buffering of the indoor climate by absorbent walls [on line]. In: *Proceedings of the fifth symposium on building physics in Nordic countries*, Goteborg: Chalmers, University of Technology, 2 (1999) 637–44
- [70] O. Osanyintola, C. Simonson, Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: experimental facilities and energy impact., *Energy and Buildings*. 38 (2006) 1270–82.
- [71] A. Tran Le, Etude des transferts hygrothermique dans le beton de chanvre et leur application au batiments. Thesis de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France (2011).
- [72] A. Grelat, Utilisation des matériaux renouvelables en parois de maisons individuelles à ossature bois. Rapport final de l'Annexe 3 – Expérimentations en laboratoire, Instrumentation in situ. Fédération Française Du Bâtiment, France (2005).
- [73] R. Walker, S. Pavía, Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes,

- Construction and Building Materials. 64 (2014) 270–276.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081>
- [74] C. Rode, R. Peuhkuri, B. Time, K. Svennberg, T. Ojanen, Moisture Buffer Value of Building Materials, Journal of ASTM International. 4 (2006) 100369.
<https://doi.org/10.1520/JAI100369>
- [75] T. Colinart, D. Lelievre, P. Glouannec, Experimental and numerical analysis of the transient hygrothermal behavior of multilayered hemp concrete wall, Energy and Buildings. 112 (2015) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.027>
- [76] N.M.. Ramos, J.M.P.. Delgado, V. de Freitas, Influence of finishing coatings on hygroscopic moisture buffering in building elements, Constr. Build. Mater. 24 (2010) 2590–2597, (2010).
- [77] F. Collet, S. Pretot, Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete, Construction and Building Materials. 36 (2012) 58–65.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.139>
- [78] B. Mazhoud, F. Collet, S. Pretot, J. Chamoin, Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters, Building and Environment. 96 (2016) 206–216.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.013>
- [79] LCPC, Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons: Méthodes de mesure et d'essai de laboratoire (2002).
- [80] I. Othmen, Étude des matériaux d'isolation compatibles avec la pierre de tuffeau : application à la réhabilitation du bâti ancien et/ ou historique. Thèse de doctorat, Université de Nante (2015).
- [81] A. Kaermmmerlen, Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment. Thèse de doctorat, Université de Nancy 1 (2009).
- [82] P. Tronet, V. Picandet, T. Lecompte, C. Baley, Béton de chanvre: Effet du dosage en granulats sur les propriétés thermique et mécanique. Comptes Rendus des JNC 17, Poitiers, France (2011).
- [83] Č. Robert, P. Rovnanikova, P. Rovnaní, Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters, Construction and Building Materials 20 (2006) 849-857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.002>
- [84] A. Evrard, A. de Herde, J. Minet, Dynamical interactions between heat and mass flows in lime–hemp concrete., Research in building physics and building engineering, third international building physics conference, Concordia University, Montreal, Canada (2006).
- [85] A.V. Luikov, Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, 1st edition, Oxford, Pergamon press (1966).
- [86] A. Evrard, Transient hygrothermal behavior of Lime- Hemp Materials, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Louvain, Unité d'Architecture (2008).
- [87] R. Belarbi, M. Qin, A. Aït-Mokhtar, L.O. Nilsson, Experimental and theoretical investigation of non-isothermal transfer in hygroscopic building materials, Building and Environment. 43 (2008) 2154–2162.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.12.014>
- [88] M. Qin, R. Belarbi, A. Ait-Mokhtar, L.-O. Nilsson, Nonisothermal moisture transport

- in hygroscopic building materials: modeling for the determination of moisture transport coefficients, *Transport in Porous Media*. 72 (2008) 255–271. <https://doi.org/10.1007/s11242-007-9148-x>
- [89] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, A. Seigneurin, An analytical method to calculate the coupled heat and moisture transfer in building materials, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 33 (2006) 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.08.001>
- [90] M. Qin, Etude des phénomènes de transfert hygrothermiques dans les parois des bâtiments. Thèse de doctorat, La Rochelle Université (2007).
