



HAL
open science

Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé

Fares Bennai

► **To cite this version:**

Fares Bennai. Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé. Génie civil. Université de La Rochelle; Université Abderahmane Mira - Bejaïa (Bejaïa, Algérie), 2017. Français. NNT : 2017LAROS013 . tel-01865834

HAL Id: tel-01865834

<https://theses.hal.science/tel-01865834>

Submitted on 2 Sep 2018

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.



UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

École Doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux,
Mécanique, Énergétique et Aéronautique (SI-MMEA)

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement « LaSIE » UMR 7356 CNRS



UNIVERSITÉ DE A. MIRA DE BEJAIA

Laboratoire de Génie de Construction et Architectures (LGCA)

THÈSE

Présentée par :

Fares BENNAI

Pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de La Rochelle
et de l'Université A. Mira de Bejaia

Discipline : Génie Civil

Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé

Soutenue le 28/06/2017

JURY :

Abdelhafid KHELIDJ	Professeur, Université de Nantes, Rapporteur
Mohamed BENTCHIKOU	Maître de Conférences HDR, Université de Médéa, Rapporteur
Abdelkarim AÏT-MOKHTAR	Professeur, Université de La Rochelle, Examineur
Nasser CHELOUAH	Professeur, Université A. Mira de Bejaia, Examineur
Kamilia ABAHRI	Maître de Conférences, École Normale Supérieure de Cachan, Examineur
Rafik BELARBI	Professeur, Université de La Rochelle, Directeur de thèse
Abdelkader TAHAKOURT	Professeur, Université A. Mira de Bejaia, Directeur de thèse

Remerciement

Cette thèse a été réalisée en Cotutelle entre l'Université de Bejaia et l'Université de La Rochelle. Je présente mes sincères remerciements à M. A. AIT-MOKHTAR, directeur du LaSIE pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire et pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance.

Je tiens à remercier très vivement M. Abdelkader TAHAKOURT pour m'avoir encadré, orienté et encouragé tout au long de ces années de thèse. Je le remercie également pour ses disponibilités et tout le temps qu'il m'a consacré, ainsi que pour ses conseils qui m'ont été indispensables.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude pour M. Rafik BELARBI pour son encadrement scientifique, sa confiance, ses orientations ainsi que pour tout le temps qu'il m'a consacré. Je tiens à le remercier sincèrement de m'avoir accueilli au LaSIE, d'avoir supporté ce projet de thèse scientifiquement et financièrement, de m'avoir guidé, de m'avoir fait bénéficier de son expertise dans le domaine et des moyens du laboratoire, et pour le caractère amical de nos relations qui a contribué à rendre les années passées à travailler ensemble des plus agréables.

J'exprime toute ma gratitude à Madame Kamilia ABHARI pour l'excellence de son encadrement scientifique, ses conseils, ainsi que pour la confiance qu'elle m'a accordée. Vos réflexions et votre patience ont été les piliers de ce travail. Votre soutien et vos encouragements m'ont été indispensable. Un grand merci pour ça.

Je remercie vivement M. Abdelhafid KHELIDJ, professeur à l'Université de Nantes et M. Mohamed BENTCHIKOU, maître de conférences A à l'université de Médéa pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de rapporter et d'évaluer mon travail. Je remercie M. Nasser CHELLOUAH professeur à l'Université de Bejaia pour m'avoir fait le grand plaisir de présider mon jury de thèse et d'examiner mon travail.

Je souhaite également remercier M. Fabrice GATUINGT, Directeur Adjoint du LMT et responsable du secteur Génie Civil et Environnement d'avoir accepté de m'accueillir au sein du laboratoire LMT-Cachan.

Je remercie chaleureusement Mme Armelle NOUVIAIRE, assistante ingénieur au LaSIE pour sa collaboration et sa disponibilité ainsi que pour ses précieux conseils. C'est grâce à elle que la caractérisation expérimentale des matériaux a pu être réalisés dans d'excellentes conditions. Je tiens également à témoigner ma profonde reconnaissance à Benjamin SMANIOTTO, ingénieur d'étude DGM / LMT-Cachan pour le tout le temps qu'il a consacré à la réussite des essais de tomographie et pour son aide précieuse.

Mes remerciements vont aussi à mon ami et collègue Nabil Issaadi qui m'a été d'une aide précieuse durant mes séjours à La Rochelle, ainsi que pour ses collaborations scientifiques et professionnelles.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu et épaulé durant ces trois dernières années et qui ont contribué à la réalisation de ce travail : mes amis et collègues de l'université de la Rochelle : M.Y. Ferroukhi, R. Cherif, M. Ouleghlou. A. Hemami. Ainsi que : D. Mezhoud, A. Hammoudi, F. Bouchala, F. Benmahiddine, et tous mes collègues doctorants de l'université de Bejaia, et enfin, C. El Hachem de l'ENS-Cachan.

Mes remerciements vont aussi à mes parents qui tout au long de ma courte existence m'ont soutenu et encouragé à donner le meilleur de moi-même, ainsi que ma grand-mère dont les conseils et les encouragements ne m'ont été que bénéfiques. Je tiens aussi à remercier mon frère Madani, mes sœurs Souhila et Sara pour leurs encouragements et pour le soutien qu'ils m'apportent au quotidien. Une pensée particulière pour mon beau-frère Chérif que je ne saurais assez remercier pour sa gentillesse son accueil chaleureux ainsi que ses encouragements. Une petite pensée va également à mes nièces Chanez et Sofia dont l'amour et le sourire me donnent la force d'avancer. Je remercie également mes amis proches, mes cousins et toute ma famille.

Enfin, Je remercie ma femme pour sa patience, son soutien indéfectible et son amour, qui m'ont permis de tenir pendant toute la durée de cette thèse. Merci d'avoir tout partagé avec moi et ce même dans les moments les plus mornes.

Résumé

Le présent travail a pour objectif de comprendre l'influence des paramètres géométriques des éco-matériaux d'enveloppe, tels que le béton de chanvre, sur les mécanismes de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité afin de prédire le comportement du bâtiment dans le but de le piloter et de l'améliorer dans sa durabilité. Pour cela, une approche multi-échelle est mise en place. Elle consiste à maîtriser les phénomènes physiques dominants et leurs interactions à l'échelle microscopique. S'ensuit, une modélisation à double échelle, microscopique – macroscopique, des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité qui prend en compte les propriétés intrinsèques et la topologie microstructurale du matériau moyennant le recours à la tomographie rayon X conjuguée à la corrélation d'images 2D et 3D. Pour cela, une campagne de caractérisation fine des propriétés physiques et hygrothermiques du béton de chanvre confectionné au laboratoire a été réalisée. Elle s'est focalisée sur l'étude de l'impact du vieillissement, l'état thermique et hydrique du matériau sur ses propriétés intrinsèques. Les résultats montrent une excellente capacité d'isolation thermique et de régulation naturelle d'humidité du béton de chanvre. Puis, une caractérisation microscopique par différentes techniques d'imagerie a été effectuée. Les reconstructions 3D du matériau réel obtenues par la tomographie aux rayons X à différentes résolutions montrent que le béton de chanvre possède plusieurs échelles de porosité, allant de la microporosité au sein du liant et des chènevottes à la macroporosité inter-particulaire. Le comportement hygro-morphique sous sollicitations hydriques a été ensuite étudié. Les résultats de la corrélation d'images numériques 2D et de la tomographie aux rayons X couplés à la corrélation d'images volumiques, montrent la nature du comportement du béton de chanvre soumis à des hygrométries différentes. En effet, la chènevotte subit des déformations plus importantes que le liant, causant ainsi des modifications de la microstructure du matériau.

Sur le volet de la modélisation, moyennant la technique d'homogénéisation périodique un modèle des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de construction a été développé. Les tenseurs de diffusion et de conductivité thermique homogénéisés ont été calculés numériquement. Ensuite, une confrontation entre les résultats du calcul des coefficients de diffusion macroscopique et ceux expérimentaux obtenus au LaSIE a été réalisée. Elle met en évidence la qualité de la prédiction. De plus, la conductivité thermique de la phase solide a été ainsi déduite.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de thèse ont mis en exergue l'influence de l'état hydrique et thermique du béton de chanvre sur ses propriétés intrinsèques, et sa microstructure très hétérogène. Ils ont révélé aussi les limites des approches phénoménologiques basées sur l'établissement des bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

Abstract

The aim of this work is to understand the influence of the geometric parameters of envelope eco-materials, such as hemp concrete, on the mechanisms of coupled heat, air and moisture transfers, in order to predict behavior of the building to control and improving it in its durability. For this a multi-scale approach is implemented. It consists of mastering the dominant physical phenomena and their interactions on the microscopic scale. Followed by a dual-scale modeling, microscopic -macroscopic, of coupled heat, air and moisture transfers that takes into account the intrinsic properties and microstructural topology of the material using X-ray tomography combined with the correlation of 2D and 3D images. a characterization campaign of physical and hydrothermal properties of the hemp concrete manufactured in the laboratory was carried. It focused on studying the impact of aging, thermal and hydric state of the material on these intrinsic properties. The results show an excellent thermal insulation and natural moisture regulation capacity of hemp concrete. Then, a microscopic characterization by different imaging techniques was performed. The 3D reconstructions of the real material scanned with X-ray tomography at different resolutions show that hemp concrete has several scales of porosity, ranging from micro-porosity within the binder and hemp shiv to the inter-particle macro-porosity. the hydromorphic behavior under hydric solicitations was studied. The results of the 2D digital image correlation and X-ray tomography coupled with the volumetric image correlation show the nature of the behavior of hemp concrete subjected to different hygrometries. In fact, the hemp shiv undergoes greater deformations than the binder, thus causing changes in the microstructure of the material.

On the modeling part, a model of coupled heat, air and moisture transfer in porous building materials was developed using the periodic homogenization technique. The homogenized tensors of diffusion and thermal conductivity were determined numerically. Then, a confrontation between the results of the calculation of the macroscopic diffusion coefficients and the experimental results obtained at the LaSIE was carried out. It highlights the quality of the prediction. In addition, the thermal conductivity of the solid phase was thus deduced.

The results obtained in the framework of this PhD thesis have highlighted the influence of the hydric and thermal state of the hemp concrete on these intrinsic properties and its very heterogeneous microstructure. They also revealed the limitations of phenomenological approaches based on the establishment of the balances of mass, amount of motion and energy

Table des matières

Remerciement.....	I
Résumé.....	III
Abstract.....	V
Table des matières.....	VI
Table des illustrations.....	X
Liste des Tableaux.....	XV
Nomenclature.....	XVI
Introduction générale.....	1
Chapitre I État de l'art.....	5
I.1. Enjeux environnementaux dans le secteur de bâtiment.....	5
I.2. Principaux désordres causés par l'humidité dans le bâtiment.....	9
I.3. Milieu poreux.....	10
I.4. Grandeurs intrinsèques d'un milieu poreux.....	11
I.4.1. L'hygroscopicité.....	11
I.4.2. Humidité relative.....	12
I.4.3. Teneur en eau.....	12
I.4.4. Porosité :.....	13
I.4.5. Surface spécifique.....	14
I.4.6. Tortuosité.....	14
I.4.7. Loi de Laplace, loi de Kelvin.....	15
I.5. Mode de fixation de l'humidité.....	16
I.6. Différents états d'équilibre de l'eau au sein d'un matériau poreux.....	17
I.7. Isothermes de sorption :.....	18
I.8. Détermination expérimentale des isothermes de sorption.....	23
I.8.1. Méthode Gravimétrique.....	23
I.8.1.1. DVS (Dynamic Vapor Sorption).....	24
I.8.1.2. VSA (Vapor Sorption Analyzer).....	24
I.8.2. Méthode volumétrique.....	24
I.8.3. Comparaison entre les différentes méthodes.....	25
I.9. Théorie d'adsorption.....	26
I.9.1. Théorie de Langmuir.....	26
I.9.2. Modèle BET : adsorption multimoléculaire.....	27
I.9.3. Modèle GAB.....	27
I.9.4. Modèle GDW.....	28
I.10. Détermination de la surface spécifique BET :.....	28
I.11. Mécanismes de transfert d'humidité.....	30

I.11.1. Transfert en phase vapeur.....	31
I.11.2. Diffusion de surface.....	33
I.11.3. Transfert en phase liquide.....	34
I.11.4. Evaporation-condensation.....	34
I.12. Modèles de référence des transferts couplés de chaleur et d'humidité.....	35
I.12.1. Modèle de Luikov (1964).....	35
I.12.2. Modèle de Philip et De Vries (1957).....	37
I.12.3. Modèle de Künzle (1995).....	38
I.12.4. Effet de la pression totale.....	39
I.12.5. Effet de la variabilité des propriétés des matériaux poreux de construction ...	41
I.13. Changement d'échelle et homogénéisation.....	42
I.13.1. Volume élémentaire représentatif VER :.....	42
I.13.2. Passage micro-macro :	43
I.13.2.1. Homogénéisation par prise de moyenne volumique :.....	44
I.13.2.2. Méthode d'homogénéisation périodique.....	46
I.14. Matériaux biosourcés.....	48
I.15. Le béton de chanvre	49
I.16. Constituants du béton de chanvre	53
I.16.1. La chaux	53
I.16.2. La chènevotte.....	56
I.17. Capacité tampon hydrique MBV du béton de chanvre.....	59
I.18. Imbibitions capillaires.....	61
I.19. Conclusion	63
Chapitre II Caractérisation expérimentale des propriétés physiques, thermiques et hydriques du béton de chanvre	64
II.1. Matériau étudié	65
II.2. Les constituants du béton de chanvre	65
II.2.1. La chaux	65
II.2.2. La chènevotte.....	66
II.2.3. Eau.....	66
II.3. Formulation testée	67
II.4. Fabrication et condition de conservation	67
II.5. Propriétés Physiques	68
II.5.1. Surface spécifique	69
II.5.2. Porosité accessible à l'eau.....	71
II.5.3. Porosité par intrusion de mercure	73
II.6. Propriétés hydriques :	75
II.6.1. Isotherme de sorption.....	76
II.6.2. Modélisation des isothermes.....	80
II.6.3. Capacité de stockage d'humidité.....	83
II.6.4. Courbe de rétention d'eau.....	84
II.6.4.1. Relation entre la pression capillaire et l'humidité relative	86

II.6.5. Perméabilité à la vapeur d'eau	88
II.7. Propriétés thermiques.....	94
II.7.1. Conductivité thermique	94
II.7.2. Chaleur spécifique.....	97
II.8. Conclusion	100
Chapitre III Caractérisation hygro-morphique par micro-tomographie aux rayons X et corrélation d'images.....	102
III.1. Introduction	102
III.2. Micro-tomographie aux rayons X	103
III.2.1. Principe de base	104
III.2.2. La micro-tomographie au LMT-Cachan.....	106
III.2.3. Reconstruction 3D.....	108
III.3. Microscope électronique à balayage MEB.....	115
III.3.1. Analyse des images MEB.....	116
III.4. Corrélation d'images numériques (CIN)	119
III.4.1. Principe de la CIN.....	119
III.4.2. Corrélation d'images numériques 2D	120
III.4.3. Corrélation d'images volumiques.....	128
III.4.3.1. Procédure expérimentale.....	128
III.5. Conclusion.....	135
Chapitre IV Homogénéisation des HAM transferts dans les matériaux poreux de construction.....	136
IV.1. Description de la microstructure du milieu périodique.....	137
IV.2. Description microscopique des équations phénoménologiques HAM :	138
IV.2.1. Equations de Conservation de la Masse	138
IV.2.2. Equations de conservation de l'énergie :	140
IV.3. Analyse dimensionnelle des équations.....	141
IV.4. Modèles (passage) macroscopiques	145
IV.4.1. Transfert d'humidité.....	146
IV.4.1.1. Phase liquide	146
IV.4.1.2. Phase Vapeur.....	148
IV.4.2. Transfert de la phase gazeuse	152
IV.4.3. Transfert de chaleur.....	155
IV.5. Application numérique	159
IV.5.1. Résolution numérique pour une cellule élémentaire de géométrie tridimensionnelle	160
IV.5.2. Tenseur de conductivité thermique homogénéisé	160
IV.5.2.1. Détermination de la conductivité thermique de la matrice solide.....	162
IV.5.3. Tenseur de diffusion homogénéisé	163
IV.5.3.1. Comparaison avec des résultats expérimentaux.....	164

IV.5.4. Sensibilité des tenseurs de conductivité thermique et de diffusion homogénéisés	167
IV.5.4.1. Sensibilité du tenseur de conductivité thermique homogénéisé.....	167
IV.5.4.2. Sensibilité du tenseur de diffusion homogénéisé	168
IV.6. Conclusion.....	169
Conclusions générales et perspectives	171
Références bibliographiques	174

Table des illustrations

Figure I. 1 : Répartition des émissions de GES entre les secteurs économiques en 2010 [2]	6
Figure I. 2 : Consommation énergétique de différents secteurs économiques en (a) France, (b) Algérie [4], et (c) Hong Kong	7
Figure I. 3 : Distribution des pertes de chaleur dans une maison non isolée	8
Figure I. 4 : Représentation schématique d'un milieu poreux	11
Figure I. 5 : Définition des paramètres géométriques de la tortuosité et de l'orientation d'un pore	14
Figure I. 6 : Occupation diphasique de l'espace poreux [25]	15
Figure I. 7 : Représentation schématique d'adsorption physique d'eau dans un pore [27]	17
Figure I. 8 : Diagramme schématique d'une courbe d'isotherme d'adsorption et désorption (adoptée de K. AZOS DIAZ 20016 [29])	19
Figure I. 9 : Classification des isothermes d'adsorption physique donnée par l'IUPAC [30]	20
Figure I. 10 : Effet bouteille d'encre [27]	21
Figure I. 11 : Classification par l'IUPAC des différentes boucles d'hystérésis observées [30]	22
Figure I. 12 : Dispositif gravimétrique de mesure des isothermes de sorption à droite VSA, et à gauche : DVS	24
Figure I. 13 : Dispositif volumétrique de mesure des isothermes de sorption : Belsorp-aqua3	25
Figure I. 14 : Comparaison des isothermes de sorption à 20°C obtenues par différentes méthodes [40]	25
Figure I. 15 : Comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption obtenues par deux méthodes différentes : gravimétrique et volumétrique [41]	26
Figure I. 16 : Couche de molécule adsorbées [26]	28
Figure I. 17 : Le transfert d'humidité en phase vapeur et liquide pour les conditions hivernales [46]	30
Figure I. 18 : Représentation des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore	32
Figure I. 19 : Illustration de l'évaporation-condensation dans un pore [51]	35
Figure I. 20 : Champ aléatoire de perméabilité à la vapeur [68]	41
Figure I. 21 : Comparaison de l'évolution de la pression de vapeur suivant une coupe suivant l'épaisseur du voile avec l'approche déterministe et probabiliste [68]	42
Figure I. 22 : Milieu hétérogène et son VER, les différentes échelles	43
Figure I. 23 : Volume élémentaire représentatif d'un système triphasique $s - l - g$ [71]	44
Figure I. 24 : Microstructure constituée de la répétition périodique d'une cellule de base [85]	47

Figure I. 25 : Représentation schématique du béton de chanvre : application toit [107].	50
Figure I. 26 : Représentation schématique du béton de chanvre : application Mur [107]	50
Figure I. 27 : Représentation schématique du béton de chanvre : application Enduit [107]	50
Figure I. 28 : Exemple de dosage du béton de chanvre : (a) Toit, (b) Mur et (c) Enduit [107]	51
Figure I. 29 : Banchage du béton de chanvre et étape de réalisation.....	52
Figure I. 30 : Béton de chanvre projeté sur mur	53
Figure I. 31 : Blocs de béton de chanvre préfabriqué.....	53
Figure I. 32 : Cycle de la chaux	55
Figure I. 33 : Exemple d'utilisation du chanvre [135].....	56
Figure I. 34 : Micrographie d'une coupe transversale de tige de chanvre [136]	57
Figure I. 35 : Composition d'une tige de chanvre [130], chènevotte fibrée et chènevotte défibrée [8].....	58
Figure I. 36 : Image au microscopique électronique à balayage d'une particule de chanvre [137].....	58
Figure I. 37 : Quantité d'eau absorbée par les chènevotte fibrée (CF) et Pure (CP) [8] ...	58
Figure I. 38 : Evolution de la tranche moyenne de la chènevotte lors de l'absorption de l'eau par l'IRM [139]	59
Figure I. 39 : Valeurs du tampon d'humidité (a) du béton de chanvre [120] (b) des matériaux de construction [140]	60
Figure I. 40 : Classifications de MBV données par Nordtest Project [140].....	61
Figure I. 41 : Absorption d'eau par capillarité ans le temps [118].....	62
Figure II. 1 : Photo du liant Batichanvre utilisée.....	66
Figure II. 2 : Photo de la chènevotte utilisée, à gauche : en vrac et à droite : photo MEB	66
Figure II. 3: Malaxeur utilisé et forme des éprouvettes du béton de chanvre fabriqué...	67
Figure II. 4 : Section transversale de l'éprouvette cylindrique.....	68
Figure II. 5 : Micromeritics ASAP 2020	69
Figure II. 6 : Isotherme d'adsorption de l'azote (N ₂) à 77K.....	70
Figure II. 7 : Etape de remplissage des pores	71
Figure II. 8 : Banc de saturation	72
Figure II. 9 : Comparaison de : (a) porosité totale accessible à l'eau, (b) teneur en eau maximale à 30 et 60 jours	73
Figure II. 10 : Porosimètre à mercure Micromeritics-Autopore III 9420	74
Figure II. 11 : Distributions de la taille des pores obtenues par intrusion au mercure à 30 et 60 jours d'âge.....	75
Figure II. 12 : Diagramme schématique d'une courbe d'isotherme d'adsorption et de désorption [148].....	76
Figure II. 13 : Belsorp Aqua3 (à gauche) et son principe de fonctionnement (à droite).	77
Figure II. 14 : Comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau à 25°C à 7, 30 et 60 jours d'âge	78

Figure II. 15 : Comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption du béton de chanvre en fonction de la température.....	79
Figure II. 16 : Comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption du béton de chanvre en fonction du dosage du liant.....	80
Figure II. 17 : Isotherme de sorption du béton de chanvre obtenu par les modèles GAB et GDW, à (a) 7 jours, (b) 30 jours et (c) 60 jours.....	83
Figure II. 18 : Comparaison de la capacité de stockage d'humidité à 7, 30 et 60 jours à 25 ° C.....	84
Figure II. 19 : Extracteur à membrane (modèle 10120 de Soil - Moisture Equipment Corp)	85
Figure II. 20 : Courbe de rétention d'eau du béton de chanvre.....	86
Figure II. 21 : Evolution de la teneur en eau en fonction des très hautes l'humidités relatives.....	87
Figure II. 22 : Schéma descriptif de la coupelle	88
Figure II. 23 : Dispositif Gintronic-Gravitest et son principe de fonctionnement.....	89
Figure II. 24 : Représentation des résistances à la vapeur d'eau introduites dans la méthode de la coupelle	91
Figure II. 25 : Evolution du flux de vapeur en fonction du temps	91
Figure II. 26 : Valeurs moyennes des différents paramètres du béton de chanvre en fonction de l'âge (a) perméabilité à la vapeur d'eau, (b) facteur de résistance à la vapeur d'eau	92
Figure II. 27 : Comparaison entre la coupelle humide et la coupelle sèche à 60 jours d'âge (a) perméabilité à la vapeur d'eau, (b) facteur de résistance à la vapeur d'eau.....	93
Figure II. 28 : Lambda-meter Ep 5000e.....	95
Figure II. 29 : Evolution de la conductivité thermique du béton de chanvre en fonction de la température à 30 et 60 jours d'âge.....	96
Figure II. 30 : Évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau du béton de chanvre à 23°C et à 30 jours d'âge	97
Figure II. 31 : Calorimètre CALVET BT 2.15.....	97
Figure II. 32 : Coupe du Calorimètre CALVET BT 2.15	98
Figure II. 33 : Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la température du béton de chanvre à 7, 30 et 60 jours.....	99
Figure II. 34 : Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la teneur en eau du matériau à 25 ° C et à 30 jours d'âge.....	100
Figure III. 1 : Principe de la tomographie aux rayons X [168].....	104
Figure III. 2 : Tomographe X50 du LMT.....	106
Figure III. 3 : Positon de l'échantillon après rotation de la tige dans le cas d'un mauvais centrage.....	107
Figure III. 4 : Reconstruction 3D du béton de chanvre à une résolution de 31.8*31.8*31.8 µm ³ , et la ROI dans le plan (x, y).....	109
Figure III. 5 : Evolution de la porosité avec la taille du volume de mesure	110

Figure III. 6 : Distribution du dosage (a) en chènevotte, (b) en liant dans les 3 directions	111
Figure III. 7 : Distribution du volume d'air dans le béton de chanvre dans les 3 directions (x, y, z)	111
Figure III. 8 : Reconstruction 3D du béton de chanvre à une résolution de $7.5*7.5*7.5 \mu\text{m}^3$, et la ROI dans le plan (x, y)	112
Figure III. 9 : Evolution de la porosité avec la taille du volume de mesure	113
Figure III. 10 : Distribution du volume d'air dans le béton de chanvre dans les 3 directions (x, y, z)	113
Figure III. 11 : Coupe 2D d'un volume du béton chanvre scanné à $2.3 \mu\text{m}$	114
Figure III. 12 : Reconstruction 3D d'une particule de chènevotte à une résolution de $3.3*3.3*3.3 \mu\text{m}^3$, et une coupe dans le plan (x, y)	114
Figure III. 13 : Microscope électronique à balayage (MEB) au LMT-Cachan	116
Figure III. 14 : Coupe transversale d'une particule de chènevotte au MEB montrant les différents pores	117
Figure III. 15 : Coupe transversale de la chènevotte observée au MEB	117
Figure III. 16 : Coupe longitudinale de la chènevotte observée au MEB	118
Figure III. 17 : (a) Image MEB de la chènevotte, (b) courbes isovaleurs des températures calculées	119
Figure III. 18 : Dispositif expérimental développé au LMT-Cachan	121
Figure III. 19 : Evolution de la masse des échantillons dans le temps (a) humidification et (b) séchage	122
Figure III. 20 : Image de référence (échantillon sec, $T=25^\circ\text{C}$)	123
Figure III. 21 : Image déformée après humidification ($75\%HR$, $T=25^\circ\text{C}$)	123
Figure III. 22 : Image de référence (échantillon saturé, $T= 25^\circ\text{C}$)	123
Figure III. 23 : Image déformée après séchage ($03\%HR$, $T= 25^\circ\text{C}$)	123
Figure III. 24 : Champs de déformations dans le sens XX	124
Figure III. 25 : Champs de déformations dans le sens YY	124
Figure III. 26 : Champs de déformations dans le sens XY	124
Figure III. 27 : Champs de déplacements dans la direction XX (en px)	124
Figure III. 28 : Champs de déplacements dans la direction YY (en px)	124
Figure III. 29: déplacement dans le sens YY en fonction du temps au milieu de l'échantillon (coupe à 100 pixels)	125
Figure III. 30 : Image de référence (sec, $T=25^\circ\text{C}$) avec numérotation des trois zones	126
Figure III. 31 : Champs de déformations dans le sens YY avec numérotation des trois zones	126
Figure III. 32: Champs de déformations dans le sens XX	127
Figure III. 33: Champs de déformations dans le sens YY	127
Figure III. 34 : Champs de déformations dans le sens XY	127
Figure III. 35 : Dispositif adapté pour maintenir le conditionnement de l'échantillon...	129
Figure III. 36 : Reconstruction 3D du béton de chanvre à une résolution de $17.1*17.1*17.1 \mu\text{m}^3$	130

Figure III. 37 : Coupe obtenue par tomographie aux rayons X du béton de chanvre (résolution 17.1 μ m) (a) 0% HR (b) 85% HR.....	130
Figure III. 38 : ROI de 400x400x400 pix ³ (a) à 0% HR, et déformations équivalentes à 85% HR (b) ϵ_{xx} (c) ϵ_{yy} et (d) ϵ_{zz}	131
Figure III. 39 : (a) coupe de l'échantillon à 100px (1.71 mm), et Champs de déformations (b) ϵ_{zz} (c) ϵ_{xx} (d) ϵ_{yy}	133
Figure III. 40 : (a) coupe de l'échantillon à 200px (3.42 mm), et Champs de déformations (b) ϵ_{zz} (c) ϵ_{xx} (d) ϵ_{yy}	134
Figure IV. 1 : Image 2D obtenue par tomographie des rayons X du plâtre [165] (à droite) et du béton [182] (à gauche).....	137
Figure IV. 2 : Exemple d'une microstructure périodique partiellement saturé.....	138
Figure IV. 3 : Cellule élémentaire du milieu périodique.....	160
Figure IV. 4 : Distribution des fonctions χ_{s1} et χ_{l1} dans la période, (a) χ_{s1} , et (b) χ_{l1}	162
Figure IV. 5 : Distribution de la fonction χ_{l1} dans la période.....	164
Figure IV. 6 : Courbes expérimentales du béton : (a) isotherme de sorption, (b) courbe de rétention.....	165

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 : Coefficient d'absorption de l'eau [118].....	62
Tableau II. 1 : Composition du béton de chanvre fabriqué	67
Tableau II. 2 : Paramètres associés aux modèles GAB et GDW pour les différents matériaux étudiés	82
Tableau II. 3 : Valeurs de la succion et de l'humidité relative issues de la relation de Kelvin87	
Tableau III. 1 : Valeurs des déformations locales dans les trois zones considérées	126
Tableau IV. 1 : Comparaison entre la valeur calculée et la valeur expérimentale du coefficient de diffusion	166
Tableau IV. 2 : Evolution du tenseur de conductivité thermique homogénéisé en fonction de la teneur en eau, et de la porosité	168
Tableau IV. 3 : Variation du coefficient de diffusion homogénéisé en fonction de la teneur en eau, et de la porosité	169

Nomenclature

Caractères latins

C	Capacité thermique volumique [$J/m^3 K$]
D_v	Coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air libre [m^2/s]
D_v^{hom}	Tenseur de diffusion de vapeur d'eau homogénéisé [m^2/s]
h_l	Enthalpie massique de l'eau liquide [J/Kg]
h_{lv}	Enthalpie massique de la vapeur d'eau [J/Kg]
I	Matrice identité
L	Longueur macroscopique caractéristique [m]
l	Longueur microscopique caractéristique [m]
n_{ij}	Vecteur unitaire normal dirigé du domaine Ω_i vers le domaine Ω_j
n_i	Fraction volumique de la phase i
P	Pression totale [Pa]
P_c	Pression capillaire [Pa]
P_v	Pression partielle de vapeur d'eau [Pa]
P_{vs}	Pression de vapeur d'eau saturante [Pa]
T	Température [K]
t	Temps [s]
v	Vitesse [m/s]
x	Variable macroscopique
y	Variable microscopique

Caractères grecs

Γ	Interface entre deux phases différentes
ε	Paramètre de séparation d'échelle
ε_p	Porosité [%]
λ	Conductivité thermique [$W/m K$]
λ^{hom}	Tenseur de conductivité thermique homogénéisé [$W/m K$]
φ	Humidité relative [%]
ρ	Masse volumique [Kg/m^3]
ω_{lg}	Vitesse de l'interface liquide-gaz [m/s]
Ω	Période

Ω_i Part de la période occupée par la phase i [m^3]

Indice

s Solide

l Eau liquide

g Gaz

a Air sec

v Vapeur d'eau

r Variable de référence

$*$ Variable dimensionnelle

Introduction générale

Le secteur du bâtiment constitue aujourd'hui un secteur à fort enjeu quant au potentiel d'économie d'énergie et à la réduction de gaz à effet de serre. De ce fait, une réelle et pressante volonté de réduire les dépenses énergétiques et d'amélioration des conditions environnementales s'avère nécessaire. L'évolution des exigences réglementaires a eu pour effet la réduction de la valeur de la perméabilité des nouvelles constructions. Ceci a eu, pour conséquence, non seulement l'augmentation de l'impact des transferts de masse, notamment d'humidité, sur le bilan énergétique global du bâtiment mais aussi de l'intérêt accru de la part de la communauté scientifique quant à l'étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité au sein des matériaux poreux et à l'interface enveloppes de bâtiments - ambiances. L'autre raison de cette évolution est le rôle qui se révèle peu à peu important des transferts d'humidité sur la durabilité des ouvrages et sur le comportement énergétique réel du bâtiment, soumis aux sollicitations de son environnement. En effet, l'humidité représente la cause majeure de la dégradation des bâtiments, et son excès dans l'enveloppe de bâtiment cause la détérioration de sa performance énergétique. Malgré des développements récents dans ce domaine, des zones d'ombre persistent. En particulier, des écarts entre les mesures et les résultats issus des simulations numériques ont été constatés dans différents projets internationaux (Annexes 24 et 41 de l'Agence Internationale de l'Énergie, ANR Habisol HYGROBAT). L'origine de ces écarts n'est pas véritablement connue. Les travaux de la littérature ont mis en évidence la complexité de la problématique, mais n'ont pas encore permis d'élucider l'origine de ces écarts ni de mettre en place des outils numériques adaptés. Or, la réponse à cette problématique est fondamentale pour une meilleure prédiction tant de la durabilité des ouvrages que des comportements dynamiques des enveloppes de bâtiments.

Par ailleurs, la sélection des matériaux utilisés pour la construction joue un rôle important dans la réussite d'un projet à haute qualité environnementale et la constitution des systèmes économes en énergie s'avère primordiale. Ainsi, la recherche s'est très vite dirigée vers l'utilisation des matériaux issus de la biomasse végétale. Ces derniers apparaissent comme une solution incontournable en réponse aux problématiques environnementales. En effet,

l'utilisation des matériaux classiques dans le domaine de la construction contribue à l'augmentation des émissions de CO₂ et nécessite une énorme quantité d'énergie pour leur production. De ce fait, des solutions classiques ont été mises en œuvre, telles que, la fabrication des matériaux très poreux moins énergivores et plus respectueux de l'environnement, dits 'matériaux biosourcés'. Parmi ces matériaux, nous pouvons distinguer le béton de chanvre qui intéresse, du fait de ces avantages, de plus en plus les acteurs de la construction et la réhabilitation. Ce matériau à faible impact environnemental, est composé de fibres végétales (chènevotte) et de liant. Il occupe une place importante pour ses fonctions hygrothermiques et acoustiques très intéressantes qui contribuent au confort des usagers. Ceci justifie notre choix pour ce matériau en plus de ses qualités environnementales.

Néanmoins, l'utilisation des matériaux biosourcés est freinée, notamment, de par la non disponibilité de bases de données relatives à leurs propriétés intrinsèques et par méconnaissance de leurs comportements dans le temps. Étant un matériau hygroscopique, il est très sensible aux variations des conditions environnementales d'humidité relative et de température, ce qui peut engendrer des changements de ces propriétés intrinsèques, ainsi que des variations dimensionnelles (gonflement ou retrait) et des dégâts, qui dans certains cas mènent à sa dégradation et sa détérioration. Il est donc essentiel d'évaluer son comportement vis-à-vis des sollicitations hygrothermiques.

Sur le plan scientifique, plusieurs modèles phénoménologiques de transferts couplés de chaleur et d'humidité ont été développés pour prédire le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiments. Les différents paramètres d'entrée de ces modèles sont évalués expérimentalement, d'où la nécessité d'une caractérisation expérimentale fine et fiable des différentes propriétés hygrothermiques des matériaux de construction.

L'objectif principal de ce travail doctoral est l'étude multi-échelles du comportement hygrothermique du béton de chanvre utilisé dans les constructions neuves ou en rénovation pour une meilleure prédiction des performances énergétique et environnementale des bâtiments, ainsi que les mécanismes de dégradation des ouvrages. Pour ce faire, le présent manuscrit est organisé autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'analyse bibliographique des contextes environnementaux et énergétiques actuels du secteur du bâtiment. Les grandeurs caractéristiques d'un matériau poreux ainsi que, les différents modes de fixation d'eau sont présentés. Ce chapitre introduit aussi les mécanismes mis en jeu lors des transferts d'humidité dans les milieux poreux, et les

modèles de référence des transferts couplés de chaleur et de masse. De plus, ce chapitre apporte aussi un état de l'art concernant les connaissances actuelles du béton de chanvre et ses constituants. Enfin, l'utilisation de ce matériau à base de fibres végétales et ses différentes caractéristiques ont été abordées.

Dans le deuxième chapitre, une caractérisation fine des principales propriétés microstructurales (porosité et surface spécifique), thermiques (conductivité thermique et chaleur spécifique) et hydriques (isothermes d'adsorption et de désorption, rétention d'eau et perméabilité à la vapeur d'eau) du béton de chanvre est entreprise. Le matériau étudié a été confectionné et fabriqué au laboratoire LaSIE. Cette campagne expérimentale de caractérisation complète des propriétés du béton de chanvre, en fonction de son état hydrique et de sa température, a été élaborée en vue d'une meilleure maîtrise des paramètres d'entrée des modèles de prédiction du comportement hygrothermique des matériaux de construction. Une attention particulière a été portée quant à l'évolution de ces propriétés intrinsèques en fonction de l'âge du matériau.

Le troisième chapitre est dédié à la caractérisation microscopique et hygro-morphique du béton de chanvre via des techniques d'imageries non destructives présentant des atouts certains pour une meilleure caractérisation microstructurale à l'échelle locale du matériau. Ainsi, l'intérêt scientifique principal de cette partie réside, non seulement, dans une meilleure compréhension du comportement des fibres mais aussi de leur interaction avec le liant vis-à-vis des sollicitations hydriques, tout en intégrant, le caractère d'anisotropie et hétérogène de ce matériau. D'abord, des reconstructions 3D de la structure réelle du matériau ont été entreprises en fonction de l'hygrométrie par micro-tomographie aux rayons X au laboratoire LMT à l'ENS Cachan. Les scans tomographiques ont renseigné les différentes échelles de la porosité du béton de chanvre, ainsi que les champs de déformations entre un état sec et un état humide bien défini ont été calculés par corrélation volumique en utilisant Correli-C8R développé au laboratoire LMT-Cachan. Les champs de déformations ont été projetés sur la matrice solide. D'autres observations sous microscope électronique à balayage (MEB) ont été également établies pour compléter les résultats ainsi obtenus notamment ceux de la fibre végétale.

Un volet important de ce chapitre a été consacré à une nouvelle investigation en corrélation d'images 2D menée sur la prédiction des champs de déplacements et de déformations du béton de chanvre soumis à des sollicitations hydriques en exploitant les images 2D acquises à partir d'une cellule expérimentale développée. Le post traitement des données a été réalisé via Correli_Q4 développé au laboratoire LMT-Cachan pour ce type de matériau.

Le quatrième et dernier chapitre porte sur l'homogénéisation périodique des équations de conservation de masse et d'énergie exprimées à l'échelle microscopique pour les différentes phases en présence du milieu, en s'affranchissant de l'hypothèse de la constance de la pression totale de la phase gazeuse. La technique de changement d'échelle utilisée est la méthode d'homogénéisation périodique basée sur les développements asymptotiques à deux échelles. Cette méthode est bien connue pour sa pertinence dans l'élaboration des modèles macroscopiques. Ensuite, des simulations numériques sur une cellule élémentaire représentative de la microstructure d'un milieu poreux ont été effectuées afin de calculer les tenseurs homogénéisés de diffusion et de conductivité thermique constituant les principaux paramètres d'entrée du modèle développé. La validation expérimentale du coefficient de diffusion macroscopique a été réalisée par rapport aux travaux existants dans la littérature. Enfin, une étude de sensibilité des tenseurs de diffusion et conductivité thermique homogénéisés en fonction de la variation de la teneur en eau et de la porosité de la cellule élémentaire concernée a été réalisée.

Cette étude de sensibilité montre la nécessité de la prise en compte des variations des paramètres d'entrée lors des simulations pour mieux appréhender le comportement des matériaux de construction et pour une meilleure prédiction de leurs performances hygrothermiques.

Chapitre I

État de l'art

Dans ce chapitre nous présentons un état de l'art concernant les enjeux environnementaux liés à la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment, et les principaux désordres causés par l'humidité dans le bâtiment. Par la suite, Les principales grandeurs caractérisant le milieu poreux sont abordées. Les différents mécanismes mis en jeu lors des transferts hygrothermiques, et les différents modèles de référence existant dans la littérature sont exposés. Nous définissons aussi les différentes méthodes d'homogénéisations. Enfin, un état des connaissances consacrées au béton de chanvre ainsi que ses principaux composants sont présentés.

I.1. Enjeux environnementaux dans le secteur de bâtiment

Depuis quelques années, la demande mondiale d'énergie continue à accroître et la courbe de consommation d'énergie ne cesse d'augmenter. Entre 1971 et 2014, la consommation finale totale (TFC) a plus que doublé passant selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) de 4244 Mtoe à 9426 Mtoe [1]. Les différents besoins conduisent à l'épuisement des ressources énergétiques et ont pour conséquence l'amplification de la pollution dont celle liée aux émissions anthropiques (Gaz à Effet de Serre). Ces dernières constituent la cause principale de la hausse des températures de l'air et de la surface des océans, et du réchauffement climatique de la planète. En effet, les températures moyennes à la surface de la Terre ont augmenté de 0.85 °C (de 0.65 à 1.06 °C) durant la période 1880 à 2012, et le niveau moyen des mers, à l'échelle du globe, s'est élevé de 0,19 m (de 0,17 à 0,21 m) entre 1901 et 2010 [2]. L'incidence de ce changement climatique sur l'activité humaine et sur le système naturel a été observée par le changement du cycle mondial de l'eau, la diminution de la couverture de neige et de glace, notamment, l'élévation du niveau des mers. Les émissions mondiales de GES entre les secteurs économiques sont illustrées dans la figure I. 1 (GIEC, 2014). Cette dernière montre que la plus grande source d'émission de GES est l'énergie.

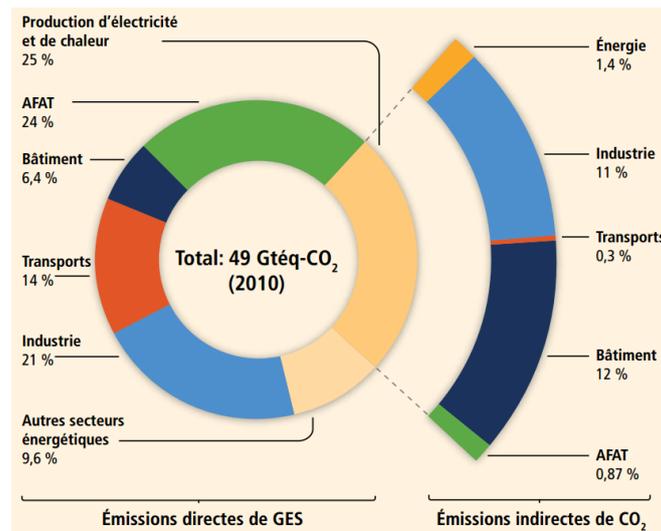
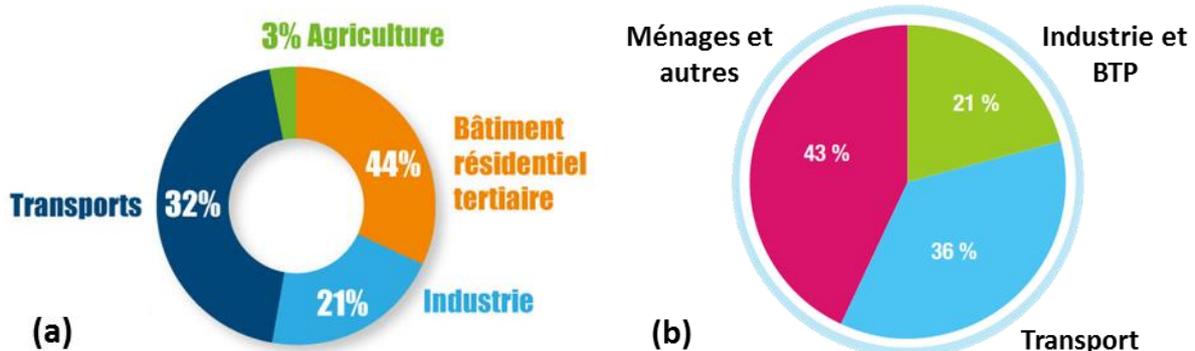


Figure I. 1 : Répartition des émissions de GES entre les secteurs économiques en 2010 [2]

Ce constat est à l'origine de la prise de conscience des pouvoirs publics, et de la société civile de cet effet et de la nécessité de réduction des émissions de gaz à effet de serre afin de limiter l'incidence du réchauffement climatique. Dans le cadre de la lutte mondiale contre le réchauffement climatique plusieurs dispositifs règlementaires sont mis en œuvre. Au niveau international, on peut signaler la Conférence sur le climat de Paris, (COP21) organisée en décembre 2015. C'est la 21^{ème} Conférence des Parties de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, et les 195 pays signataires de cette convention présentent leurs engagement et contribution à la lutte mondiale contre le réchauffement climatique afin de maintenir la hausse de température en dessous de 2°C d'ici à 2100 [3], et de mettre en place des plans d'action pour limiter leurs émissions de gaz à effet de serre. En 2016, on a assisté à la tenue de la Conférence COP22 qui a confirmé les conclusions de celle tenue à Paris.



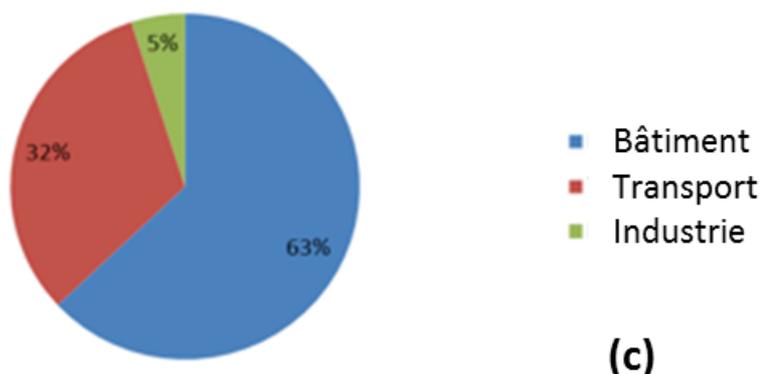


Figure I. 2 : Consommation énergétique de différents secteurs économiques en (a) France¹, (b) Algérie [4], et (c) Hong Kong²

La part du secteur du bâtiment dans les émissions mondiales de GES augmentent pour atteindre environ 19 % (figure I. 1). De plus, le bâtiment représente le secteur le plus consommateur d'énergie. En France, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) représente à lui seul 44 % de la consommation d'énergie finale (figure I. 2a), et 26 % des émissions de gaz à effet de serre. Le même constat est aussi fait en Algérie où le secteur du bâtiment demeure le premier poste de consommation d'énergie avec 42% (43% de consommation pour ménage et autres dont 1% d'énergie consommée par le secteur de l'agriculture) de consommation d'énergie totale (figure I. 2b). Un autre exemple qui montre que le bâtiment représente un véritable enjeu environnemental est celui de la ville de Hong Kong en Chine (figure I. 2c), où 63% de l'énergie finale est consommée par le secteur du bâtiment qui est directement responsables de 60 % des émissions des GES de la ville.