- [91] A. Trabelsi, R. Belarbi, K. Abahri, M. Qin, Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient, *Building Simulation*. 5 (2012) 107–115. <https://doi.org/10.1007/s12273-012-0063-x>
- [92] A. Trabelsi, R. Belarbi, K. Abahri, M. Qin, Reply on the comments regarding the paper “Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient,” *Building Simulation*. 6 (2013) 109–110. <https://doi.org/10.1007/s12273-013-0100-4>
- [93] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, L.-O. Nilsson, Simultaneous heat and moisture transport in porous building materials: evaluation of nonisothermal moisture transport properties, *Journal of Materials Science*. 43 (2008) 3655–3663. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2584-3>
- [94] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, F. Allard, Simulation of coupled heat and moisture transfer in air-conditioned buildings, *Automation in Construction*. 18 (2009) 624–631. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.12.006>
- [95] K. Abahri, R. Belarbi, A. Trabelsi, Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials, *Building and Environment*. 46 (2011) 1354–1360. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.020>
- [96] B. Remki, K. Abahri, M. Tahlaiti, R. Belarbi, Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient, *International Journal of Thermal Sciences*. 57 (2012) 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.005>
- [97] K. Abahri, R. Belarbi, K. Aït-Mokhtar, N. Oudjehani, Investigation expérimentale sur la réalité de l’effet de la pression totale sur le comportement hydrique des parois du bâtiment, *Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie* (6 au 8 juin 2012).
- [98] M.Y. Ferroukhi, K. Abahri, R. Belarbi, K. Limam, A. Nouviaire, Experimental validation of coupled heat, air and moisture transfer modeling in multilayer building components, *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*. 52 (2016) 2257–2269. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1740-y>
- [99] M.Y. Ferroukhi, R. Djedjig, R. Belarbi, K. Limam, K. Abahri, Effect of coupled heat, air and moisture transfers modeling in the wall on the hygrothermal behavior of buildings, *Energy Procedia*. 78 (2015) 2584–2589. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.293>
- [100] M.Y. Ferroukhi, K. Abahri, R. Belarbi, K. Limam, Integration of a hygrothermal transfer model for envelope in a building energy simulation model: experimental validation of a HAM–BES co-simulation approach, *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*. 53 (2017) 1851–1861. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1944-9>

- [101] M.Y. Ferroukhi, R. Djedjig, K. Limam, R. Belarbi, Hygrothermal behavior modeling of the hygroscopic envelopes of buildings: A dynamic co-simulation approach, *Building Simulation*. 9 (2016) 501–512. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0292-5>
- [102] F. Bennai, K. Abahri, R. Belarbi, A. Tahakourt, Periodic homogenization for heat, air, and moisture transfer of porous building materials, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*. 70 (2016) 420–440. <https://doi.org/10.1080/10407790.2016.1230393>
- [103] F. Bennai, K. Abahri, R. Belarbi, A. Tahakourt, Convective and conductive thermal homogenization for nonstaturated porous building materials : Application on the thermal conductivity tensor (2016) 1–13.
- [104] Introduction à la technologie du bâtiment, Révision 2 : Reglementation Handicapes (2011).
- [105] L. Melchert, The Dutch sustainable building policy: A model for developing countries, *Building and Environment*. 42 (2005) 893–901. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.007>
- [106] M.-P. Boutin, C. Flamin, S. Quinton, G. Gosse, Etude des caractéristiques environnementales du chanvre par l’analyse de son cycle de vie, *Ministere De L’agriculture Et De La Peche Etude* (2006).
- [107] S. Glass, M. Sonebi, Investigation of mix composition hemp concrete on transport properties, mechanical properties and durability, 2nd International Conference on Bio-Based Building Materials & 1st Conference on ECOlogicalvalorisation of GRAnular and FIbrous Materials, Clermont-Ferrand, France (2017).
- [108] L. Arnaud, E. Gourlay, Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Construction and Building Materials*. 28 (2011) 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
- [109] J. Page, M. Sonebi, S. Amziane, Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material, *Construction and Building Materials*. 139 (2016) 502–512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.037>
- [110] R. Haik, G. Bar-Nes, A. Peled, I.A. Meir, Alternative unfired binders as lime replacement in hemp concrete, *Construction and Building Materials*. 241 (2020) 117981. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117981>
- [111] M. Rahim, Analyse et caractérisation du comportement hygrothermique de parois agro-sourcées à l’échelle 1 : expérimentation et modélisation, *Université de Picardie Jules Verne*, (2015).
- [112] Tradical PF 70, Chaux formulée pour Maçonner et Dégrossir Bétons de Chanvre Tradical®, Fiche technique (2016).
- [113] C. Chabaud, Les filières lin et chanvre au cœur des enjeux des matériaux biosourcés émergents, *Journal Officiel de La République Française* (2015).
- [114] S. Amziane, L. Arnaud, Les bétons de granulats d’origine végétale. Application au béton de chanvre, *Lavoisier* (2013).