Ces chiffres montrent l'importance des enjeux du secteur du bâtiment pour réduire les consommations énergétiques et de limiter les impacts environnementaux sans pour autant renoncer aux exigences de confort, et de la qualité de l'air intérieur. Ceci est considéré comme un critère important pour la construction qui présente des effets significatifs sur la santé.

Concernant les bâtiments existants en France, la loi fixe comme objectif principal la rénovation complète de ces logements anciens afin de réduire la consommation d'énergie et les émissions de GES, ainsi que l'amélioration du confort des occupants. La rénovation des bâtiments consiste

¹ <http://www.ephinergia.com/contexte-energetique>

² <http://www.consulfrance-hongkong.org/Focus-Energie-Environnement-Hong-Kong-consommation-et-efficacite-energetique>

à isoler l'enveloppe (figure I. 3) par des matériaux à faible impact environnemental pour réduire de 38% la consommation d'énergie d'ici 2020 [5].

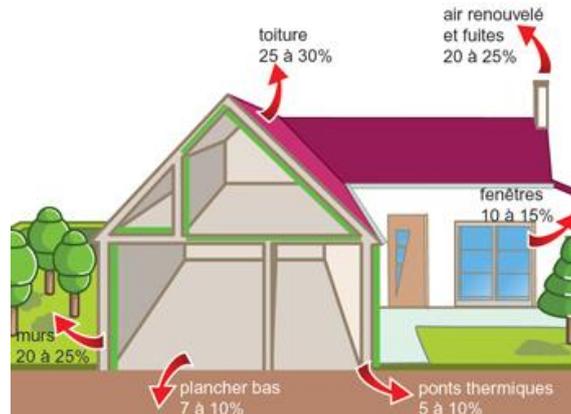


Figure I. 3 : Distribution des pertes de chaleur dans une maison non isolée³

Dans le même sens, pour mieux prévenir et remédier au contexte de changement climatique la démarche haute qualité environnementale a fait apparition et pris, d'année en année ; une ampleur grandissante. La démarche HQE a pour principaux objectifs la réduction des impacts environnementaux intérieurs et extérieurs, et de construire de manière plus durable, tout en assurant aux usagers un cadre de vie confortable et sain.

La conception et la réhabilitation des bâtiments doivent principalement être relevées de l'éco conception [6]. Pour ce faire il est nécessaire de considérer quatre critères principaux [7] :

- Critère de l'écoconstruction : consiste à limiter les consommations énergétiques et les émissions de GES le long du cycle de vie de la construction en utilisant des matériaux écologiques, naturels et renouvelables.
- Critère Sanitaire : qui vise à prévenir des risques de santé des usagers
- Critère de confort : basé sur l'amélioration du confort des occupants (hygrothermique, acoustique, visuel, olfactif).
- Critère économique : qui porte sur la minimisation des besoins et dépenses, ainsi que sur l'optimisation du coût global de la construction.

Aujourd'hui le secteur du bâtiment est souvent considéré comme une mine d'or [8] pour réduire les émissions de GES. En effet, des travaux [9, 10] confirment que l'utilisation des matériaux

³ <https://www.kbane.com>

à faible impact environnemental dans la construction devrait permettre de limiter de manière non négligeable les émissions de GES. De ce fait, l'utilisation dans le domaine de l'habitat des matériaux biosourcés qui sont renouvelables, recyclables et durables offrent une alternative sérieuse aux matériaux classiques. Ces éco matériaux qualifiés de matériaux écologiques ou sains permettent de réduire les impacts environnementaux et les consommations énergétiques avec un meilleur confort des occupants [6]. De plus, ces matériaux continuent à réduire efficacement les effets de GES grâce à leur capacité d'emprisonnement du CO₂.

I.2. Principaux désordres causés par l'humidité dans le bâtiment

L'enveloppe d'un bâtiment présente le siège des transferts de chaleur, d'air et d'humidité qui influencent le climat interne du bâtiment. L'humidité a une action directe sur cette enveloppe du bâtiment. En effet, un excès d'humidité dans un environnement peut affecter directement les performances énergétiques. De plus, l'humidité représente la source d'apparition de plusieurs pathologies au niveau de la paroi, et la cause majeure de dégradation des bâtiments. Les désordres apparaissent lorsque des valeurs importantes des teneurs en eau sont atteintes dans les matériaux de construction. Cette eau peut avoir plusieurs origines. Elle peut provenir de l'extérieur du bâtiment telle que les pluies, les neiges et les remontées capillaires, ou à des apports d'eau découlant du bâtiment lui-même et des sources liées aux usagers. Les différents désordres causés par l'humidité dans le bâtiment peuvent être classés en quatre catégories en fonction du rôle de l'humidité [11–13]:

Les altérations dues à l'action propre de l'humidité : le transfert d'humidité à travers la paroi entraîne la modification des propriétés thermo-physiques des matériaux. Ce changement des caractéristiques des matériaux de construction peut altérer ses performances et provoquer sa dégradation.

Lorsqu'un matériau est placé dans un milieu à hygrométrie élevée, ses pores se remplissent davantage d'eau par adsorption, et exercent des pressions capillaires sur la matrice solide. Ces pressions fragilisent le matériau provoquant des variations dimensionnelles (gonflement et retrait) et peuvent causer des désordres [14]. De plus, la résistance mécanique du matériau baisse [15] et sa conductivité thermique augmente. En effet, l'air qui constitue un mauvais conducteur de l'énergie est remplacé par l'eau et les déperditions thermiques à travers les parois deviennent plus importantes.

Les altérations dont l'humidité est le vecteur : l'humidité est transportée à travers les pores d'un matériau poreux et subit des variations dynamiques de manière continue. Cette migration d'humidité peut provoquer la dégradation du matériau poreux par l'action du gel. De plus, l'humidité constitue le vecteur de transport des agents agressifs (tels que les chlorures et les sulfates) qui peut provoquer le désordre tel que la cristallisation internes des sels en exerçant des contraintes sur la matrice poreuse.

Les altérations se développant en milieu humide : ces pathologies surviennent dans un environnement à forte teneur en humidité, et dépendent directement du niveau d'humidité présente dans le milieu. Une teneur en humidité importante peut provoquer la corrosion des composants métalliques du bâtiment, ainsi que l'apparition des moisissures, bactéries, algues, lichens. Ces derniers engendrent plusieurs détériorations des constructions, et qui constituent un risque important sur la santé des occupants en raison de la sédimentation et la propagation des agents pathogènes [16,17].

La dégradation des ambiances intérieures : L'humidité est un élément important pour la qualité des ambiances intérieures des bâtiments. Elle peut avoir une action directe sur le bien-être des occupants en étant un paramètre clé du confort hygrothermique. En effet, dans une ambiance présentant un inconfort hygrothermique, des difficultés respiratoires des occupants ont été observées [18]. L'humidité peut également agir indirectement sur la qualité de l'air intérieur en favorisant le développement d'agents nocifs ayant un effet sur la santé de l'homme, et qui peuvent provoquer des réactions allergiques [19].

I.3. Milieu poreux

Un matériau poreux (figure I. 4) est un solide de forme compliquée du fait qu'il est hétérogène et anisotrope à l'échelle macroscopique, englobant des vides appelés pores.

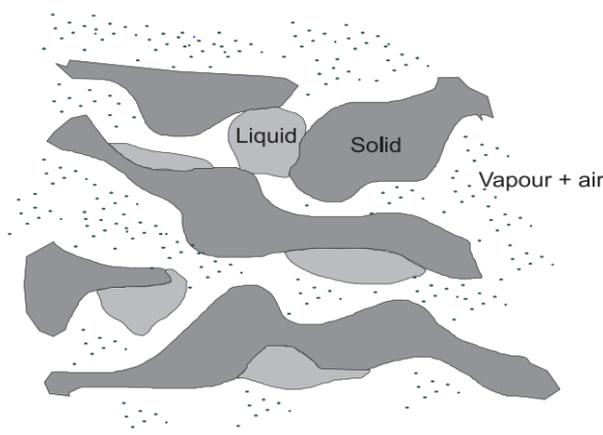


Figure I. 4 : Représentation schématique d'un milieu poreux

Dans les conditions usuelles, un matériau poreux peut être décomposé en trois phases :

- La phase solide ou encore matrice du matériau qui est constituée d'un réseau poreux appelé pores capillaires.
- Une phase liquide constituée d'eau pure (eau libre et adsorbée).
- Une phase gazeuse qui n'est autre que l'air humide (air sec + vapeur d'eau).

Au niveau macroscopique, la description complète d'un tel milieu suppose donc la description de chacune de ces phases et de leurs proportions relatives.

I.4. Grandeurs intrinsèques d'un milieu poreux

I.4.1. L'hygroscopicité

Un matériau non hygroscopique est un matériau pour lequel, à l'équilibre, la tension de vapeur du liquide l'imprégnant est maximale pour une température donnée. C'est le cas durant le séchage des solides qui possèdent un film d'eau superficiel ou des solides dont les interstices sont suffisamment gros pour permettre la diffusion assez rapide de l'eau des pores à la surface. Un solide devient hygroscopique quand l'eau qu'il contient est en équilibre avec un air dont la pression partielle en eau est inférieure à la tension de vapeur maximale pour la température considérée. L'humidité relative de cet air est alors inférieure à 1. Ce comportement est dû principalement aux forces liées à la capillarité qui ont tendance à retenir l'eau en phase liquide.

On dit qu'un matériau est hygroscopique, lorsqu'il est apte à fixer et à stocker une quantité importante d'humidité de l'air environnant. Cette propriété traduit donc la capacité d'un matériau à adsorber de l'eau et à la retenir en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. Ce sont les caractéristiques microstructurales qui confèrent aux différents matériaux poreux de

construction une hygroscopicité. En effet, l'hygroscopie est plus marquée pour les matériaux présentant des pores très fins (inférieurs à 100 nm). La quantité d'humidité fixée par adsorption et condensation capillaire n'est pas négligeable. Les pores de taille plus importante sont très peu sensibles à ce phénomène.

I.4.2. Humidité relative

L'humidité relative HR de l'air ambiant (aussi nommée degré d'hygrométrie ou degré hygrométrique) s'exprime comme le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau P_v sur la pression partielle de vapeur saturante P_{vs} . Elle représente donc le rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions.

$$HR = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad \text{I. 1}$$

La pression P_{vs} est donnée par une expression empirique en fonction de la température, valable pour $0 < T < 80^\circ\text{C}$ avec une précision de $\pm 0.15\%$ (Peuhkuri, 2003) :

$$P_{vs} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042.9}{T - 37.58}\right) \quad \text{I. 2}$$

Où :

HR [%] : est l'humidité relative, P_v [Pa] est la pression partielle de vapeur d'eau, P_{vs} [Pa] est la pression saturante de vapeur d'eau, et T [K] la température.

Pression de gaz

La phase gazeuse est constituée d'un mélange d'air sec et de la vapeur d'eau. La pression totale de la phase gazeuse est la somme des pressions partielles de l'air sec et de la vapeur d'eau :

$$P_g = P_a + P_v \quad \text{I. 3}$$

I.4.3. Teneur en eau

L'humidité peut se présenter dans les pores d'un milieu poreux sous forme solide, liquide ou vapeur. La teneur en eau désigne la quantité d'eau contenue dans un matériau donné. Elle est définie comme étant le rapport de poids d'eau au poids du matériau sec. On distingue :

- La teneur en eau massique ω_l [kg/kg] : elle représente le rapport de la masse d'eau contenue dans le matériau m_l sur la masse du matériau sec m_s :

$$\omega_l = \frac{m_l}{m_s} \quad \text{I. 4}$$

- La teneur en eau massique par unité volumique $u_l [Kg/m^3]$: elle est donnée par le rapport entre m_l et le volume apparent du matériau sec V_s :

$$u_l = \frac{m_l}{V_s} \quad \text{I. 5}$$

Il existe une relation entre la teneur en eau massique et la teneur en eau en massique par unité volumique :

$$u_l = \rho_s \omega_l \quad \text{I. 6}$$

- La teneur en eau volumique $\theta_l [m^3/m^3]$: elle est définie par le rapport du volume d'eau liquide V_l sur le volume apparent du matériau sec V_t :

$$\theta_l = \frac{V_l}{V_s} \quad \text{I. 7}$$

La teneur en eau volumique peut être déterminée à partir de la teneur en eau massique à l'aide de la formule suivante :

$$\theta_l = \frac{\rho_s}{\rho_l} \omega_l \quad \text{I. 8}$$

I.4.4. Porosité :

La porosité est la grandeur la plus utilisée pour la caractérisation d'un milieu poreux. C'est un paramètre principal décrivant la géométrie interne du matériau, qui n'est pas toujours très simple à obtenir avec précision. Elle varie entre 0 (solide plein) et 1 (volume complètement vide). On distingue deux types de porosité :

Porosité totale : elle est définie par le rapport entre le volume occupé par les pores (on tient compte des pores fermés) et le volume total du milieu.

$$\varepsilon = \frac{\text{volume apparent} - \text{volume solide}}{\text{volume apparent}} = \frac{V_g + V_l}{V} = \frac{V - V_s}{V} \quad \text{I. 9}$$

Porosité ouverte : Étant donné que les pores fermés n'interviennent pas dans l'écoulement des fluides (gaz et liquides), la notion de porosité ouverte est introduite. Elle est définie comme étant le rapport entre le volume des pores accessibles et le volume total.

$$\varepsilon = \frac{\text{volume des pores accessibles}}{\text{volume apparent}} \quad \text{I. 10}$$

En général, les matériaux de construction présentent une large répartition de la taille des pores pouvant aller des macropores aux micropores. De plus les propriétés d'un matériau poreux dépendent à la fois de la géométrie et la taille de ses pores ainsi que leur distribution.

I.4.5. Surface spécifique

La surface spécifique (exprimée en m^2/g) est l'aire de la surface délimitant l'interface pore/matrice contenue dans un volume du matériau. Elle peut être définie comme la surface accessible aux molécules par unité de masse du matériau. Cette propriété est donc liée à la structure poreuse du milieu. Une valeur élevée de la surface spécifique conduit à une capacité d'adsorption particulièrement importante du matériau.

I.4.6. Tortuosité

Les phénomènes de transferts dans les milieux poreux dépendent d'un certain nombre de propriétés telles que la tortuosité. La tortuosité est un concept physique qui traduit le caractère sinueux du chemin qu'emprunte une particule fluide pour traverser le milieu poreux (figure I. 5). Elle peut être définie comme étant le rapport de la longueur effective de la trajectoire moyenne du fluide (L_e) à la longueur apparente du milieu poreux (L) [20, 21] :

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad \text{I. 11}$$

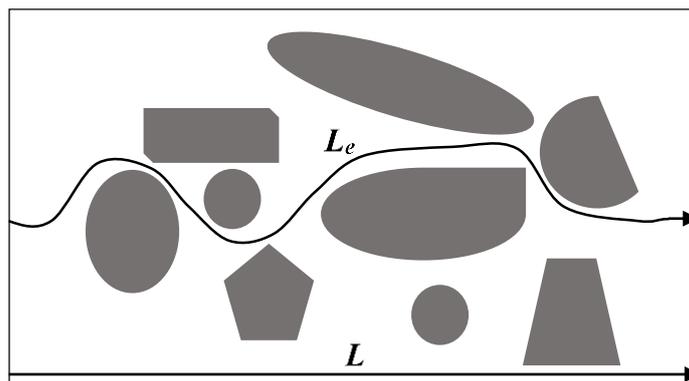


Figure I. 5 : Définition des paramètres géométriques de la tortuosité et de l'orientation d'un pore

Plusieurs approches expérimentales, empiriques et théoriques ont été élaborées pour essayer de déterminer la tortuosité. On peut citer, entre autre, les travaux de Mauret et Renaud [22] et Barrande *et al.* [23] qui ont développé l'expression suivante basée sur des mesures :

$$\tau = 1 - 0.49 \ln \varepsilon \quad \text{I. 12}$$

Une autre relation empirique connue est celle de Bruggeman [24] qui exprime la tortuosité en fonction de la porosité qui est un paramètre déterminé expérimentalement :

$$\tau = \varepsilon^{0.5} \quad \text{I. 13}$$

La tortuosité est une propriété de la microstructure, elle permet de rendre compte de la complexité du chemin parcouru par le fluide dans le milieu poreux. Plus le milieu poreux présente une complexité géométrique de la microstructure, plus sa tortuosité est importante.

I.4.7. Loi de Laplace, loi de Kelvin

À l'échelle microscopique, l'interface entre l'eau liquide (fluide mouillant) et la vapeur d'eau (fluide non mouillant) est soumise au phénomène de tension superficielle. Ces forces de tension superficielle surgissent en raison de l'énergie requise pour former une interface. Cette interface liquide-gaz forme avec la surface de la matrice solide un angle appelé angle de mouillage θ aigu du côté de fluide mouillant (figure I. 6). Si $\theta = 0$, le mouillage est total. Si $0 < \theta < 90$, le mouillage est dit partiel. Et si $\theta > 90$, le fluide est non-mouillant et cherche à minimiser sa surface de contact avec le solide.

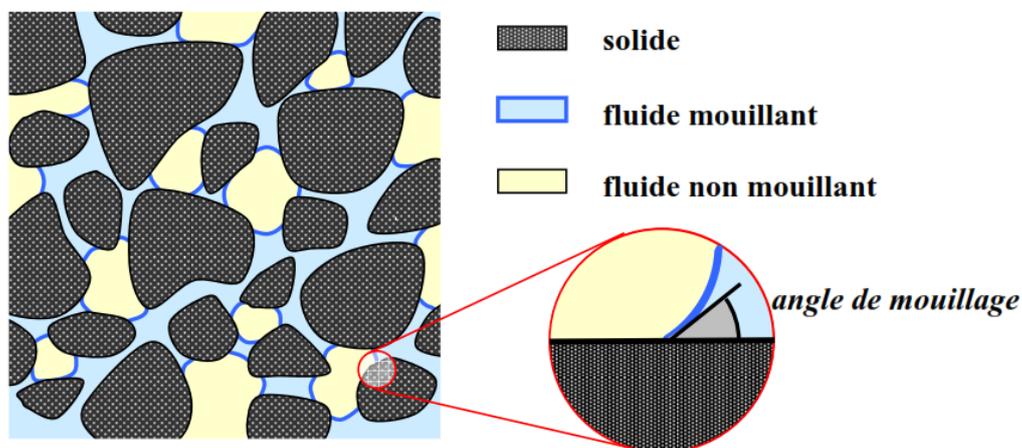


Figure I. 6 : Occupation diphasique de l'espace poreux [25]

La courbure de l'interface entre les deux fluides non miscibles donne lieu à des différences de pression entre les deux côtés de l'interface. Cette dernière se comporte comme une membrane sous tension. L'équilibre au niveau de l'interface liquide-gaz est exprimé par la loi de Laplace où la pression capillaire représente la différence entre la pression de l'air P_a et celle du liquide P_l :

$$P_c = P_a - P_l = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_k} \quad \text{I. 14}$$

Avec : P_c [Pa] : pression capillaire, P_l [Pa] : pression du liquide, P_a [Pa] pression de l'air, σ [N/m] : tension superficielle de l'interface (dans le cas de l'eau, elle vaut 0.0723N/m), θ [rad] : angle du mouillage et r_k [m] : rayon de courbure de ménisque.

Cette relation implique, qu'au niveau du ménisque, la pression d'eau est inférieure à la pression d'air et ce d'autant plus que r est petit. La relation entre l'humidité ambiante et la pression capillaire (suction) est définie par une des relations fondamentales de la thermodynamique telle que la loi de Kelvin, donnée par l'expression suivante :

$$P_c = \frac{RT\rho_l}{M} \ln(HR) \quad \text{I. 15}$$

HR : l'humidité relative, R [J/(mol. K)] : Constante des gaz parfait ($R = 8.31443$ J/(mol. K)), M [kg/mol] : Masse molaire de l'eau, ρ_l [kg/m³] : Masse volumique de l'eau et T [K] : Température.

I.5. Mode de fixation de l'humidité

Une augmentation de l'humidité de l'air au voisinage du matériau entraîne une augmentation de la teneur en eau du matériau. C'est ce qu'on appelle phénomène d'adsorption. Ce dernier est le résultat des forces d'attraction entre les molécules d'un fluide et les atomes ou les ions de la matrice solide d'un matériau [26]. Si l'on admet qu'il n'y a pas de réaction chimique entre le matériau solide constituant la structure poreuse et l'eau (vapeur ou liquide) avec laquelle cette structure est mise en contact, les mécanismes de fixation de l'humidité peuvent se faire en trois étapes et sont représentées dans la figure I. 7 :

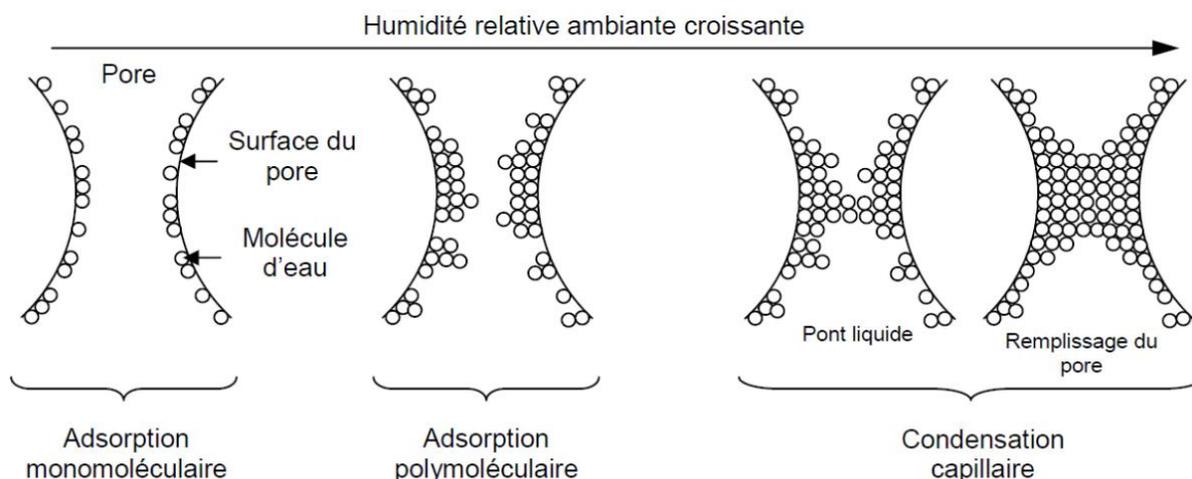


Figure I. 7 : Représentation schématique d'adsorption physique d'eau dans un pore [27]

- **L'adsorption mono-moléculaire** : caractérisée par la fixation d'une couche de molécules d'eau sur la surface des pores. Ce phénomène est dû aux forces intermoléculaires de Van der Waals agissant sur les molécules de vapeur. La phase liquide est alors discontinue tandis que la phase gazeuse est continue.
- **L'adsorption pluri-moléculaire (multicouche)** : caractérisée par la fixation d'une ou plusieurs couches de molécules d'eau sur la première couche adsorbée.
- **La condensation capillaire** : lorsque l'humidité relative devient très importante et si le diamètre des pores est suffisamment petit, les couches pluri-moléculaires se rejoignent et forment un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque. Il y a lieu de noter que plus le diamètre des pores est petit plus la condensation capillaire a lieu à une humidité relative faible.

I.6. Différents états d'équilibre de l'eau au sein d'un matériau poreux

Dans les matériaux poreux de construction, l'eau peut se trouver sous trois différents états :

- **Eau chimiquement liée** : elle fait partie de la structure des composants avec lesquels elle forme des liaisons chimiques par des forces significativement très importantes. Cette eau n'est évaporable que pour des températures très élevées.
- **L'eau physiquement liée** : c'est l'eau adsorbée sur la surface solide des pores sous l'influence des forces physiques de Van der Waals. Les molécules d'eau sont physiquement liées et adsorbées à la surface solide des pores d'un milieu poreux, sous

l'action des forces d'attraction, et elles peuvent former plusieurs couches superposées jusqu'à la condensation.

- **L'eau capillaire** : elle représente l'eau libre remplissant l'espace poral. Lors de la condensation capillaire, elle est liée au solide par les forces de tension superficielles et elle obéit aux lois de la capillarité.

I.7. Isothermes de sorption :

La quantité de gaz adsorbée par unité de masse du solide dépend de la pression, de la température et de la nature du gaz et du solide. De plus, la teneur en humidité du matériau permet d'évaluer la capacité du matériau à stocker de l'eau. Cette capacité de stockage est représentée par les isothermes de sorption.

Pour caractériser un matériau poreux en termes de transferts hygrothermiques, on s'intéresse généralement à l'isotherme d'adsorption et de désorption d'eau. Dans le cas des transferts hygrothermiques, les isothermes de sorption représentent les courbes donnant les valeurs, à l'équilibre thermodynamique, de la teneur en eau du matériau en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant pour une température fixée.

La forme des isothermes d'adsorption et de désorption est donnée par la figure I. 8. Cette courbe décrit les états d'équilibre successifs du matériau avec le milieu ambiant, dans des conditions de température uniforme, la courbe d'isotherme d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau constitue une carte d'identité hydrique du matériau [28].

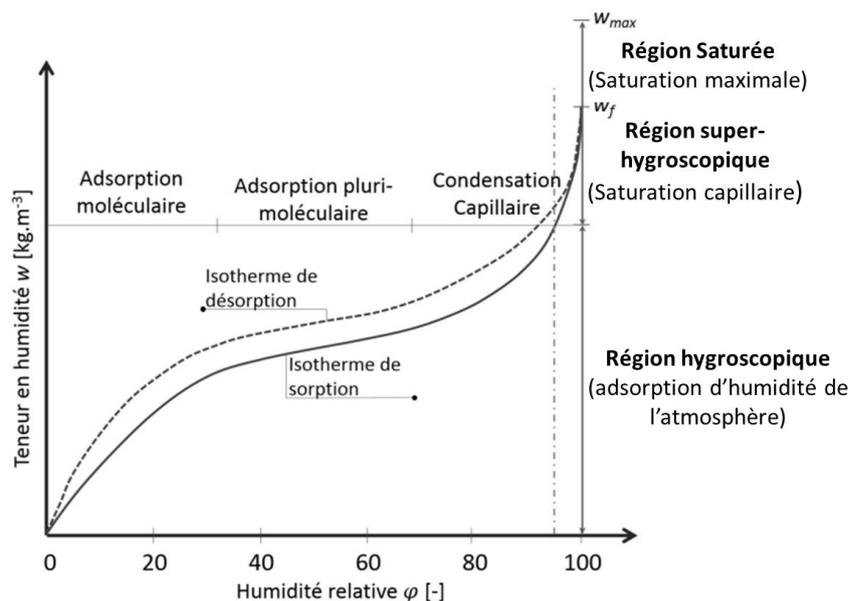


Figure I. 8 : Diagramme schématique d'une courbe d'isotherme d'adsorption et désorption (adoptée de K. AZOS DIAZ 20016 [29])

Les isothermes de sorption des matériaux poreux de construction peuvent être divisées en trois régions distinguées qui traduisent le comportement du matériau à l'échelle microscopique :

- **Région hygroscopique (ou de sorption) :** Elle s'étend du matériau sec jusqu'à une valeur de l'humidité relative d'environ 85 %, et prend en compte toutes les teneurs en eau résultant de la sorption d'humidité et de la condensation capillaire jusqu'à l'établissement d'un état d'équilibre. Cette région est caractérisée par les forces de Van der Waals, lesquelles font que les molécules d'eau constituent une monocouche en état rigide jusqu'à couvrir la surface des pores.
- **Région super-hygroscopique :** Elle suit la région de sorption et s'étend jusqu'à la saturation libre de l'eau. Dans cette région l'eau occupe la majorité de l'espace poral, laissant des poches dans lesquelles la vapeur circule.
- **Région saturée :** si le matériau reste en contact continu avec l'eau liquide, ou la pression sur ses faces est artificiellement augmentée (cette région n'est pas atteinte dans des conditions normales de succion.), les petites poches d'air résiduelles sont dissoutes, jusqu'à atteindre la saturation maximale. Le transfert d'air n'est plus possible à travers ce matériau.

Les isothermes de sorption peuvent être classées en six types (figure I. 9) selon l'allure de la courbe représentant ce phénomène :

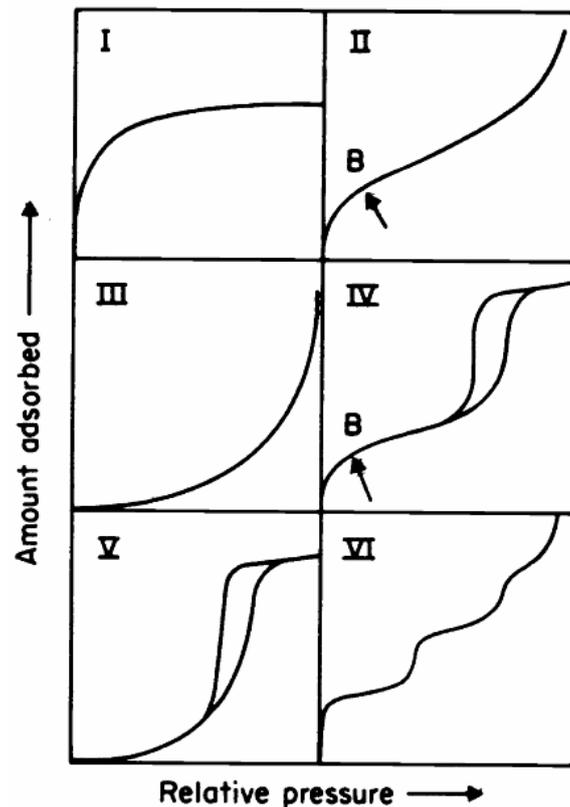


Figure I. 9 : Classification des isothermes d'adsorption physique donnée par l'IUPAC [30]

- Les isothermes de type I sont généralement caractérisées par une horizontale traduisant une saturation du matériau, malgré l'augmentation de la pression. Ce type d'isotherme est obtenu pour des matériaux poreux ayant uniquement des micropores qui se remplissent à des pressions d'autant plus basses que leur largeur est plus faible.
- Les isothermes de type II et III sont caractérisées par une augmentation très progressive de l'adsorption en fonction de la pression relative d'équilibre. Elles sont obtenues pour des matériaux avec une distribution large de leurs tailles de pores, il s'agit des matériaux non poreux et macroporeux. Ce type d'isotherme est caractéristique d'une adsorption multimoléculaire.
- Les isothermes de type IV et V ont la même allure que les isothermes de type II et III, respectivement, pour des pressions relatives les plus basses. De plus, pour les pressions relatives les plus élevées, elle est caractérisée par un palier de saturation dont la longueur est très variable. Ces types d'isothermes sont obtenus avec des adsorbants mésoporeux dans lesquels se produit une condensation capillaire. Dans ce cas, nous observons généralement une hystérésis de la désorption par rapport à l'adsorption

- Les isothermes de type VI correspondent à une adsorption multicouche caractéristique d'un matériau non poreux et très homogène, et les couches adsorbées se forment l'une après l'autre.

Un écart entre l'adsorption et la désorption est observé dans la figure I. 8, il est attribué au phénomène d'hystérésis dû au changement physique du matériau causé par le départ de l'eau. En effet la teneur en eau mesurée en désorption pour une humidité relative donnée est supérieure à celle observée en adsorption. Ce phénomène d'hystérésis est attribué à l'angle de contact [31] présenté dans la figure I. 6, en effet la courbure d'une interface empêche davantage l'évaporation d'un liquide qu'une surface plane [32]. De plus l'angle de contact change de quelques degrés [33] et devient plus grand en adsorption qu'en désorption [34].

La non uniformité géométrique des pores [35] conduit à l'effet de bouteille d'encre qui est une des raisons principales de l'hystérésis. Cet effet est d'autant plus important que la variation de section dans le pore est grande [32].

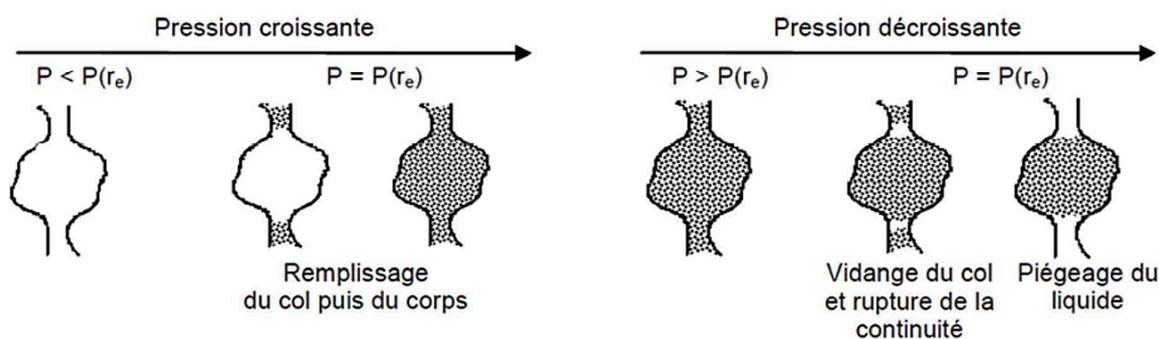


Figure I. 10 : Effet bouteille d'encre [27]

La figure I. 10 illustre l'effet de bouteille d'encre au niveau d'un pore, lorsque la pression augmente, les molécules d'eau sont fixées sur la matrice solide, et le pore en forme de bouteille d'encre se remplit de manière progressive. Le remplissage de la totalité du pore ne se fait que lorsque la pression (P_e) atteint la valeur nécessaire pour remplir le col du rayon d'entrée. Durant le séchage, aucune humidité ne peut être transportée à l'extérieur du pore jusqu'à ce que la pression atteigne de nouveau cette valeur (P_e), le ménisque qui remplit le col d'accès, et qui bloque l'humidité à l'intérieur du pore subit soudainement des pertes, et se vidange, la continuité du liquide se rompt [36] et une certaine quantité d'eau reste piégée dans le pore.

Le phénomène d'hystérésis et sa forme dans la courbe d'isotherme diffère selon la structure poreuse du matériau (figure I. 11), les différentes formes de la boucle d'hystérésis ont été classées de la manière suivante :

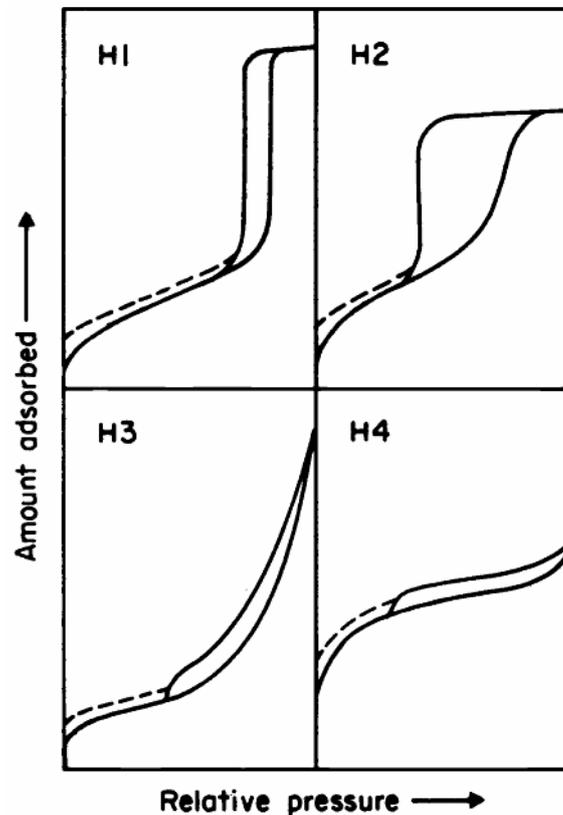


Figure I. 11 : Classification par l'IUPAC des différentes boucles d'hystérésis observées [30]

- La boucle d'hystérésis H1 est observée dans le cas des matériaux ayant une distribution très étroite de mésopores.
- La boucle d'hystérésis H2 correspond à un adsorbant ayant des mésopores en intercommunication.
- La boucle d'hystérésis H3 est observée pour un matériau formé d'agrégats, avec une adsorption sous forme de condensation capillaire s'effectuant dans une texture non rigide, et qui n'est pas caractéristique d'une mésoporosité définie.
- La boucle d'hystérésis H4 est observée avec des matériaux microporeux ayant des feuillets liés entre eux de façon plus ou moins rigide et entre lesquels peut se produire une condensation capillaire [37].

I.8. Détermination expérimentale des isothermes de sorption

L'isotherme d'adsorption et de désorption permet de connaître la capacité du matériau à capter ou à retenir l'eau selon l'humidité relative du milieu extérieur. La détermination expérimentale de cette courbe est indispensable pour la prédiction du comportement hydrique des matériaux poreux de construction.

Les isothermes d'adsorption et de désorption sont mesurées classiquement à partir de la technique des solutions salines saturées, appelée aussi méthode aux dessiccateurs [38]. L'essai est réalisé dans une enceinte fermée et maintenue à une température fixe, il consiste à balayer plusieurs paliers d'humidité relative. Pour chaque palier d'humidité relative, les échantillons sont pesés régulièrement jusqu'à atteindre l'équilibre. L'humidité relative est régulée à l'aide des solutions salines saturées. En effet, une solution sursaturée en sel au sein d'un système fermé influence l'humidité relative du volume d'air considéré.

La norme ISO 12571 [38] spécifie une autre méthode pour déterminer les propriétés de sorption des matériaux poreux de construction, il s'agit de la méthode en chambre climatique. L'humidité relative et la température peuvent être régulées automatiquement par une chambre climatique. La durée de l'essai dépend principalement de la nature du matériau, et de la taille de l'échantillon à analyser.

Cette méthode classique d'évaluation des isothermes d'adsorption et de désorption est généralement critiquée en raison de sa lenteur [39]. Pour cela, plusieurs dispositifs de mesure d'isothermes d'adsorption et de désorption permettent de réduire considérablement le temps de mesure. Le principe de fonctionnement de ces dispositifs expérimentaux est basé principalement sur deux méthodes : gravimétrique et volumétrique.

I.8.1. Méthode Gravimétrique

Cette méthode est appelée aussi méthode dynamique, elle est basée sur le suivi permanent de la masse de l'échantillon jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint selon les critères fixés, à une température donnée. En outre, la technique nous permet d'accéder à la teneur en eau du matériau à partir de la masse sèche de l'échantillon pour chaque palier d'humidité relative, afin de tracer la totalité de la courbe d'isotherme de sorption. Parmi les dispositifs utilisant la méthode gravimétrique, nous pouvons citer DVS (Dynamic Vapor Sorption) et le VSA (Vapor Sorption Analyzer).

I.8.1.1. DVS (Dynamic Vapor Sorption)

La méthode dynamique DVS est utilisée pour la détermination des isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau. L'échantillon à analyser est de faible masse, par conséquent la masse adsorbée est encore plus faible. De plus l'échantillon est soumis à de la convection forcée, ce qui permet de réduire le temps de l'essai et d'accélérer la mesure.



Figure I. 12 : Dispositif gravimétrique de mesure des isothermes de sorption à droite VSA, et à gauche : DVS

Le DVS (figure I. 12) est principalement constitué d'une nacelle calibrée qui porte l'échantillon de quelques grammes. La nacelle est reliée à une microbalance de précision au $\pm 0.1 \mu g$ placée dans une enceinte régulée thermiquement. 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.

I.8.1.2. VSA (Vapor Sorption Analyzer)

Le VSA est un autre dispositif basé sur les méthodes gravimétriques comme le DVS. Il permet de mesurer les isothermes d'adsorption et désorption dynamique de la vapeur d'eau des échantillons de taille plus importante par rapport au DVS (un cylindre de 40 mm de diamètre et 6 mm d'épaisseur). Néanmoins, sa balance est moins sensible $\pm 0.1 mg$

I.8.2. Méthode volumétrique

Les méthodes volumétriques sont basées sur la mesure du volume de vapeur d'eau adsorbé ou désorbé par un matériau. Le Belsorp Aqua 3 décrit dans la figure I. 13 est un dispositif de mesure automatique de la variation du volume de la vapeur d'adsorption/désorption à une température donnée. Le processus de mesure consiste à la mesure du volume mort de gaz dans le système de mesure par injection de l'Hélium à pression atmosphérique. Puis, la quantité adsorbée est calculée à partir de la variation de pression de gaz.



Figure I. 13 : Dispositif volumétrique de mesure des isothermes de sorption : Belsorp-aqua3

I.8.3. Comparaison entre les différentes méthodes

Plusieurs travaux de littérature ont été consacrés à des études comparatives entre les différents dispositifs d'évaluation des isothermes d'adsorption et de désorption de plusieurs matériaux poreux de construction. Parmi eux on peut citer les travaux de Abahri [40] consacrés à deux matériaux biosourcés : isolant de fibre en bois et OSB (figure I. 14). Les mesures sont basées sur la méthode gravimétrique en utilisant les deux dispositifs : Le DVS (Dynamic Vapor Sorption) et le VSA (Vapor Sorption Analyzer), et la méthode volumétrique au moyen du Belsorp Aqua 3. On retrouve également la comparaison réalisée dans les travaux de Ferroukhi [41] pour le bois aggloméré, et le parpaing (figure I. 15), où les dispositifs VSA et le BELSORP-aqua3 ont été utilisés pour les mesures des isothermes d'adsorption et de désorption.

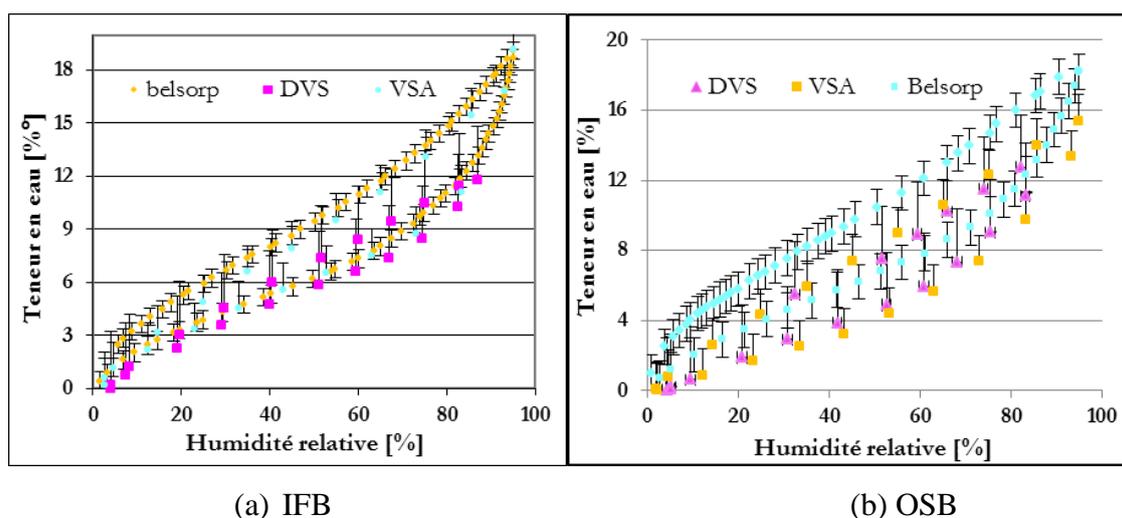


Figure I. 14 : Comparaison des isothermes de sorption à 20°C obtenues par différentes méthodes [40]

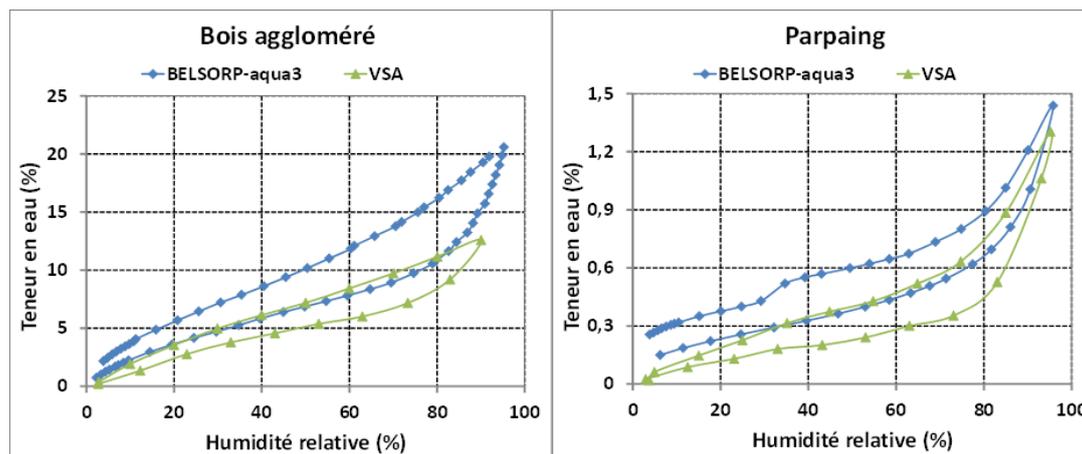


Figure I. 15 : Comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption obtenues par deux méthodes différentes : gravimétrique et volumétrique [41]

La comparaison entre les différentes méthodes met en évidence la limitation de la méthode gravimétrique DVS qui ne permet pas de mesurer les teneurs en eau pour des humidités relatives élevées (supérieures à 90%). De plus, il a été constaté que la détermination des isothermes est fortement dépendante du type de matériau, de la méthode expérimentale utilisée et particulièrement de l'estimation de l'équilibre thermodynamique pour chacun des points de la courbe, et enfin de la précision de la balance des méthodes gravimétriques

I.9. Théorie d'adsorption

L'adsorption physique d'un fluide est généralement représentée par les courbes d'isothermes de sorption, représentant la quantité adsorbée à l'équilibre, en fonction de la pression de vapeur, à une température constante. Il existe de nombreuses théories d'adsorption qui expliquent et quantifient l'allure de ces isothermes de sorption.

I.9.1. Théorie de Langmuir

C'est à Langmuir qu'il faut attribuer le concept de la couche monomoléculaire [42] qu'il élaborait à partir de l'adsorption chimique. La théorie de Langmuir est la base de la théorie de Brunauer, Emmett et Teller.

Le modèle de Langmuir est basé sur l'hypothèse d'une surface d'adsorbant uniforme et d'une adsorption localisée avec une seule molécule par site, et les interactions entre les molécules sont considérées négligées. L'équation relative à l'isotherme de Langmuir qui relie le nombre de moles adsorbées en fonction de la pression relative de l'adsorbable est donnée par :

$$U = \frac{mC\varphi}{(1 + C\varphi)} \quad \text{I. 16}$$

Où : U : est la teneur en eau massique adsorbée, m : teneur en eau mono-moléculaire qui correspond.

Pour une humidité relative maximale ($\varphi = 1$), la quantité maximale adsorbée est donnée par :

$$U = \frac{mC}{(1 + C)} < m \quad \text{I. 17}$$

Cette théorie est donc nettement insuffisante [28], puisqu'elle ne prévoit au maximum qu'une seule couche moléculaire adsorbée.

I.9.2. Modèle BET : adsorption multimoléculaire

Le modèle BET est développé par Brunauer, Emmett et Teller (Brunauer, Emmett et Teller E, 1938) [43], et constitue une généralisation multimoléculaire de la loi de Langmuir. Il considère que la surface de pores est recouverte de couches moléculaires superposées. Ce modèle est exprimé par l'équation suivante :

$$U = \frac{mC\varphi}{(1 - \varphi)(1 - \varphi + C\varphi)} \quad \text{I. 18}$$

Ce modèle est actuellement le plus largement utilisé [28], mais il est critiquable parce qu'il néglige les effets d'interaction entre molécules adsorbées, et il suppose aussi que seule la première couche subit l'effet de surface. Les autres couches énergétiquement équivalentes à un liquide ordinaire.