- [115] S. Kizil, Approches expérimentale et numérique pour la valorisation et l’évaluation de la durabilité des éco-matériaux. Rapport : bétons fibrés biosourcés (2017).
- [116] Fibre de lin, isolation thermique (2018). <https://blog.exacompare.fr/solution-energetique/fibre-lin/>

- [117] M. Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre, T. Langlet, Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity, *Energy Build.* 88 (2014) 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.043>
- [118] M. Khazma, A. Goullieux, R. Dheilly, M. Quéneudec, Coating of a lignocellulosic aggregate with pectin / polyethylenimin mixtures : Effects on flax shive and cement-shive composite properties, *Cement and Concrete Composites.* 34 (2012) 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.008>
- [119] C. Magniont, Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier (2010).
- [120] F. Collet, V. Picandet, C. Lubert, Béton de chanvre : Formulation, caractéristiques mécaniques et hygrométriques (2018).
- [121] D. Sedan, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Groupe d'étude des Matériaux Hétérogènes - Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France (2007).
- [122] M. Chabannes, Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction, Thèse de doctorat, Université de Montpellier, France (2016).
- [123] Z. Zhang, Modelling of sorption hysteresis and its effect on moisture transport within cementitious materials, IFSTTAR Université Paris-Est, France (2014).
- [124] V. Cerezo, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse de doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon (2005) 247 p.
- [125] A. Bourdot, T. Moussa, A. Gacoin, C. Maalouf, P. Vazquez, C. Thomachot-Schneider, C. Bliard, A. Merabtine, M. Lachi, O. Douzane, H. Karky, G. Polidori, Characterization of a hemp-based agro-material: Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties, *Energy Build.* 153 (2017) 501–512. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.022>.
- [126] E. Latif, S. Tucker, D.C.W. Mihaela Anca Ciupala, D. Newport, Hygric properties of hemp bio-insulations with differing compositions, *Construction and Building Materials* 66 (2014) 702–711.
- [127] C. Garcia-Jaldon, Caractérisation morphologie et chimique du chanvre (*cannabis sativa*), prétraitement à la vapeur et valorisation, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier (1995).
- [128] S. Marceau, P. Glé, M. Guéguen-Minerbe, E. Gourlay, S. Moscardelli, I. Nour, S. Amziane, Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes, *Constr. Build. Mater.* 139 (2017) 524–530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.129>.
- [129] A. Arizzi, H. Viles, I. Martín-Sanchez, G. Cultrone, Predicting the long-term durability of hemp–lime renders in inland and coastal areas using Mediterranean, Tropical and Semi-arid climatic simulations, *Science of the Total Environment.* 542 (2016) 757–770. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.141>
- [130] R. Walker, S. Pavia, R. Mitchell, Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes, *Constr. Build. Mater.* 61 (2014) 340–348.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>.
- [131] M. Viel, F. Collet, Y. Lecieux, M.L.M. François, V. Colson, C. Lanos, A. Hussain, M. Lawrence, Resistance to mold development assessment of bio-based building materials, *Composites Part B: Engineering*. 158 (2018) 406–418.
 - [132] G. Delannoy, S. Marceau, P. Glé, M. Gueguen-minerbe, D. Diafi, I. Nour, Aging of hemp shiv used for concrete, *Jmade*. 160 (2018) 752–762. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.016>
 - [133] AFPC-AFREM, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Toulouse (11-12 décembre 1997)
 - [134] A. Hamami, Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle; France (2009).
 - [135] E. Conforto, N. Joguet, P. Buisson, J.E. Vendeville, C. Chaigneau, T. Maugard, An optimized methodology to analyze biopolymer capsules by environmental scanning electron microscopy, *Materials Science and Engineering C*. 47 (2015) 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.11.054>
 - [136] E. Sassoni, S. Manzi, A. Motori, M. Montecchi, M. Canti, Experimental study on the physical-mechanical durability of innovative hemp-based composites for the building industry, *Energy and Buildings*., 104 (2015) 316–322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.022>
 - [137] NFEN12667, Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits de haute et moyenne résistance thermique (2001).
 - [138] NFEN12664, Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique (2001).