I.9.3. Modèle GAB

Le modèle GAB est développé par Guggenheim, Anderson et de Boer, et constitue une extension de la théorie BET. Ce modèle tient compte d'une chaleur d'adsorption pour toutes les couches moléculaires en introduisant un facteur correcteur K . L'équation du modèle GAB est donnée par :

$$U = \frac{mCK\varphi}{(1 - \varphi)(1 - K\varphi + CK\varphi)} \quad \text{I. 19}$$

Ce modèle permet une modélisation des isothermes de sorption jusqu'à 90% d'humidité relative.

I.9.4. Modèle GDW

Le modèle GDW (Generalised D'Arcy and Watt) est également basé sur la théorie de Langmuir, Il suppose l'existence d'un site primaire sur la surface solide. Les molécules d'eau peuvent être à nouveau des sites d'adsorption secondaire pour les prochaines molécules [44], de plus le modèle prend en compte la possibilité qu'une molécule d'eau attachée à un site principal peut créer plus d'un site d'adsorption secondaire.

$$U = \frac{m \cdot K \cdot \varphi}{1 + K \cdot \varphi} \frac{1 - k(1 - \omega) \cdot \varphi}{1 + K \cdot \varphi} \quad \text{I. 20}$$

Où :

ω : est la proportion de molécules adsorbées sur les sites primaires qui deviennent des sites secondaires d'adsorption.

I.10. Détermination de la surface spécifique BET :

La surface spécifique S_{BET} est définie comme l'aire d'interface par gramme du solide, elle représente la surface des grains ainsi que la surface internes des pores. C'est une donnée essentielle pour la caractérisation des matériaux poreux de construction.

La surface spécifique consiste à la mesure de la quantité de sites qui sont accessibles à des molécules traversant les pores en se basant sur la théorie BET (Brunauer, Emmett et Teller), cette dernière est basée sur le recouvrement de la surface solide du matériau (figure I. 16), par une couche de molécules adsorbées [45].

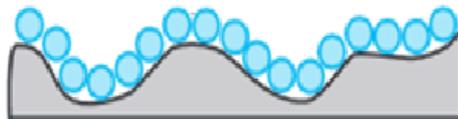


Figure I. 16 : Couche de molécule adsorbées [26]

La surface spécifique est mesurée par l'exploitation des isothermes d'adsorption et de désorption de l'azote (N_2) à 77K déterminée expérimentalement, Cette courbe représente le volume du gaz adsorbé en fonction de la pression relative P/P_0 . La détermination de la surface spécifique s'appuie sur la théorie de BET présentée dans la partie précédente du chapitre (section I.9.2). L'adsorption physique de l'azote (N_2) est donnée par l'équation de Brunauer, Emmett et Teller suivante :

$$n_a = \frac{n_m C \frac{P}{P_0}}{\left(1 - \frac{P}{P_0}\right) \left(1 - \frac{P}{P_0} + C \frac{P}{P_0}\right)} \quad \text{I. 21}$$

Où : n_a [mol/g] est la quantité adsorbée par un gramme de solide, n_m [mol/g] : est la quantité adsorbée à la monocouche pour un gramme d'adsorbant, P [Pa] : est la pression d'équilibre, P_0 [Pa] : est la pression de vapeur saturante, C : est la constante BET caractéristique de l'énergie d'adsorption telle que :

$$C = \exp\left(\frac{E_a - E_l}{RT}\right) \quad \text{I. 22}$$

Avec :

E_a : représente l'énergie d'adsorption en première couche, et E_l : l'énergie de liquéfaction de l'adsorbable.

L'équation dite transformée BET s'écrit sous sa forme linéaire dans le domaine de formation de la monocouche ($0.05 < \frac{P}{P_0} < 0.35$) comme suit :

$$\frac{\frac{P}{P_0}}{n_a \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C - 1}{n_m C} \frac{P}{P_0} \quad \text{I. 23}$$

Cette équation permet de relier la quantité d'azote adsorbée par gramme de solide à la pression d'équilibre relative.

En traçant la fonction $\frac{P}{P_0}/n_a \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)$ en fonction de $\frac{P}{P_0}$, on obtient une droite pour des pressions relatives comprises entre 0.05 et 0.35. L'exploitation de la pente de cette droite permet de déterminer les constantes C et n_m . La quantité déterminée permet ainsi de calculer la surface spécifique BET :

$$S_{BET} = \frac{A}{m_s} = \left(\frac{n_m}{m_s}\right) \sigma N_a \quad \text{I. 24}$$

Avec :

$N_a [mol^{-1}]$: est le nombre d'Avogadro ($N_a = 6.022 \cdot 10^{23}$), $n_m [mol/g]$: est le volume de la monocouche, et enfin $\sigma [nm^2]$: est l'aire occupé par une molécule d'adsorbant, dans le cas de l'azote adsorbé à 77K, la valeur de σ recommandée par l'IUPAC est de $0.162 nm^2$.

Pour l'azote, l'équation I. 24 devient alors :

$$S_{BET} = 9.76 \cdot 10^4 \left(\frac{n_m}{m_s} \right) \quad \text{I. 25}$$

Le rayon de particule dans le cas de l'hypothèse de particules sphériques peut être aussi calculé en utilisant l'expression suivante :

$$r_{BET} = \frac{3}{S_{BET} \rho} \quad \text{I. 26}$$

Avec : $\rho [Kg/m^3]$: représente la masse volumique réelle du matériau étudié.

I.11. Mécanismes de transfert d'humidité

Le transport d'humidité dans les matériaux poreux de construction résulte d'une composition de différents phénomènes à l'origine du mouvement de chacune des phases liquide et vapeur.

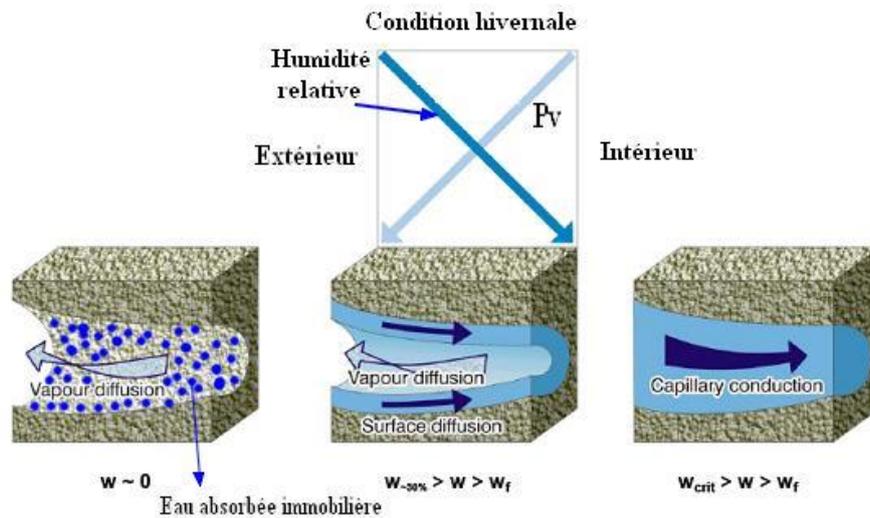


Figure I. 17 : Le transfert d'humidité en phase vapeur et liquide pour les conditions hivernales [46]

La figure I. 17 montre un exemple à l'échelle macroscopique de l'interaction entre la diffusion de vapeur et le transfert liquide à travers une paroi de l'enveloppe du bâtiment. Pour des

conditions hivernales, la température intérieure (donc aussi la pression de vapeur) est plus élevée que celle de l'extérieur, donc la diffusion de vapeur se manifeste du chaud vers le froid (des endroits à pression élevée vers les endroits à faible pression), contrairement au transport par capillarité qui se fait de l'extérieur vers l'intérieur du fait que la face extérieure est exposée à une forte humidité relative. Quant à l'eau absorbée par les parois, elle reste immobile en raison des forces d'adhérence élevée, formant ainsi un film d'eau qui sera plus épais sur la face extérieure où l'humidité relative est plus importante, le film devient mobile et l'eau migre vers les endroits où le film est plus fin, ce processus est appelé diffusion de surface.

La quantité d'eau fixée par le matériau dépend principalement des propriétés du matériau (porosité, morphologie microstructurale, état de surface des pores, surface spécifique, ...), des ambiances environnantes et des conditions climatiques dans lesquelles il est placé (pression et température), et enfin de la nature de la phase dans laquelle le transfert se manifeste (liquide ou vapeur). Les phénomènes physiques de transferts d'humidité résultent du transport simultané des phases liquide et gazeuse présentes dans le milieu poreux [47].

I.11.1. Transfert en phase vapeur

Le transfert de la vapeur d'eau dans un milieu se fait sous l'effet d'un gradient de concentration ou d'un gradient de pression partielle de la vapeur.

Le flux de vapeur s'écrit :

$$q_v = -D_v \cdot \nabla \rho_v \quad \text{I. 27}$$

La vapeur d'eau est considérée comme un gaz parfait alors :

$$P_v = \frac{\rho_v}{M_v} RT \quad \text{I. 28}$$

La loi de Fick en fonction de la pression est donnée alors par la formule :

$$q_v = -D_v \frac{M_v}{RT} \nabla P_v \quad \text{I. 29}$$

Le coefficient de diffusion de vapeur dans un milieu poreux dépend de la diffusion de vapeur dans l'air libre (D_0) et du nombre de Knudsen :

$$D_v = \frac{D_a}{1 + K_n} \quad \text{I. 30}$$

Avec :

$$K_n = \frac{\text{libre parcours moyen}}{\text{diamètre des pores}} = \frac{L_{pm}}{2r_p} \quad \text{I. 31}$$

À l'air libre le coefficient de diffusion proposé par De Vries [48] suit l'équation suivante :

$$D_a = c \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad \text{I. 32}$$

Pour un état de référence ($T_0 = 273.15 \text{ K}$; $P_0 = 101225 \text{ Pa}$) : $c=2,17 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $n=1.88$

À partir du nombre de Knudsen, on distingue deux mécanismes de transfert d'humidité en phase vapeur par diffusion :

- Si le matériau offre des pores de rayon inférieur au libre parcours moyen ($r < L_{pm}$), les molécules d'eau entrent en collision avec la paroi de la matrice solide, le transfert se fait par diffusion de Knudsen (effusion). Dans ce cas la valeur de K_n est supérieure ou égale à 1.
- Dans le cas contraire ou la taille des pores est supérieure au libre parcours moyen ($r > L_{pm}$), les collisions entre parois sont négligeables comparées aux collisions entre les molécules, le transport se fait par diffusion moléculaire. Dans ce cas la valeur de K_n est inférieure à 1.

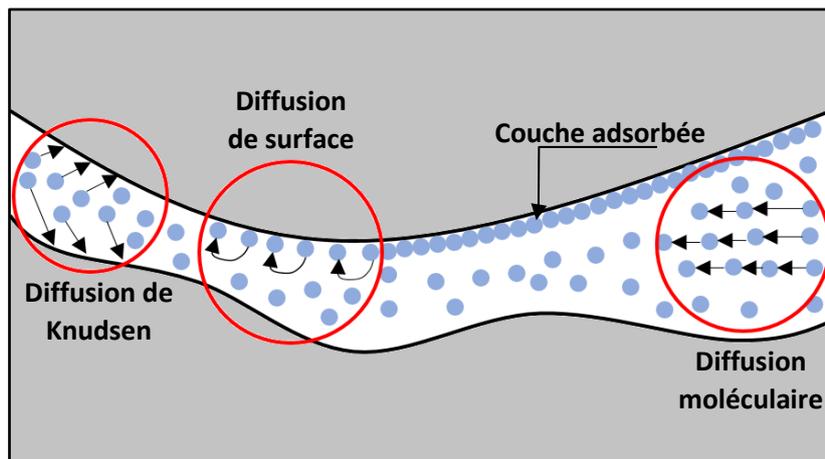


Figure I. 18 : Représentation des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore

En effectuant un changement de variable, l'équation I. 29 peut être écrite sous la forme suivante :

$$q_v = -D_v \frac{M_v}{RT} \nabla(\text{HR} \cdot P_{sat}) \quad \text{I. 33}$$

La relation I. 33 montre la double dépendance de transport diffusif à l'humidité relative et à la température par l'intermédiaire de la pression de vapeur saturante. En effet le déplacement de la vapeur est dû à deux modes de transport :

- Le transport provoqué par la diffusion moléculaire ou l'effusion comme définit précédemment (équation I. 29).
- Le transport provoqué par la thermodiffusion (effet de Soret). Ce phénomène apparaît lorsqu'un mélange est soumis à une différence de température donnant naissance à un gradient de concentration.

$$q_{v,total} = q_{fick} + q_{Soret} \quad \text{I. 34}$$

Le premier terme correspond usuellement au terme de transport Fickien (équation I. 29), et le deuxième terme correspond à la contribution liée à la thermodiffusion qui peut s'écrire ainsi :

$$q_{Soret} = -\alpha_{soret} \nabla T = -D_{v,T} \nabla T \quad \text{I. 35}$$

α_{soret} : représente le coefficient de soret ou coefficient de diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de température.

Le phénomène de thermodiffusion peut jouer un rôle important dans la caractérisation des transferts hygrothermiques. En effet, le gradient de température contribue au flux massique, et cette contribution peut être importante dans certaine configuration, D'après les travaux de Peuhkuri [49] la contribution du flux massique dû au gradient thermique peut dépasser 30% du flux massique total. Et dans les travaux de Trabelsi et al. [50], il a été constaté que la non prise en compte de l'effet de Soret conduit à des erreurs significatives, et que le gradient de température accélère le transfert de masse en particulier lorsque le gradient de l'humidité relative est faible.

I.11.2. Diffusion de surface

Ce phénomène se produit principalement lorsque les molécules d'eau sont fixées par les parois des pores pour des faibles humidités relatives, et lorsque le gradient de concentration des molécules dans les pores augmente. Les molécules d'eau se mettent à se déplacer sur les parois des pores. Donc, il s'agit du mouvement des molécules de vapeur d'eau adsorbées et fixées au niveau de la surface des pores des matériaux poreux.

La migration d'eau liquide s'effectue des zones à forte humidité relative vers les zones à faible humidité relative, En général les phénomènes de diffusion de vapeur et de diffusion de surface sont de sens opposés. La densité de flux de la vapeur d'eau j_{sv} [$Kg/m^2.s$] peut s'exprimer en fonction de la concentration de la phase adsorbée C_μ :

$$j_{sv} = -D_s \nabla C_\mu \quad \text{I. 36}$$

Où D_s (m^2/s) est le coefficient de diffusion au niveau de la surface. En supposant l'existence d'un équilibre local entre la phase adsorbée et la phase libre, la concentration de la phase adsorbée C_μ peut s'écrire en fonction de concentration de la phase gazeuse C : $C_\mu = f(C)$ alors l'équation I. 36 précédente devient :

$$j_{sv} = -D_s f'(C) \nabla C \quad \text{I. 37}$$

Avec f : est une fonction appelée isotherme d'adsorption.

I.11.3. Transfert en phase liquide

L'eau due à la condensation capillaire dans les pores se déplace sous l'effet d'un gradient de pression capillaire dans les matériaux poreux. Ce type de transfert capillaire se produit généralement pour des humidités relatives élevées, lorsque la phase liquide est continue, et les pores sont presque remplis d'eau liquide. La densité de flux liquide est décrite par la loi de Darcy qui est la transcription de la loi de Poiseuille à l'échelle d'un pore. Elle s'exprime comme suit :

$$q_l = -K_l \cdot \nabla P_c \quad \text{I. 38}$$

Avec :

$$P_c = P_a - P_l \quad \text{I. 39}$$

Où q_l [$kg/m^2.s$]: désigne la densité de flux liquide, K_l [m^2]: perméabilité apparente de l'eau liquide, P_c [Pa] : la pression capillaire, P_a [Pa] : pression de l'air ambiant supposée constante, P_l [Pa] : pression liquide.

I.11.4. Evaporation-condensation

Le phénomène d'évaporation-condensation se produit à l'interface liquide-gaz. Lorsqu'une particule d'eau liquide s'évapore de cette interface (interface B, figure I. 19) et se transforme en vapeur d'eau, elle se transporte donc par diffusion à travers le pore et se condense sur une

autre interface liquide-gaz (interface c). Ce processus est principalement dû au non équilibre entre la pression de vapeur (dans le segment BC) et la pression capillaire (Segments AB et CD) au voisinage des interfaces.

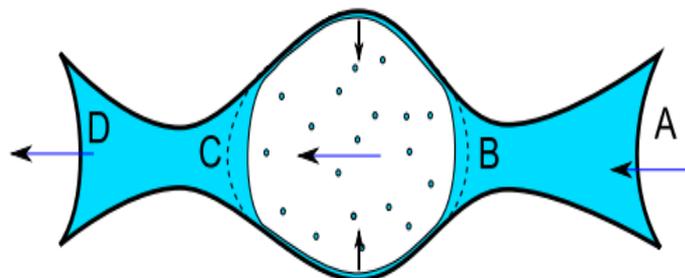


Figure I. 19 : Illustration de l'évaporation-condensation dans un pore [51]

I.12. Modèles de référence des transferts couplés de chaleur et d'humidité

De nombreux modèles ont été développés pour une meilleure description des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction. La différence entre ces différents modèles réside dans le choix des moteurs de transferts considérés ainsi que les hypothèses adoptées. Les modèles de Luikov [52] et de Philip et De Vries [48] sont les principaux modèles de référence existant, le modèle de Kunzel [53] peut aussi être cité, ce modèle est utilisé dans le logiciel WUFI de modélisation des transferts de chaleur et d'humidité. L'ensemble de ces modèles est basé sur les principes de conservation de masse et d'énergie

I.12.1. Modèle de Luikov (1964)

Luikov [52] a été l'un des premiers à proposer une théorie des transferts thermo-hydrrique dans les matériaux poreux de construction. Ce modèle met en évidence le phénomène de thermodiffusion, et considère que la diffusion de l'eau sous forme vapeur ou liquide dépend des gradients de teneur en eau massique, de la température et de la pression totale. Il propose toutefois de séparer les flux vapeur et liquide, car l'humidité peut se déplacer sous forme vapeur sous l'action d'un gradient de concentration en vapeur, et sous forme liquide par un gradient de capillarité, Il obtient ainsi :

$$\begin{cases} j_v = -D_v \rho_s \nabla u - D_{vT} \rho_s \nabla T \\ j_l = -D_l \rho_s \nabla u - D_{lT} \rho_s \nabla T \end{cases} \quad \text{I. 40}$$

Avec :

j_v [kg/m²s] Densité de flux massique de vapeur d'eau

j_l [kg/m²s] Densité de flux massique de l'eau liquide

D_v et D_l [m²/s] Coefficients de diffusion isotherme de l'eau liquide et de vapeur d'eau

D_{vT} et D_{lT} [m²/s] Coefficients de diffusion non isotherme de l'eau liquide et de vapeur d'eau

ρ_s [kg/m³] Masse volumique du matériau

u [kg/kg] Teneur en eau massique

T [K] Température

Ce modèle fait intervenir un paramètre supplémentaire, le taux de changement de phase \dot{m} définit par :

$$\dot{m} = \varepsilon \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{I. 41}$$

ε Représente le rapport entre le flux de vapeur d'eau et le flux massique total, Si $\varepsilon = 1$, le transfert d'humidité se manifeste sous forme de vapeur, et si $\varepsilon = 0$, il se déroule sous forme liquide.

Le système d'équations aux dérivées partielles du modèle de Luikov est ainsi donné par :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(D_m(\text{gradu} + \delta_s \text{grad}T)) \\ \rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(D_T \text{grad}T) + L_v \varepsilon \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad \text{I. 42}$$

L_v [J/kg] : Chaleur latente de vaporisation

$D_m = D_v + D_l$ [m²/s] : Coefficient de diffusion total

$\delta_s = (D_{vT} + D_{lT}) / (D_v + D_l)$ [-] : Coefficient de thermodiffusion.

C_p [J/kg.K] : la capacité thermique du matériau

La modèle de Luikov a prouvé son efficacité pour la modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction. Il a inspiré plusieurs

chercheurs comme Abahri et al [54] ou Qin et al [55] Ferroukhi [56]. Toutefois, l'inconvénient de ce modèle est que le paramètre ε n'est pas issu des essais expérimentaux et sa détermination empirique est délicate.

I.12.2. Modèle de Philip et De Vries (1957)

Philip & De Vries [48] ont développé une théorie visant à modéliser les transferts de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux, ils décrivent les flux de vapeur de forme diffusif et liquide comme étant une fonction de la teneur en eau volumique et de la température. Ils ont considéré le transport de vapeur comme un processus diffusionnel régi par la loi de Fick. Et à partir de la loi de Darcy, ils ont exprimé le flux en phase liquide :

$$\begin{cases} j_v = -\rho_l(D_{v\theta}\nabla\theta - D_{vT}\nabla T) \\ j_l = -\rho_l(D_{l\theta}\nabla\theta - D_{lT}\nabla T - K) \end{cases} \quad \text{I. 43}$$

Avec :

$D_{v\theta}$ et $D_{l\theta}$ [m^2/s] coefficient de diffusion isotherme de la vapeur d'eau et de l'eau liquide.

D_{vT} et D_{lT} [$m^2/s.K$] Coefficient de diffusion non-isotherme de la vapeur d'eau et de l'eau liquide.

K [m/s] : Conductivité hydraulique du matériau.

ρ_l [kg/m^3] : Masse volumique de l'eau.

θ [m^3/m^3] : Teneur en eau.

Le Modèle Philip et De Vries considère le transfert de chaleur que par conduction et changement de phase, Les équations différentielles générales décrivant les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux sont :

$$\begin{cases} \frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(D_\theta \nabla\theta) + \nabla(D_T \nabla T) + \nabla K \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + L_v \nabla(D_{v\theta} \nabla\theta) \end{cases} \quad \text{I. 44}$$

Avec :

D_θ [m^2/s] : Coefficient de diffusion d'humidité isotherme

$D_T [m^2/s.K]$: Coefficient de diffusion d'humidité non-isotherme.

$L_v [J/kg]$: chaleur latente de vaporisation

$C [J/kg.K]$: est la capacité thermique du matériau

$\lambda [W/m.K]$: est la conductivité thermique

I.12.3. Modèle de Künzle (1995)

Le modèle de Künzle [53] considère que les transferts en phase vapeur se font sous l'effet d'un gradient de pression de vapeur, et les transferts en phase liquide se font sous l'action des forces capillaires d'interactions entre les phases fluides, ainsi qu'entre les phases fluides et la matrice solide. Les équations aux dérivées partielles du modèle de Künzle couplant les transferts de chaleur et d'humidité sont donnée par [39,53,57] :

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \frac{\partial \varphi P_{vs}}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \frac{\partial \varphi P_{vs}}{\partial x} \right) \end{cases} \quad \text{I. 45}$$

Où :

$\partial \omega / \partial \varphi [-]$: Pente de l'isotherme de sorption ;

$L_v [J/kg]$: Chaleur latente de vaporisation ;

$\delta_p [kg/Pa.m.s]$: Perméabilité à la vapeur d'eau ;

$\lambda [W/m.K]$: Conductivité thermique

$C_p [J/kg.K]$: Capacité thermique du matériau

$P_{vs} [Pa]$: Pression de vapeur saturante ;

$D_\varphi [kg/m.s]$: Coefficient de diffusion liquide.

Les moteurs de transferts de ce modèle sont la température T et l'humidité relative φ . Ces deux équations sont composées d'un terme de stockage et de termes de transfert. La pression de vapeur présente dans les deux équations est fortement influencée par la température, et elle représente un terme de couplage liant les évolutions de la température et de l'humidité dans les matériaux poreux de construction.

Le modèle de Kunzel appartient à Fraunhofer Institut Bauphysik (IBP). Il est commercialisé sous le nom de WUFI (Wärme und Feuchte Instationär). C'est un outil de modélisation des transferts de chaleur et d'humidité dans les enveloppe du bâtiment, et il est utilisé dans plusieurs travaux de recherches existant dans la littérature parmi eux ceux d'Ait Ouméziane [36], Ryu et al. [58], Barclay et al. [59], et d'Othmen [5].

I.12.4. Effet de la pression totale

La plupart des modèles de prédiction des transferts de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction ne considèrent que deux moteurs de transferts (température et teneur en eau), et négligent l'effet du gradient de pression totale [60–63].

Un gradient de pression totale du mélange gazeux provoque un déplacement d'ensemble de cette phase, induisant un mouvement de chaque constituant, en effet la pression totale influe sur les flux de masse [64]. Lorsqu'un gradient de pression totale apparaît dans un milieu poreux, il génère un transfert supplémentaire de chaleur et d'humidité résultant du mouvement de la filtration de la vapeur d'eau et de l'eau liquide dans le matériau [54].

Un modèle basé sur la théorie de Luikov a été proposée dans les travaux de Abahri [40,54], il considère trois moteurs de transferts : la température, la teneur en eau et le gradient de pression totale. Pour pouvoir montrer l'incidence du gradient de pression sur les transferts thermo-hydriques, des simulations numériques ont été effectuée, et les résultats ont été comparés à ceux issus de la littérature, où la pression totale est supposée constante. De plus, dans les mêmes travaux, ils ont conçu un dispositif expérimental dans le but de mener une investigation sur la réalité de contribution du gradient de pression au transfert d'humidité, ainsi que la détermination du coefficient d'infiltration utilisé comme paramètre d'entrée des modèles de prédiction des transferts de chaleur d'air et d'humidité. Les équations mathématiques du modèle HAM sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[D_m(\nabla \omega + \delta \nabla T + \alpha \nabla P)] \\ C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla u + \alpha_t \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t} \\ h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t} \end{array} \right. \quad \text{I. 46}$$

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 thermogradient,
 $\alpha [Kg/m.s.Pa]$ 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,
 $\delta_t [Kg/m.s]$ 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,
 $\lambda_f [Kg/m.s.Pa]$ est le coefficient d'infiltration d'air, $h_a [Kg.s^2/m^2.mol]$ est la capacité d'air humide,
 $\chi [-]$ est le rapport entre le flux de vapeur d'eau et le flux massique total.

Il a été démontré que le phénomène d'infiltration qui désigne la migration des molécules d'eau causée par le gradient de pression totale, contribue au transfert d'humidité dans les parois du bâtiment, et ces effets d'infiltration sont d'autant plus important que le matériau présente une forte porosité. Dans le même sens, un autre modèle des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches a été développé dans les travaux de Ferroukhi [41, 56, 65]. Le modèle est basé aussi sur la théorie de Luikov et considère la température, la pression de vapeur et la pression totale comme moteurs de transfert.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{m_i} \rho_{s_i} \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}(k_{m_i} \nabla P_v + k_{T_i} \nabla T + k_{f_i} \nabla P) \\ C_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(k_f \nabla P) \\ C_{p_i} \rho_{s_i} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla u + \alpha_t \nabla P) + L_v \rho_{s_i} \sigma_i C_{m_i} \frac{\partial P_v}{\partial t} \end{array} \right. \quad \text{I. 47}$$

Avec :

$i = 0 : n$ représente la position de la couche dans une paroi multicouche

$k_m [kg/m.s.Pa]$: perméabilité totale en humidité

$C_m [kg/kg.Pa]$: est la capacité de stockage hydrique du matériau, déterminée à partir de la pente de la courbe d'isotherme de sorption. C_m est donnée par l'expression suivantes :

$$C_m = \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{1}{P_{vs}} \quad \text{I. 48}$$

La pression de vapeur choisie comme moteur de transfert de masse assure la continuité au niveau des interfaces des parois multicouches. De plus, l'utilisation de ce modèle a été étendu à un développement d'une approche de co-simulation dynamique HAM-BES (HAM : Heat, Air

and Moisture transfer, BES : Building Energie Simulation) [66, 67]. Ceci permet une modélisation fine des transferts de chaleur d'air et d'humidité à l'échelle de la paroi et de l'enveloppe, ainsi que la prise en considération de l'interaction dynamique enveloppe-ambiance sur le comportement hygrothermique et énergétique des bâtiments. De plus, cette approche permet d'évaluer les désordres causés par l'humidité dans le bâtiment.

I.12.5. Effet de la variabilité des propriétés des matériaux poreux de construction

Les milieux poreux de construction tels que les matériaux cimentaires utilisés dans la construction des bâtiments ont une structure complexe et hétérogène, leurs propriétés physiques, thermiques et hydriques varient d'une manière aléatoire. D'autre part, les modèles de prédiction des phénomènes de transfert dans les milieux poreux adoptent une approche déterministe, leurs paramètres d'entrées représentent des propriétés globales des matériaux de constructions.

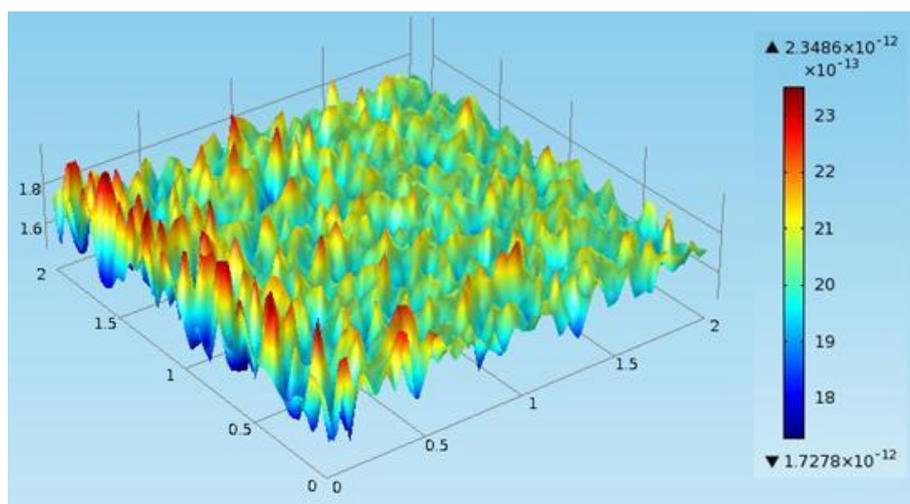


Figure I. 20 : Champ aléatoire de perméabilité à la vapeur [68]

Pour pallier à ce problème, Issaadi [68] propose dans ses travaux un outil de prise en compte de la variabilité spatiale des propriétés qui est basé sur une approche probabiliste en utilisant les résultats expérimentaux obtenus sur un voile en béton armé.

La figure I.20 présente des exemples de réalisations de champ aléatoire de perméabilité à la vapeur. La confrontation entre les deux approches (figure I. 21) montre les limites de l'approche déterministe, et met en évidence l'impact de la variabilité spatiale de la perméabilité à la vapeur d'eau sur le comportement hydrique du matériau

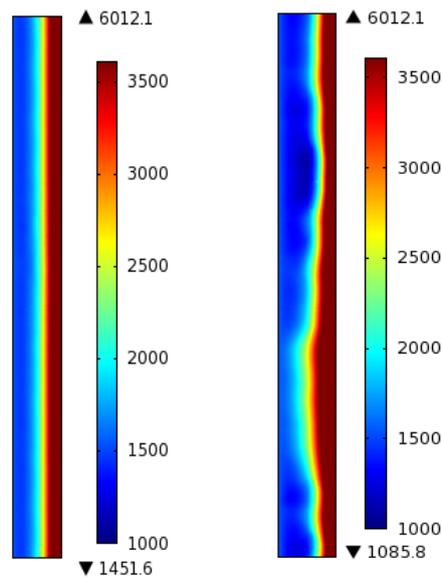


Figure I. 21 : Comparaison de l'évolution de la pression de vapeur suivant une coupe suivant l'épaisseur du voile avec l'approche déterministe et probabiliste [68]

I.13. Changement d'échelle et homogénéisation

À l'échelle microscopique, les milieux poreux possèdent une structure complexe et présentent de forte hétérogénéité. Le comportement de ces milieux dépend des phénomènes physiques qui se manifeste dans les différentes phases (solide, gaz, liquide) qui constituent les milieux poreux. De plus, les distributions géométriques inconnues des milieux poreux, rendent leurs description précise difficile, parfois impossible. Il est alors nécessaire de disposer des lois macroscopiques qui nous permettent de prendre en compte l'hétérogénéité et la complexité des milieux poreux et de décrire leur comportement global à grande échelle.

Une solution possible pour décrire ces milieux hétérogènes est de les assimiler à des milieux macroscopiques équivalents ayant le même comportement en moyenne, en utilisant des méthodes de passage de l'échelle microscopique (micro) à l'échelle macroscopique (macro).

I.13.1. Volume élémentaire représentatif VER :

Le VER est le plus petit volume permettant de donner un sens aux propriétés macroscopiques du milieu. Afin que le volume élémentaire représentatif sur lequel les grandeurs microscopiques sont moyennées soit représentatif des hétérogénéités de la microstructure des matériaux, il est nécessaire que la taille de ce VER « l » vérifiée la condition suivante :

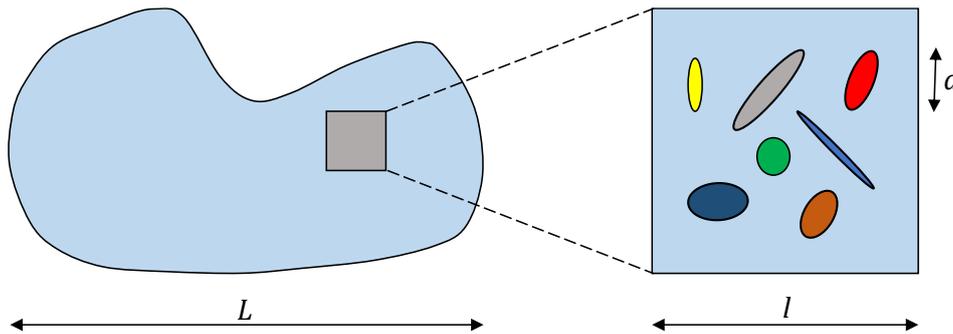


Figure I. 22 : Milieu hétérogène et son VER, les différentes échelles

$$d \ll l \ll L$$

I. 49

La taille du VER doit être suffisamment grande devant la taille des hétérogénéités « d » pour pouvoir négliger toutes les fluctuations microscopiques qui peuvent influencer le comportement global macroscopique du milieu, et suffisamment petite devant la taille du milieu « L » pour que l'influence des gradients macroscopiques soit négligeable.

I.13.2. Passage micro-macro :

L'homogénéisation, aussi appelée changement d'échelles ou passage micro-macro, désigne la procédure qui consiste à chercher un lien entre le comportement macroscopique et les processus physiques microscopiques. Il s'agit en fait de remplacer le milieu réel hétérogène discontinu par un milieu homogène continu à partir d'une certaine échelle d'observation. On distingue deux principales échelles :

- L'échelle microscopique, ou l'échelle du pore, dont la longueur caractéristique « l » est généralement assimilée au diamètre moyen des pores ou des particules.
- L'échelle macroscopique, représentée par la longueur « L », associée à la longueur caractéristique des phénomènes observés, correspondant à l'échelle du matériau.

Il y a lieu de noter que pour toutes les méthodes d'homogénéisation la condition de séparation d'échelle : $\varepsilon = \frac{l}{L} \ll 1$ doit être vérifiée, et que plus la séparation des échelles sera importante, meilleurs seront les résultats.

Il existe plusieurs méthodes d'homogénéisation qui peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les méthodes d'homogénéisation par prise de moyenne.
- Les méthodes d'homogénéisation périodiques.

I.13.2.1. Homogénéisation par prise de moyenne volumique :

La méthode de prise de moyenne volumique [69,70] appelée aussi technique de moyenne spatiale, généralement utilisée dans la mécanique des milieux poreux. Elle consiste à moyennner les équations de transport à petite échelle pour aboutir à des équations de transport macroscopique à grande échelle et prédire les propriétés effectives associées. Cette moyenne est définie sur un volume élémentaire représentatif présenté sur la figure I. 23 :

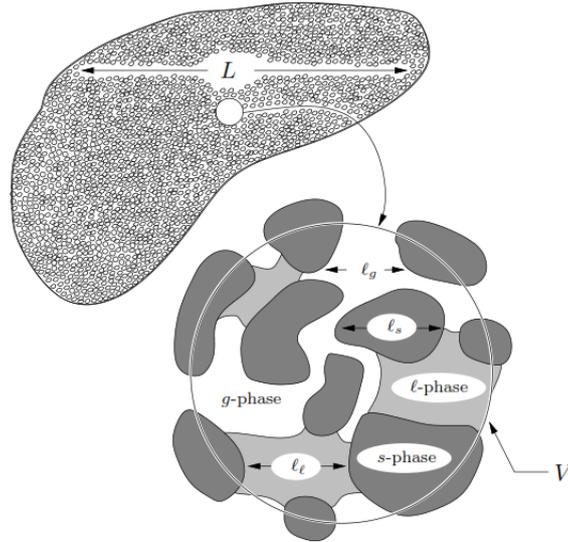


Figure I. 23 : Volume élémentaire représentatif d'un système triphasique $s - l - g$ [71]

Pour toute grandeur vectorielle ou scalaire ψ_α associée à la phase α ($\alpha = s, l, g$) dans le volume élémentaire représentatif (VER), deux moyennes peuvent être définies. La moyenne de phase, appelée également moyenne superficielle exprimée par :

$$\langle \psi_\alpha \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_\alpha} \psi_\alpha dV \quad \text{I. 50}$$

Où V_α représente le volume de la phase α contenu dans le volume de prise de moyenne volumique. D'un autre côté, la moyenne intrinsèque de la phase se définit par :

$$\langle \psi_\alpha \rangle^\alpha = \frac{1}{V_\alpha} \int_{V_\alpha} \psi_\alpha dV \quad \text{I. 51}$$

Les deux moyennes superficielle et intrinsèque sont alors reliées par :

$$\langle \psi_\alpha \rangle = \theta_\alpha \langle \psi_\alpha \rangle^\alpha \quad \text{I. 52}$$

Avec θ_α est la fraction volumique de la phase α , elle est donnée par le rapport du volume de la phase α sur le volume total du volume élémentaire représentatif $\theta_\alpha = \frac{V_\alpha}{V}$

La décomposition de Gray [72] nous permet d'écrire la grandeur locale ψ_α comme la somme de sa moyenne intrinsèque $\langle \psi_\alpha \rangle^\alpha$ et sa fluctuation (déviation) $\widehat{\psi}_\alpha$:

$$\psi_\alpha = \langle \psi_\alpha \rangle^\alpha + \widehat{\psi}_\alpha \quad \text{I. 53}$$

La moyenne de phase du produit de deux grandeurs ψ et λ est donnée alors par :

$$\langle \psi_\alpha \cdot \lambda \rangle = \langle \psi_\alpha \rangle \langle \lambda \rangle + \langle \widehat{\psi}_\alpha \cdot \widehat{\lambda} \rangle \quad \text{I. 54}$$

Dans ce qui suit, nous présentons les deux théorèmes fondamentaux de la méthode de prise de moyenne volumique qui sont : le théorème de transport de Reynolds, qui permet d'intervenir les opérateurs de moyenne et de dérivée partielle en temps, et le théorème de moyenne spatiale, qui permet d'intervenir les opérateurs de moyenne et de dérivées partielles spatiales.

Pour une grandeur ψ_α de la phase α , le théorème de transport de Reynolds s'écrit :

$$\left\langle \frac{\partial \psi_\alpha}{\partial t} \right\rangle = \frac{\partial}{\partial t} \langle \psi_\alpha \rangle - \frac{1}{V} \int_{\Gamma_{\alpha i}} \psi_\alpha \cdot \omega_{\alpha i} \cdot n_{\alpha i} d\Gamma \quad \text{I. 55}$$

Avec : $\omega_{\alpha i}$ est la vitesse de déplacement de l'interface $\Gamma_{\alpha i}$ et qui est contenue dans le volume de prise de moyenne.

Pour une grandeur ψ_α de la phase α , le théorème de moyenne spatiale s'écrit :

$$\langle \nabla \psi_\alpha \rangle = \nabla \langle \psi_\alpha \rangle + \frac{1}{V} \int_{\Gamma_{\alpha i}} \psi_\alpha \overline{n_{\alpha i}} d\Gamma \quad \text{I. 56}$$

Où l'opérateur ∇ correspond à l'opérateur divergence lorsque ψ_α est une grandeur vectorielle, ou à l'opérateur gradient lorsque ψ_α est une grandeur scalaire.

Dans la majorité des cas, les équations de transport locales contiennent des termes d'accumulation, de convection et des termes sources pouvant suivre une loi de type gradient (i.e. loi de Fick, loi de Fourier, ...). La moyenne volumique d'un terme convectif du type $v_\alpha \psi_\alpha$ s'écrit à partir du théorème de moyenne spatiale sous la forme :

$$\langle \nabla(v_\alpha \psi_\alpha) \rangle = \nabla \langle v_\alpha \psi_\alpha \rangle + \frac{1}{V} \int_{\Gamma_{ai}} v_\alpha \psi_\alpha \vec{n}_{ai} d\Gamma \quad \text{I. 57}$$

Les premiers travaux sur les méthodes d'homogénéisation par prise de moyenne volumiques ont été réalisés par Whitaker [73] pour homogénéiser les équations de transfert thermique dans des milieux poreux. Les transferts thermiques ont été également abordés afin d'identifier le tenseur de conductivité thermique homogénéisé [71,73–77]. En utilisant la même méthode, E. Samson [78] et H. SLEIMAN [79] ont établi un modèle de transport des ions et fluide dans les matériaux cimentaires insaturés, il a été montré que le transport de l'humidité sous ces deux formes (liquide et vapeur) obéit à l'équation de Richards.

La méthode d'homogénéisation par prise de moyenne volumique nécessite de faire certaines hypothèses au cours des calculs afin d'obtenir le modèle macroscopique homogénéisé recherché. D'autre part dans les équations non linéaires, ou lorsqu'on a une moyenne du produit de deux grandeurs, les termes dispersion sont en général négligés [80]. De plus, dans les modèles existant [78], une définition empirique de la tortuosité est introduite qui ne prend pas en compte la microstructure interne du milieu poreux.

I.13.2.2. Méthode d'homogénéisation périodique

La méthode d'homogénéisation périodique [81–84] suppose que la microstructure du milieu macroscopique est parfaitement périodique, et elle est constituée d'une répétition périodique d'une certaine cellule élémentaire de base, le VER correspond une seule période (figure I.24). La condition de séparation des échelles est caractérisée par l'introduction du paramètre clé ε :

$$\varepsilon = \frac{l}{L} \ll 1 \quad \text{I. 58}$$

Soient ψ une quantité physique scalaire locale dépendante de l'espace et X la variable d'espace. Deux variables d'espace x et y sans dimension sont introduites

- La variable d'espace macroscopique ou variable lente

$$x = \frac{X}{L} \quad \text{I. 59}$$

- La variable d'espace microscopique ou variable rapide

$$y = \frac{Y}{l} \quad \text{I. 60}$$

Ces deux variables étant reliées par :

$$y = \frac{x}{\varepsilon} \text{ ou } x = \varepsilon y \quad \text{I. 61}$$

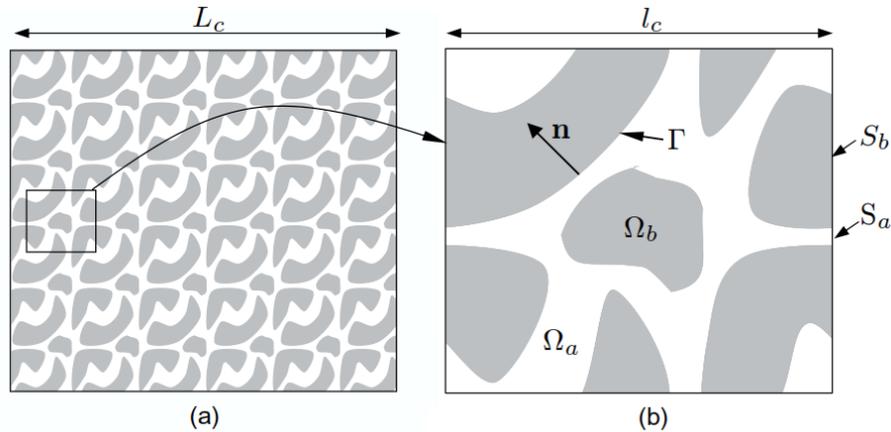


Figure I. 24 : Microstructure constituée de la répétition périodique d'une cellule de base [85]

La méthode d'homogénéisation consiste alors dans un premier temps à entreprendre une adimensionnalisation des équations du transport à l'échelle microscopique en utilisant des grandeurs de référence. Cette procédure fait apparaître des nombres sans dimensions et leurs ordres de grandeur sont estimés en fonction du paramètre ε . Dans un deuxième temps, toutes les quantités physiques sont exprimées sous la forme des développements asymptotiques en puissance ε :

$$\psi(x, y) = \psi^{(0)}(x, y) + \varepsilon \psi^{(1)}(x, y) + \varepsilon^2 \psi^{(2)}(x, y) + \dots \quad \text{I. 62}$$

Où chaque terme $\psi^{(i)}$ est y -périodique. Dans la pratique seuls les deux premiers termes sont pris en considération. Il s'agit, ensuite, d'introduire ces développements dans les équations de transport à l'échelle microscopique et d'annuler les facteurs des différentes puissances de ε , nous obtenons une série de problèmes en cascade couplés. La résolution de ces problèmes couplés conduit aux équations de transport macroscopiques dont $\psi^{(0)}$ est solution, et à la définition des propriétés effectives.

Parmi les travaux de littérature basés sur cette méthode, on peut citer ceux de J. L. Auriault [86, 87] où l'homogénéisation des transferts thermiques dans un matériau composite à deux constituants avec et sans résistance de contact entre ces constituants a été effectuée. C Moyne [88] a établi une homogénéisation des équations de transfert de chaleur dans un milieu périodique à deux phases, avec des sources de chaleur homogènes et hétérogènes. J. Lewandowska et J.P. Laurent [89] ont appliqué cette méthode aux transferts d'humidité. Ils ont

présenté une équation du transfert d'humidité dans les milieux poreux insaturé macroscopiquement hétérogène.

W. Mechargui [90] a utilisé la méthode d'homogénéisation périodique pour élaborer un modèle macroscopique de transfert hydrique (transport d'eau liquide et de la vapeur d'eau) dans les milieux poreux partiellement saturés, ce modèle a permis de justifier rigoureusement l'équation de Richards et d'obtenir une expression analytique du tenseur de diffusion d'humidité homogénéisé.

Un autre modèle dans les milieux à double porosité est présenté par J. Lewandowska [91]. L'équation de Richards à l'échelle mésoscopique appelée aussi échelle de Darcy était le point de départ pour remonter à la fin à une équation homogénéisée ayant la même forme que l'équation de Richards [92] mais à une échelle macroscopique supérieure.

On retrouve également des travaux concernant la modélisation de l'écoulement de l'eau dans les sols insaturés avec des inclusions très perméable [93], l'écoulement à grande vitesse dans les milieux poreux hétérogènes [94], les écoulements réactifs dans un milieu poreux [95]. Le transport des polluants dans les eaux sous terraines [96]. La diffusion ionique des chlorures dans les milieux poreux saturés avec la prise en compte des interactions électro-capillaires des ions avec la matrice solide [97] et la diffusion de solutés en milieu poreux [98] sont également abordées avec la même approche.