 - [139] C.A. Balaras, A.G. Gaglia, E. Georgopoulou, S. Mirasgedis, Y. Sarafidis, D.P. Lalas, European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings, *Building and Environment*. 42 (2007) 1298–1314. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.001>
 - [140] K.P. Garikapati, P. Sadeghian, Mechanical behavior of flax-lime concrete blocks made of waste flax shives and lime binder reinforced with jute fabric, *Journal of Building Engineering*. 29 (2020) 101187. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101187>
 - [141] X. Li, L.G. Tabil, I.N. Oguocha, S. Panigrahi, Thermal diffusivity, thermal conductivity, and specific heat of flax fiber-HDPE biocomposites at processing temperatures, *Composites Science and Technology*. 68 (2008) 1753–1758. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.02.016>
 - [142] .Dubois, A. Leblanc, O. Carpentier, G. Alhaik, E. Wirquin, Performances of flax shive-based lightweight composites with rapid hardening, *Construction and Building Materials*. 165 (2018) 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.239>
 - [143] M. Khazma, A. Goullieux, R.M. Dheilly, A. Rougier, M. Quéneudec, Optimization of flax shive-cementitious composites: Impact of different aggregate treatments using

- linseed oil, *Industrial Crops and Products*. 61 (2014) 442–452. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.07.041>
- [144] C. Baley, M. Gomina, J. Breard, A. Bourmaud, P. Davies, Variability of mechanical properties of flax fibres for composite reinforcement. A review, *Industrial Crops and Products*, 145 (2019) 111984. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111984>
- [145] S. Sathish, K. Kumaresan, L. Prabhu, S. Gokulkumar, N. Karthi, N. Vigneshkumar, Experimental investigation of mechanical and morphological properties of flax fiber reinforced epoxy composites incorporating SiC and Al₂O₃, *Materials Today: Proceedings* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.106>
- [146] D. Sedan, C. Pagnoux, T. Chotard, A. Smith, D. Lejolly, V. Gloaguen, P. Krausz, Effect of calcium rich and alkaline solutions on the chemical behaviour of hemp fibres, *Journal of Materials Science*. 42 (2007) 9336–9342. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1903-4>
- [147] V. Nozahic, S. Amziane, G. Torrent, K. Saïdi, H. De Baynast, Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder, *Cement and Concrete Composites*. 34 (2012) 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>
- [148] M. Khazma, N. El Hajj, A. Goullieux, R.M. Dheilly, M. Queneudec, Influence of sucrose addition on the performance of a lignocellulosic composite with a cementitious matrix, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 39 (2008) 1901–1908. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.09.014>
- [149] A. Hussain, J. Calabria-Holley, D. Schorr, Y. Jiang, M. Lawrence, P. Blanchet, Hydrophobicity of hemp shiv treated with sol-gel coatings, *Applied Surface Science*. 434 (2018) 850–860. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.210>
- [150] A. Hussain, J. Calabria-Holley, M. Lawrence, M.P. Ansell, Y. Jiang, D. Schorr, P. Blanchet, Development of novel building composites based on hemp and multi-functional silica matrix, *Composites Part B: Engineering*. 156 (2019) 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.093>
- [151] S. Brunauer, P. H. Emmett et E. J. Teller, «Adsorption of gases in multimolecular layers,» *Journal of American Chemical society*. 60 (1938) 309-319.
- [152] EN 826, Thermal Insulating Products for Building Applications-Determination of Compression Behavior (1998).
- [153] [39] ASTM Committee, ASTM C109/C109M-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, Annu. B. ASTM Stand. 04 (2002) 1–6. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-20A
- [154] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateaneuf, Multicriteria analysis demonstrating the impact of shiv on the properties of hemp concrete, *Construction and Building Materials*. 160 (2018) 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.026>
- [155] B. Seng, C. Magniont, S. Lorente, Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties, *Journal of Building Engineering*. 24 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.016>
- [156] F. Bennai, C. El Hachem, K. Abahri, R. Belarbi, Influence of hydric solicitations on the morphological behavior of hemp concrete, *RILEM Tech. Lett.* 4 (2019) 16–21. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.80>.
- [157] T. Alioua, B. Agoudjil, N. Chennouf, A. Boudenne, K. Benzarti, Investigation on heat

- and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect, *Build. Environ.* (2019) 106333. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106333>
- [158] B. Seng, C. Magniont, S. Lorente, Characterization of a precast hemp concrete block. Part II: Hygric properties, *Journal of Building Engineering*. 24 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.09.007>
- [159] E. Troppová, M. Švehlík, J. Tippner, R. Wimmer, Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards, *Materials and Structures*. 48 (2015) 4077–4083. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0467-4>
- [160] T. Jami, S.R. Karade, L.P. Singh, A review of the properties of hemp concrete for green building applications, *Journal of Cleaner Production*. 239 (2019) 117852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852>.
- [161] F. Benmahiddine, R. Cherif, F. Bennai, R. Belarbi, A. Tahakourt, K. Abahri, Effect of flax shives content and size on the hygrothermal and mechanical properties of flax concrete, *Construction and Building Materials*. 262 (2020) 120077. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120077>
- [162] F. Bennai, C. El Hachem, K. Abahri, R. Belarbi, Microscopic hygric characterization of hemp concrete by X-ray microtomography and digital volume correlation, *Construction and Building Materials*. 188 (2018) 983–994. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.198>
- [163] C. El Hachem, K. Abahri, R. Bennacer, Original experimental and numerical approach for prediction of the microscopic hygro-mechanical behavior of spruce wood, *Construction and Building Materials*. 203 (2019) 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.107>
- [164] M. Chabannes, F. Becquart, E. Garcia-Diaz, N.E. Abriak, L. Clerc, Experimental investigation of the shear behaviour of hemp and rice husk-based concretes using triaxial compression, *Construction and Building Materials*. 143 (2017) 621–632. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.148>
- [165] D. Damidot, F.P. Glasser, Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O system at 50°C, *Cem. Concr. Res.* 23 (1992) 1195–1204. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(92\)90047-Y](https://doi.org/10.1016/0008-8846(92)90047-Y).
- [166] NF-EN-ISO12570, « Détermination du taux d’humidité par séchage à chaud », (2000).
- [167] U. Benitha Sandrine, V. Isabelle, M. Ton Hoang, C. Maalouf, Influence of chemical modification on hemp-starch concrete, *Construction and Building Materials*. 81 (2015) 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.045>
- [168] H. Fares, S. Remond, A. Noumowé, A. Cousture, Microstructure et propriétés physico-chimiques de bétons autoplacants chauffés de 20 à 600°C, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 15 (2011) 869–888. <https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9695278>
- [169] C. Rode, R. Peuhkuri, B. Time, A. Gustavsen, T. Ojanen, J. Ahonen, K. Svennberg, L.-E. Harderup, J. Arfvidsson, Moisture Buffering of Building Materials, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering (2005).
- [170] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, L.O. Nilsson, Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials, *Construction and Building Materials*. 23 (2009) 967–975. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.015>

- [171] M. Qin, R. Belarbi, Development of an analytical method for simultaneous heat and moisture transfer in building materials utilizing transfer function method, *Journal of Materials in Civil Engineering*. 17 (2005) 492–497. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:5\(492\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:5(492))
- [172] R. Belarbi, M. Qin, A. Aït-Mokhtar, L.O. Nilsson, Experimental and theoretical investigation of non-isothermal transfer in hygroscopic building materials, *Building and Environment*. 43 (2008) 2154–2162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.12.014>
- [173] F. Benmahiddine, F. Bennai, R. Cherif, R. Belarbi, A. Tahakourt, K. Abahri, Experimental investigation on the influence of immersion/drying cycles on the hygrothermal and mechanical properties of hemp concrete, *Journal of Building Engineering*. 101758 (2020) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101758>
- [174] R. Cherif, A.E.A. Hamami, A. Aït-Mokhtar, Global quantitative monitoring of the ion exchange balance in a chloride migration test on cementitious materials with mineral additions, *Cement and Concrete Research*. 138 (2020) 106240. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106240>
- [175] R. Cherif, A.E.A. Hamami, A. Aït-Mokhtar, Effects of leaching and chloride migration on the microstructure and pore solution of blended cement pastes during a migration test, *Construction and Building Materials*. 240 (2020) 117934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117934>
- [176] D. Lelievre, T. Colinart, P. Glouannec, Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses, *Energy and Buildings*. 84 (2014) 617–627. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.013>
- [177] G. Promis, O. Douzane, A.D. Tran Le, T. Langlet, Moisture hysteresis influence on mass transfer through bio-based building materials in dynamic state, *Energy and Buildings*. 166 (2018) 450–459. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.067>
- [178] K. Abahri, C. EL Hachem, F. Bennai, T. Ngoc, R. Belarbi, Prediction of Hemp Concrete Morphological Deformation by X-ray Tomography, *American Concrete Institute, ACI Special Publication*. 320 (2017) 616–625.
- [179] C. El Hachem, Etude expérimentale et modélisation multi-échelles du comportement hygro-mécanique des matériaux poreux de construction, ENS Paris Saclay (2017).
- [180] Y. Mualem, A. Beriozkin, General scaling rules of the hysteretic water retention function based on Mualem's domain theory, *European Journal of Soil Science*. 60 (2009) 652–661. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01130.x>.