La méthode d'homogénéisation périodique basée sur les développements asymptotiques est plus rigoureuse. Elle nous permet d'obtenir des modèles pertinents. Elle est basée sur une analyse dimensionnelle des équations de transfert à l'échelle microscopique, faisant apparaître naturellement des nombres sans dimension caractérisant le problème.

Par ailleurs, certains matériaux dits « matériaux désordonnés où aléatoire », présentant une répartition aléatoire de leurs hétérogénéités, nécessitent une représentation statistique [99].

I.14. Matériaux biosourcés

Un matériau de construction est dit biosourcé lorsqu'il incorpore de la biomasse végétale ou animale. La biomasse est une matière d'origine biologique à l'exception des matières de formation géologique ou fossile [100]. Les matériaux et les produits biosourcés sont les mieux adaptés aux enjeux actuels du secteur du bâtiment. En effet, l'utilisation de ces matériaux renouvelables dans l'enveloppe de bâtiment permet de limiter l'épuisement des ressources à

l'avenir ainsi que les émissions de GES en absorbant du CO₂. De plus, leurs faibles énergie grise et conductivité thermique permettent de minimiser les couts énergétiques de l'enveloppe durant sa durée de vie. L'énergie grise d'un matériau est la somme des dépenses énergétiques nécessaires à l'extraction, à la transformation, au conditionnement et au transport jusqu'au lieu du chantier [101]. Plus un matériau présente une énergie grise, plus il contribue à la pollution de l'environnement et à l'épuisement des ressources énergétiques. Les matériaux biosourcés nous offrent la possibilité de passer d'une enveloppe vétuste, inconfortable et ruineuse à une enveloppe performante économiquement, environnementalement, et socialement.

Les matériaux biosourcés présentent aujourd'hui plusieurs utilisations dans le domaine de la construction :

- Matériau porteur ou de remplissage (bois, béton de chanvre...)
- Isolant (laine de bois, paille...)
- Enduit (chanvre-chaux...)

Nous nous intéressons par la suite au béton de chanvre utilisé comme matériau de remplissage dans la construction des bâtiments.

I.15. Le béton de chanvre

Le béton de chanvre est un matériau qui devient de plus en plus utilisé dans la construction en raison de ses particules végétales renouvelables [102–105] et non dégradables avec le temps. Ce matériau est principalement utilisé comme matériau de remplissage dans la construction des enveloppes de bâtiment. Il apparait comme solution incontournable en réponse aux problématiques environnementales. Le béton de chanvre essentiellement composé de fibres végétales, du liant et d'eau, vient comme une solution innovante et pertinente dans le domaine du bâtiment. Il peut être utilisé aussi bien dans la restauration et la rénovation, que dans la construction neuve. De plus, il peut couvrir plusieurs utilisations dans les bâtiments : isolation en toiture, mur, dalle et enduit, chacune de ces utilisations diffère par la formulation employée [5,106], et les dosages des différents constituants (figure I. 25-27).

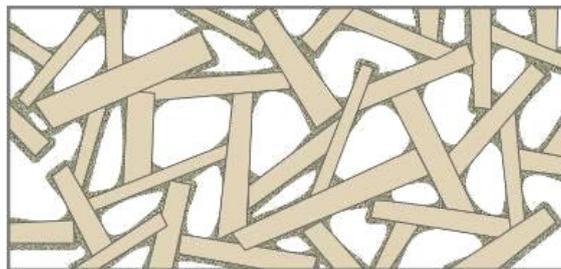


Figure I. 25 : Représentation schématique du béton de chanvre : application toit [107]

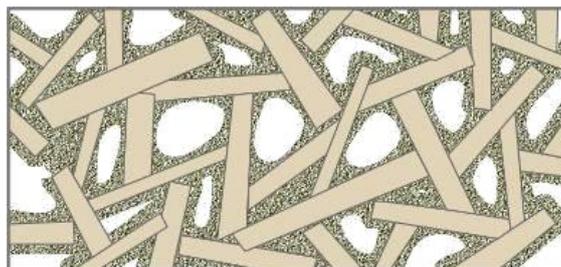


Figure I. 26 : Représentation schématique du béton de chanvre : application Mur [107]

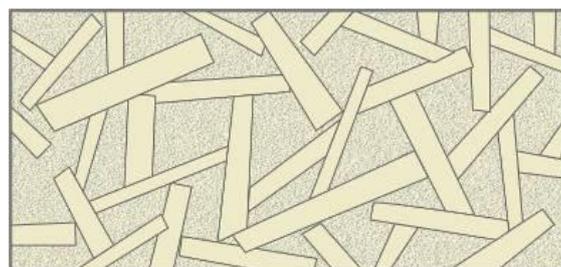
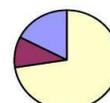
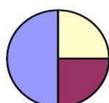


Figure I. 27 : Représentation schématique du béton de chanvre : application Enduit [107]

La Formulation toit nécessite un dosage élevé en chanvre, et une faible quantité de liant, dans ce cas le matériau possède une bonne isolation thermique avec une faible résistance. Contrairement à la formulation toit, la formulation enduit contient une faible teneur en chanvre avec beaucoup de liant qui lui donne une bonne résistance mécanique. Entre ces deux dosages extrêmes, on retrouve la formulation Mur. Elle nécessite d’avoir à la fois une bonne résistance mécanique avec une très bonne isolation thermique. La figures I. 28 montre des exemples de dosages du béton de chanvre correspondant aux différentes utilisations pour un liant (Tradical PF 70) et une chènevotte (Chanvribat).

LHM-roof mix	Mass batching		Volumetric batching	
	[%mass]	[kg] if 20kg of Chanvribat	[%vol]	[litre] to obtain 1m ³
Chanvribat	25%	20	73%	870
Tradical pf 70	25%	20	10%	120
Water	50%	40	18%	210
Total	100%	80	100%	1200

 Chanvribat
 Tradical pf 70
 Water



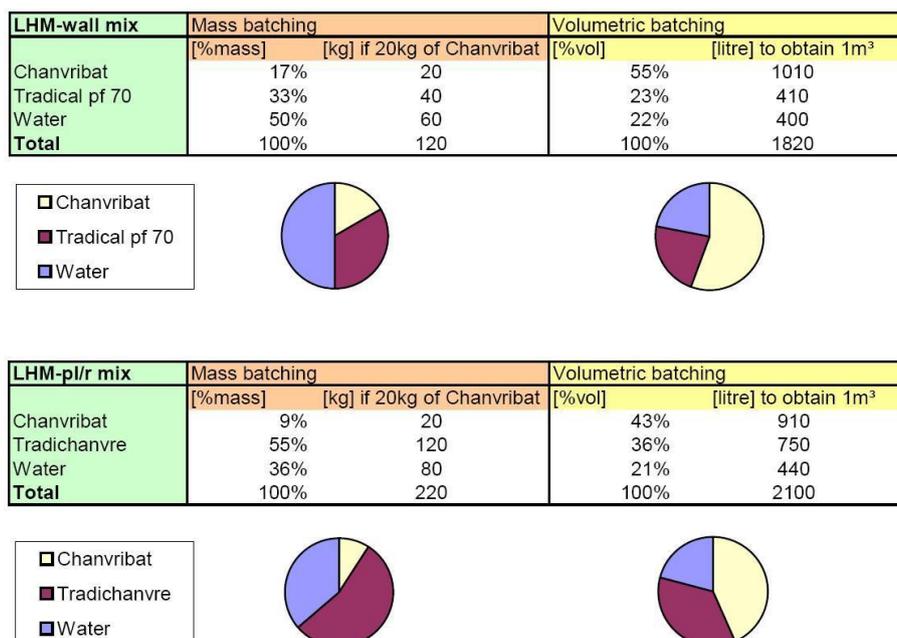


Figure I. 28 : Exemple de dosage du béton de chanvre : (a) Toit, (b) Mur et (c) Enduit [107]

Le béton de chanvre est un matériau écologique à base de granulats d'origine végétale renouvelable, qui sont en mesure de stocker du carbone pendant leur croissance [108,109]. C'est l'un des rares systèmes constructifs dont le dégagement de GES en construction étant négatif. En plus des bonnes propriétés mécaniques et acoustiques [110–113], le béton de chanvre est plus léger que les matériaux de construction traditionnels, et possède d'excellentes propriétés d'isolation thermique grâce à sa faible conductivité thermique [114–117]. Cette grandeur dépend de la composition du matériau. Comme le liant est le plus conducteur, l'augmentation du dosage en liant conduit à une conductivité thermique importante [118]. La densité du matériau peut aussi influencer la conductivité thermique du béton de chanvre, en effet, plus la densité augmente, la conductivité thermique augmente également [119].

D'un point de vue hydrique, le béton de chanvre présente de nombreux avantages. Il possède un pouvoir tampon à l'humidité (MBV) "excellent" [120]. Ce qui lui permet de maintenir la qualité de l'air intérieur. De plus, sa structure très poreuse [121], et sa porosité totale proche de la porosité ouverte, le rendent capable d'absorber des quantités d'eau importantes [122]. Par ailleurs, le béton de chanvre possède une perméabilité à la vapeur d'eau élevée, et la propriété de modérer sensiblement les variations d'humidité relative de l'air environnant. Il présente ainsi une très bonne capacité de régulation d'hygrométrie [123]. En général, le béton de chanvre peut diminuer les variations quotidiennes de l'humidité relative à l'intérieur par absorption et

restitution de l'humidité, de réduire la consommation d'énergie [124], et maintenir le confort hygrothermique dans le bâtiment [117].

Le béton de chanvre destiné à l'application mur est utilisée pour réaliser des murs, des cloisons ou des doublages pour des travaux neufs ou de rénovation, il existe trois types de ce béton de chanvre qui diffèrent par le procédé de fabrication et la technique de mise en œuvre :

- Béton de chanvre moulé (banché) : cette technique est la plus utilisée, elle consiste à verser et compacter manuellement le béton de chanvre dans un coffrage ou entre deux banches (figure I. 29).

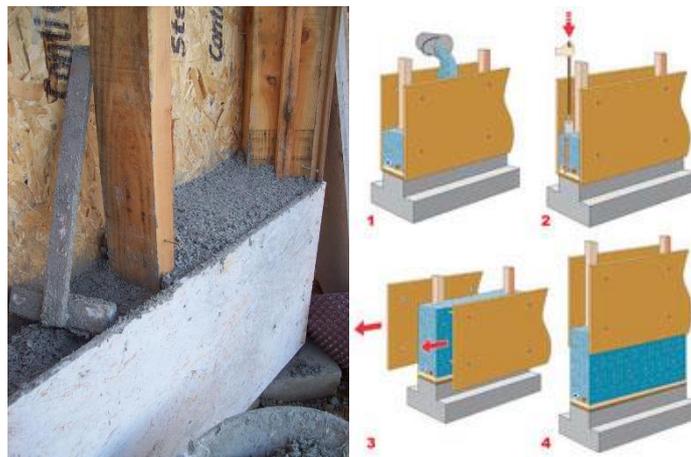


Figure I. 29 : Banchage du béton de chanvre⁴ et étape de réalisation⁵

- Béton de chanvre projeté : dans ce cas la mise en œuvre du béton de chanvre est réalisée mécaniquement par une projection sur une banche (figure I. 30). Un prémélange sec de la chènevotte et du liant est effectué à l'air dans un tuyau et l'eau pulvérisée est ajouté juste avant la sortie du tuyau. Dans ce cas le béton de chanvre est projeté sur un coffrage provisoire, perdu ou sur un mur existant (rénovation).

⁴ <http://www.technichanvre.com/techniques/galerie-dimages/technichanvre-banchage>

⁵ <http://www.batirama.com/article/35-le-beton-de-chanvre-en-4-applications>



Figure I. 30 : Béton de chanvre projeté sur mur⁶

- Béton de chanvre préfabriqué : cette technique consiste à construire des murs à l'aide des blocs préfabriqués (brique, parpaing...), cette technique présente l'avantage d'une mise en œuvre plus rapide et un meilleur contrôle de la qualité du produit (température, hygrométrie, force de compaction) [5]



Figure I. 31 : Blocs de béton de chanvre préfabriqué⁷

I.16. Constituants du béton de chanvre

I.16.1. La chaux

Le liant associé à la chènevotte lors de la fabrication du béton de chanvre assure un minimum de cohésion entre les composants. De plus, il apporte au matériau une résistance et une rigidité suffisantes. Le choix du liant doit répondre à trois exigences : assurer un malaxage aisé notamment un enrobage parfait des constituants, garantir une mise en œuvre correcte à l'état frais, et enfin assurer les propriétés mécaniques du matériau après la prise [125]. Les liants utilisés dans les bétons de chanvre peuvent être des liants aériens, ou des liants hydrauliques,

⁶ <http://www.isolation-chanvre.fr/prohemp-chanvre-en-vrac>

⁷ <http://www.alsachanvre.fr/pages/blocs-de-chanvre.html>

voir un mélange des deux. La chaux aérienne semble être le liant idéal pour la fabrication du béton de chanvre. En revanche, vu la lenteur du processus de solidification de ce liant [126] ainsi que la difficulté de la carbonatation au cœur du matériau [127], l'ajout des liants hydrauliques s'avère alors indispensable. Ceci permet d'activer la carbonatation et de favoriser un durcissement plus rapide. De plus, les mélanges chaux-ciment permettent d'obtenir une forte résistance à la compression et un module de Young plus élevé [126,128]. Dans le même sens, dans les liants constitués d'un mélange chaux-ciment, la chaux agit comme un accélérateur de prise pour le ciment et la présence de la chaux permet d'atteindre un taux d'hydratation du ciment plus élevé [129]. Actuellement, les nouveaux liants développés sont les mieux adaptés pour la confection du béton de chanvre. Ils combinent essentiellement de la chaux aérienne et un liant hydraulique (chaux, ciment, pouzzolane). Ils présentent l'avantage d'allier la très bonne résistance au jeune âge du ciment à la porosité de la chaux.

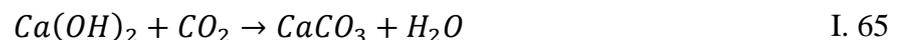
La calcination du calcaire ($CaCO_3$) à environ $1000^\circ C$ permet d'obtenir de la chaux vive (équation I. 63) et de dioxyde de carbone (CO_2).



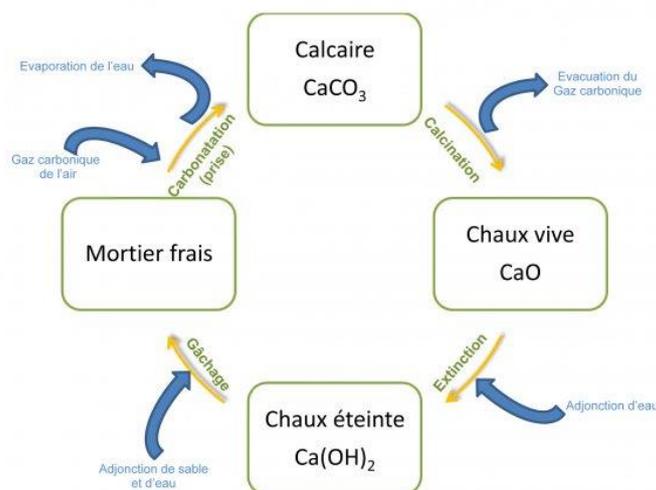
La chaux vive (CaO) ainsi obtenue par calcination est hydratée pour donner de la chaux dite éteinte ou hydratée. C'est la chaux éteinte ($Ca(OH)_2$) qui est utilisée comme liant.



Par la suite la carbonatation de la chaux commence lors du gâchage de la chaux éteinte avec l'eau et les granulats, elle se produit lentement. La carbonatation de l'hydroxyde de calcium au contact du CO_2 de l'air conduit à la formation de carbonate de calcium, c'est la prise aérienne.

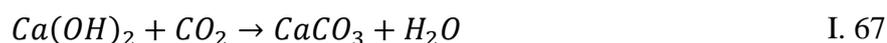
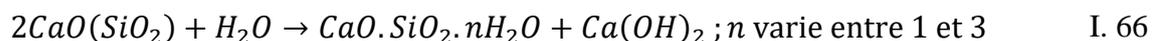


Les différents cycles de la chaux sont présentés dans la figure I. 32 où il est montré que la chaux reprend sa forme originale durcie après la carbonatation.

Figure I. 32 : Cycle de la chaux⁸

Si le calcaire calciné pour la fabrication de la chaux est pur à plus de 95%, il donnera de la chaux aérienne (CL Calcium Lime), et si le calcaire contient une quantité d'argile (de 4 à 16 % Al_2O_3 , de 1 à 8% de Fe_2O_3) [8] il donnera de la chaux naturelle hydraulique (NHL Natural Hydraulique Lime). Cette dernière a la propriété de faire prise et de durcir avec l'eau.

La chaux naturelle hydraulique présente une double prise. Tout d'abord, le durcissement de la pâte à l'eau sous l'effet de l'hydratation qui produit les hydrates insolubles (CSH). Ensuite, elle continue de durcir avec l'air humide.



Dans la littérature on retrouve différents types de liant utilisé pour la confection du béton de chanvre, on peut citer :

- Tradical PF 70 : utilisée dans plusieurs travaux [8,107,130–133], elle est composée de 75% de chaux aérienne, 15% chaux hydraulique, et 10% de pouzzolanes.
- Tradichanvre [107,133] : Chaux commerciale contenant 35% de sable et 65% PF 80 (liant élaboré à base de chaux aérienne (85%) et de chaux hydraulique naturelle (15%))
- Chaux hydraulique naturelle (NHL) [8,110] : avec des degrés d'hydraulicité différents
- D'autre liant formulé avec des mélanges des chaux aériennes (CL) et hydrauliques (NHL), avec des cendres volantes [122].

⁸ <http://www.renovationdurable.eu/Chaux-aerienne-Chaux-hydraulique>

I.16.2. La chènevotte

La chènevotte est une particule végétale issue de la tige du chanvre. Elle est constituée de 50 à 60% de cellulose [134]. La plante de chanvre dont le nom scientifique est *cannabis sativa* mesure de 2 à 4m de hauteur avec un diamètre de 1 à 3 cm. Le développement de la plante ainsi que les conditions météorologiques et environnementales affectent les caractéristiques morphologiques de la chènevotte [130]. La plante de chanvre offre aujourd’hui de nombreuses perspectives à travers ses vastes applications dans plusieurs domaines (figure I. 33).

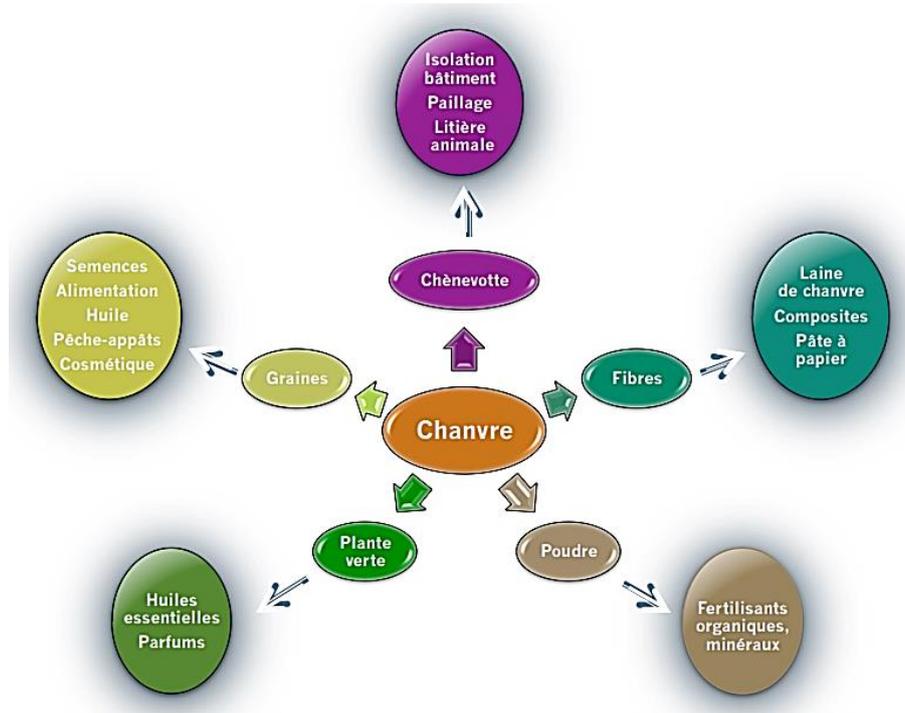


Figure I. 33 : Exemple d'utilisation du chanvre [135]

La figure I. 34 illustre une observation au microscope optique d’une coupe transversale de la tige de chanvre avec une coloration au carmino-vert de Mirande. En rose, les tissus riches en cellulose (épiderme et moelle). En vert, les tissus lignifiés (bois). La figure montre que la tige de chanvre est principalement composée : d’épiderme couvert par la cuticule (tissus de protection), de cortex riche en fibres corticales regroupées en amas, de xylème ou bois constitué de cellules de parenchyme, de fibres et de vaisseaux conducteur, et enfin de la moelle constituée de parenchyme médullaire.

La chènevotte utilisée pour la confection du béton de chanvre provient de la partie bois (xylème), et les fibres utilisées pour la fabrication de la laine isolante proviennent de la partie cortex. La chènevotte ne nécessite aucun traitement de surface, on distingue deux types de granulats (figure I. 35) :

- La chènevotte fibrée : obtenue par broyage de la tige de chanvre sans séparation des mélanges bois et de fibres.
- La chènevotte défibrée : obtenue par défibrages mécanique total de la tige de chanvre. Dans ce cas, la chènevotte est séparée des fibres de chanvre.

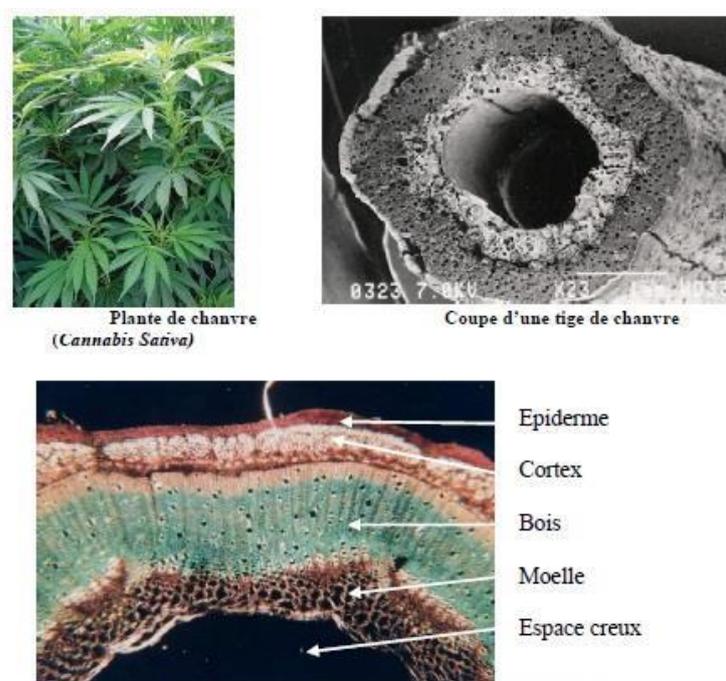


Figure I. 34 : Micrographie d'une coupe transversale de tige de chanvre [136]

La chènevottes présente une structure poreuse tubulaire (figure I. 36) de diamètre différent, sa structure interne est composée de nombreux capillaires qui permettent à la sève de s'écouler tout le long de la tige [36]. De plus, on retrouve l'air intra-granulaire (situé dans les particules) et l'air inter-granulaire (située entre les particules). La masse volumique en vrac de la chènevotte est d'environ de 110 kg/m^3 [133], la valeur exacte de cette grandeur dépend de type de particules et des conditions dont elle se sont développées. La chènevotte présente une porosité élevée, ce qui lui confie des performances thermiques élevées. En effet, elle présente une faible conductivité thermique qui se situent entre 0.048 W/m.K et 0.058 W/m.K [133].

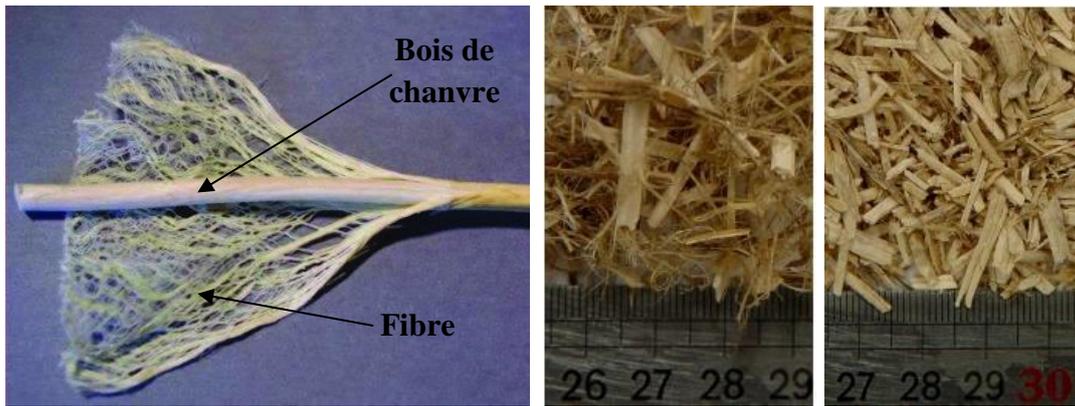


Figure I. 35 : Composition d'une tige de chanvre [130], chènevotte fibrée et chènevotte défibrée [8]

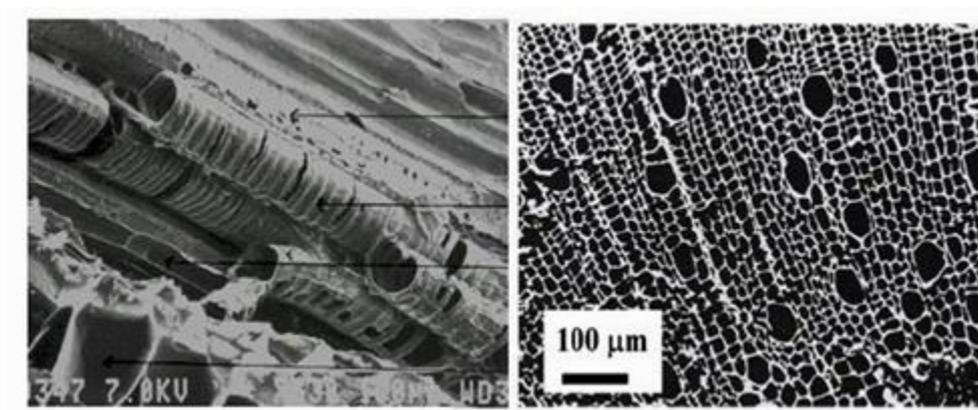


Figure I. 36 : Image au microscopique électronique à balayage d'une particule de chanvre [137]

De plus, la microstructure de la chènevotte (figure I. 36) est caractérisée par des capillaires qui permettent à l'eau de pénétrer facilement, et d'absorber des quantités d'eau importantes.

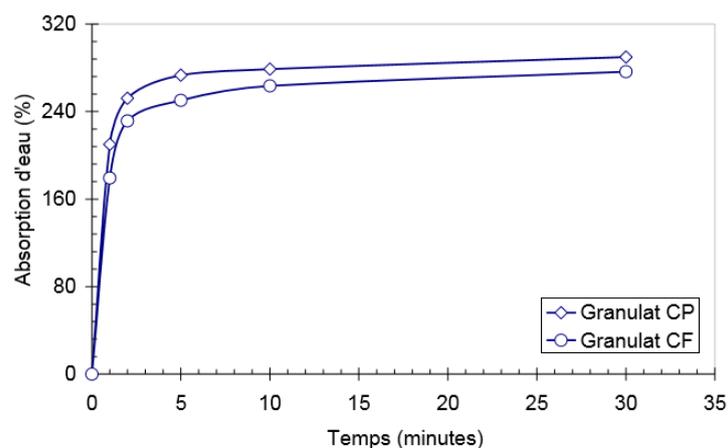


Figure I. 37 : Quantité d'eau absorbée par les chènevotte fibrée (CF) et Pure (CP) [8]

Les résultats d'absorption en eau des chènevottes fibrées et défibrées (pures) menés par Nguyen [8] sont reportés en Figure I. 37. La cinétique d'absorption se montre très rapide pendant les

cinq premières minutes. Par la suite, la masse d'eau absorbée augmente légèrement pour atteindre après 30 mn d'immersion 276 et 290 % pour les granulats CF et CP respectivement. Les granulats absorbent de l'eau lentement jusqu'à la saturation complète après 48h où l'absorption du granulat CP est de 406 % et celle du granulat CF est de 356 % [8]. La chènevotte peut absorber jusqu'à 4 fois sa masse en eau [138] cette absorption est plus importante par rapport aux autres granulats légers.

Dans les travaux de Fourmentin et al. [139] l'évolution de l'absorption d'eau dans la chènevotte a été suivie par micro-imagerie. Cette technique a permis de visualiser la manière dont l'eau pénètre dans la particule végétale étudiée en réalisant des images de micro imagerie par résonance magnétique (IRM).

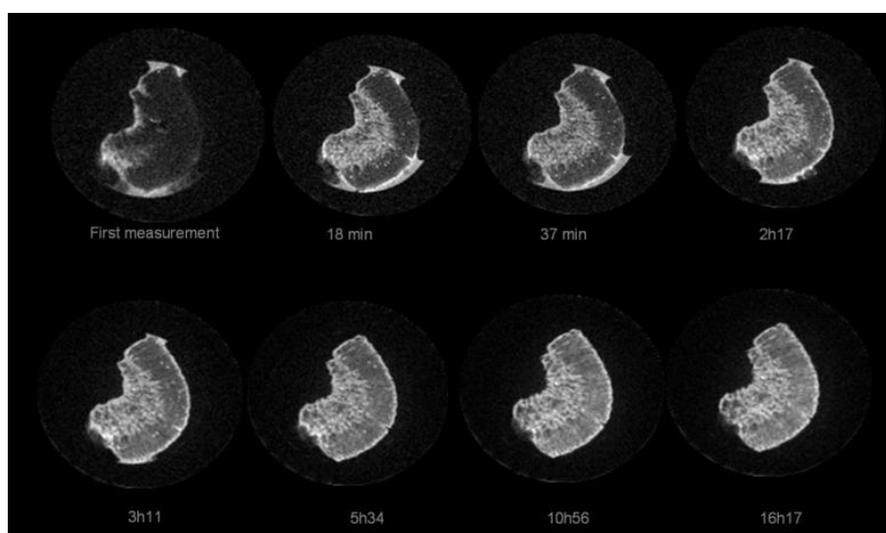


Figure I. 38 : Evolution de la tranche moyenne de la chènevotte lors de l'absorption de l'eau par l'IRM [139]

La figure I. 38 montre une absorption différente entre les deux zones de la chènevotte. En effet, la partie à gauche représentant la moelle contient une grande quantité d'eau comparée à la partie à droite représentant le bois. Ceci est dû au fait que la moelle du chanvre est une partie qui n'a pas été lignifiée et elle n'a pas encore atteint la rigidité finale du bois. Or, la lignification rend les tissus moins hydrophiles [129,139]. Donc la moelle (zone gauche) capte l'eau plus rapidement que le bois (zone droite).

I.17. Capacité tampon hydrique MBV du béton de chanvre

La capacité tampon hydrique représente la capacité d'un matériau à absorber ou à libérer l'humidité, et elle nous donne une idée sur la capacité du matériau à modérer les variations de l'humidité intérieure dans le bâtiment. Cette propriété est déterminée suivant le protocole

Nordtest [140]. Il s'agit d'exposer le matériau initialement conditionné à 23°C et 50% d'humidité relative à des variations cycliques d'humidité relative (8 heures à 75% d'humidité relative et 16 heures à 33% d'humidité relative). Par la suite le MBV est calculé suivant la relation :

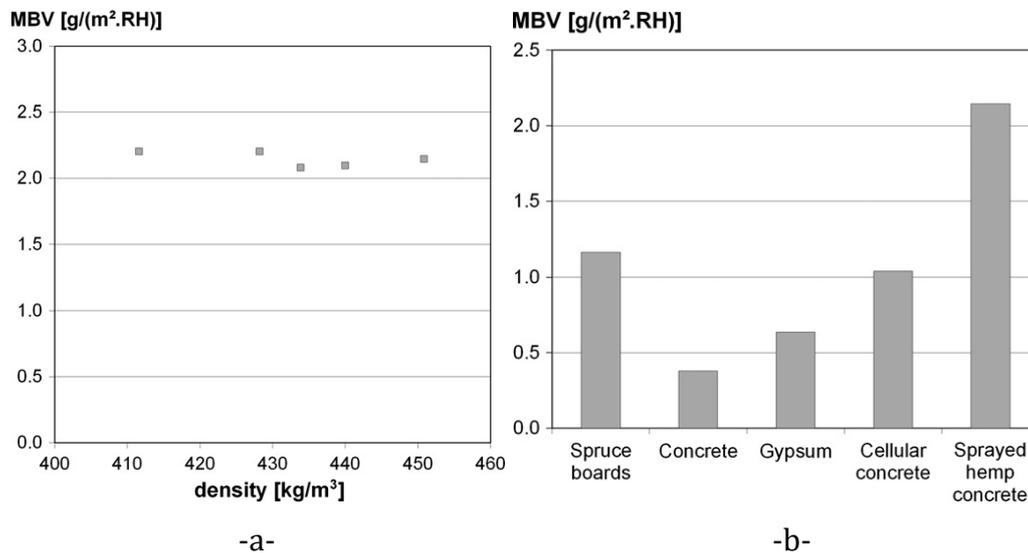


Figure I. 39 : Valeurs du tampon d'humidité (a) du béton de chanvre [120] (b) des matériaux de construction [140]

$$MBV = \frac{\Delta m}{A(HR_h - HR_s)} \quad \text{I. 68}$$

Où : $MBV [kg/m^2. \%HR]$ est la capacité de tampon hydrique, $\Delta m [kg]$ différence de masse d'eau absorbée et libérée dans la période, $A [m^2]$ est la surface de l'échantillon exposée, $HR_{h/s} [\%]$: sont les humidités relatives appliquées lors des cycles humidification/séchage.

L'essai se poursuit jusqu'à ce que la différence de masse Δm entre les trois derniers cycles soit inférieure à 5%. La figure I. 39 (a) montre la capacité de tampon hydrique du béton de chanvre obtenue dans les travaux de collet et al. [120] et la figure I. 39 (b) illustre une comparaison de MBV de cinq différents matériaux de construction, cette étude est réalisée dans le projet Nordtest [140].

Le béton de chanvre présente la valeur la plus élevée de MBV, elle est d'environ $2.2 g/m^2. \%HR$, cette dernière varie peu avec la densité du matériau. Selon la classification des valeurs de la capacité de tampon d'humidité du projet Nordtest (figure I. 40), le béton de chanvre est un excellent régulateur d'humidité ($MBV > 2 g/m^2. \%HR$).

De plus, la figure I. 39 (b) montre que le béton présente la valeur la plus faible de MBV, et sa capacité de tampon hydrique est limitée, alors qu'elle est modérée pour le plâtre, et bonne pour les planches d'épicéa et le béton cellulaire. Ces résultats montrent l'excellent comportement dynamique du béton de chanvre pour atténuer les variations quotidiennes de l'humidité relative dans les enveloppes des bâtiments.

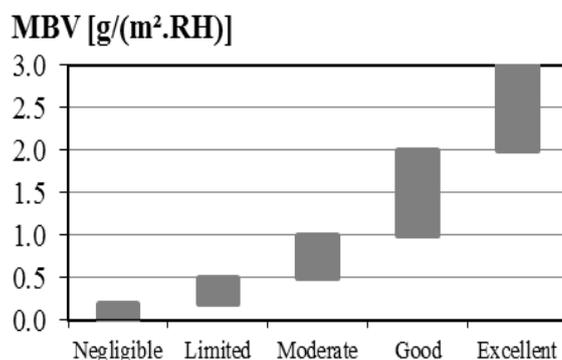


Figure I. 40 : Classifications de MBV données par Nordtest Project [140]

I.18. Imbibitions capillaires

La capillarité est une propriété intrinsèque du matériau poreux, c'est la capacité de ce matériau à absorber l'eau sous l'effet des forces capillaires. Lorsqu'un matériau est soumis à l'imbibition capillaire, l'eau pénètre progressivement dans le réseau poreux par l'intermédiaire des forces capillaires, des volumes d'air peuvent être piégés dans les grands pores où des mécanismes de diffusion d'eau peuvent se manifester pour remplir ces vides. Le coefficient de capillarité correspond à la masse d'eau absorbée par unité de surface dans le temps.

L'essai d'imbibition capillaire permet de connaître les propriétés de transport d'eau à une humidité relative élevée. Il est réalisé selon la norme NF EN 1925 [141]. Il s'agit d'immerger dans 10 mm d'eau [5] les échantillons séchés au préalable à 60°C jusqu'à stabilisation de masse. Le récipient contenant l'échantillon est étanche à pression atmosphérique et à environ 100% d'humidité relative. Par la suite le suivi de masse des échantillons analysés sera réalisé dans le temps en maintenant le niveau d'eau constant. Enfin la masse d'eau absorbée par unité de surface est tracée en fonction de la racine carrée du temps ce qui nous permet de terminer graphiquement le coefficient de capillarité. Ce dernier résulte de la pente de la ligne droite de la courbe tracée [142,143], et il est défini par l'équation I. 69 suivante :

$$M_{\omega} = C_A \sqrt{t} + k$$

I. 69

Où :

M_{ω} [kg/m^2] Est la masse d'eau absorbée par unité de surface, C_A [$kg/m^2 s^{0.5}$] : coefficient d'absorption d'eau capillaire, k [kg/m^2] : est une fonction de la zone de contact avec l'eau, correspondant à l'intersection de l'axe y avec la ligne droite, \sqrt{t} [$s^{0.5}$] : est la racine carrée du temps.

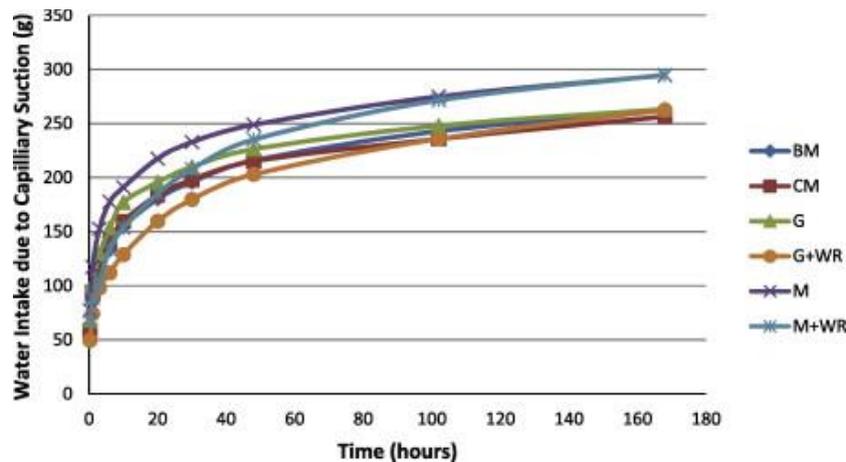


Figure I. 41 : Absorption d'eau par capillarité ans le temps [118]

La figure I. 41 illustre des courbes d'adsorption d'eau par capillarité pour plusieurs échantillons des différents bétons de chanvre. Ces bétons de chanvre présentent la même cinétique d'absorption capillaire, l'absorption d'eau est élevée au début puis ralentit au fil du temps.

Tableau I. 1 : Coefficient d'absorption de l'eau [118]

Liant	Composition	C_A [$kg/m^2 H^{0.5}$]
BM	70% CL90 + 20% NHL 3.5 + 10% ciment Portland	3.09
CM	Liant commercial	3.01
G	70% CL90, 30% GGBS (Laitier granulé de haut fourneau)	3.16
G+WR	70% CL90, 30% GGBS, 0,5% de méthylcellulose	2.65
M	80% CL90, 20% de metakaolin	3.37
M+WR	80% CL90, 20% de metakaolin, 0,5% de méthylcellulose	2.97

Les coefficients d'absorption d'eau dans les premières 24 heures pour les différents liant utilisés pour la confection de ces bétons de chanvre sont ainsi donnés dans le tableau I. 1.

L'action capillaire dans le béton de chanvre dépend du type de liant utilisé. Elle diminue avec l'augmentation de la teneur en liant hydraulique constituant le liant du béton de chanvre. De plus, la méthylcellulose diminue le coefficient capillaire du béton de chanvre, cette diminution est due à l'introduction des petits pores qui peuvent couper le réseau capillaire. Donc l'absorption d'eau dans le béton de chanvre est importante, par conséquent, la vitesse de désorption lors du départ de l'eau absorbé est élevée. Il est toutefois intéressant de souligner que l'adsorption par capillarité d'un matériau de construction est directement liée à sa microstructure, la connectivité du réseau poreux, ainsi que la taille et la forme des pores.

I.19. Conclusion

L'étude réalisée dans ce chapitre a permis de mettre l'accent sur les enjeux économiques et environnementaux auxquels le secteur du bâtiment est confronté, et la nécessité d'utilisation des matériaux biosourcés à faible impact environnemental dans le domaine de la construction. Parmi ces matériaux, le béton de chanvre, composé de fibres végétales et d'un liant.

De plus, un état de l'art a été réalisé sur la description du milieu poreux et ces principales grandeurs caractéristiques, les différents modèles de transferts couplés de chaleur et d'air et d'humidité existants, ainsi que les phénomènes physiques intervenant dans les transferts hydriques.

Les risques causés par l'humidité dans les bâtiments évoqués dans le chapitre montrent l'importance d'une prédiction précise des transferts hygrothermique des matériaux poreux de construction afin de mieux appréhender leurs comportements. De plus, le béton de chanvre présente un fort potentiel de développement en raison de son faible impact environnemental, ses propriétés thermiques et hydriques intéressantes permettent d'améliorer les performances énergétiques, et de garantir une meilleure qualité de l'air des ambiances habitables.

Pour cela, le prochain chapitre sera consacré à une caractérisation complète des propriétés thermiques et hydriques du béton de chanvre utilisé en construction neuve ou en rénovation. Cette caractérisation représente une étape indispensable pour une bonne prédiction du comportement hygrothermique de ce matériau innovant.

Chapitre II

Caractérisation expérimentale des propriétés physiques, thermiques et hydriques du béton de chanvre

Les bâtiments affectent fortement l'environnement à travers les consommations d'énergies et de ressources naturelles. Afin de limiter ces impacts, l'utilisation des matériaux bio-sourcés dans la construction, tels que béton de chanvre s'avère nécessaire, et apparaît comme une solution pertinente. Ce matériau est essentiellement utilisé comme matériau de remplissage dans la construction d'enveloppes de bâtiment, il peut couvrir des utilisations différentes dans les bâtiments, et il est utilisé aujourd'hui en construction neuve et en rénovation.

Ce chapitre est consacré à une campagne expérimentale de caractérisation fine des principales propriétés intrinsèques du béton de chanvre utilisé dans les enveloppes du bâtiment en vue d'une meilleure maîtrise des différents paramètres d'entrée des modèles des transferts hygrothermiques. La fabrication du matériau étudié ainsi que les techniques normalisées de caractérisation ont été réalisées au Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) de l'université de La Rochelle.

La campagne expérimentale a porté sur l'évaluation :

- Des propriétés physiques qui constituent la mesure de la surface spécifique, la porosité ouverte accessible à l'eau, et la distribution des tailles de pores.
- Des propriétés hydriques qui sont basées sur la mesure des isothermes d'adsorption/désorption, la capacité de stockage d'humidité, et la perméabilité à la vapeur.
- Et enfin des propriétés thermiques qui consistent à la détermination de la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

Afin d'appréhender les propriétés d'isolation des matériaux, et pour une prédiction précise de leur comportement hygrothermique, les propriétés thermiques sont évaluées en fonctions de leurs états thermiques et hydriques

II.1. Matériau étudié

Le choix préliminaire des matériaux de construction joue un rôle important dans la réussite d'un projet haute qualité environnementale (HQE), ce choix s'impose comme une des clés de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Les matériaux biosourcés, issus de la biomasse végétale couvrent aujourd'hui une large gamme de produits et trouvent de multiples applications dans le domaine du bâtiment et de la construction. Leur utilisation dans la construction des bâtiments permet de réduire la consommation d'énergie, maintenir le confort hygrothermique, et stocker le carbone atmosphérique. Ces matériaux apparaissent donc comme solution incontournable en réponse aux problématiques environnementales. Parmi ces matériaux, le béton de chanvre, composé de fibres végétales, de liant, et d'eau, il apparait comme une solution pertinente.

Ce matériau est essentiellement utilisé comme matériau de remplissage dans la construction d'enveloppes de bâtiment, il peut couvrir plusieurs utilisations dans les bâtiments qui diffèrent par la formulation employée. Dans ce chapitre, la campagne expérimentale de caractérisation des propriétés physiques et hygrothermiques a été réalisée sur le béton de chanvre confectionné au laboratoire.

II.2. Les constituants du béton de chanvre

Le béton de chanvre est un matériau de construction obtenu en mélangeant un liant à base de chaux, des particules de chanvre et de l'eau

II.2.1. La chaux

Nous avons utilisé un liant à base de chaux pour la confection du béton chanvre. Le liant utilisé est la chaux Batichanvre de Saint-Astier⁹ (France). Ce liant présenté dans la figure II. 1 est spécialement formulé pour la fabrication des bétons en mélange avec du chanvre. Sa masse volumique est d'environ de 500 kg/m^3 .

Ce liant est un mélange de :

⁹ <http://www.c-e-s-a.fr>

- Chaux naturelles de Saint-Astier (Hydraulique : NHL et aérienne : CL),
- Ciment CEM I 52.5,
- Et de différents adjuvants pour améliorer la rhéologie et la perméabilité des bétons de Chanvre.



Figure II. 1 : Photo du liant Batichanvre utilisée

II.2.2. La chènevotte

La chènevotte utilisée (voir Figure II. 2) est un granulats pour banchage en béton de chanvre, de référence C020. Les dimensions des particules sont de l'ordre de 2 à 25 mm. La chènevotte est de couleur beige clair avec une masse volumique apparente d'environ de 110 kg/m^3 . Ces produits sont commercialisés par un fabricant-distributeur de produits chanvre et d'isolants écologiques technichanvre¹⁰ (France).



Figure II. 2 : Photo de la chènevotte utilisée, à gauche : en vrac et à droite : photo MEB

II.2.3. Eau

L'eau utilisée pour la confection des bétons est une eau potable de température de 20°C .

¹⁰ <http://www.technichanvre.com>

II.3. Formulation testée

Le béton à base de chanvre présente une variabilité de structure en fonction de la formulation utilisée. Dans cette étude, l'application retenue est une application mur. Elle est élaborée à partir des règles professionnelles d'exécution des ouvrages en béton de chanvre et correspond à une composition avec des matériaux utilisés sur chantiers. Les dosages massiques en chaux, chènevotte et eau sont récapitulés dans le Tableau II. 1 :

Tableau II. 1 : Composition du béton de chanvre fabriqué

Chènevotte (kg)	10
Chaux (kg)	25
Eau (kg)	35
Eau/Chaux (-)	1.4
Chaux/Chènevotte (-)	2.5

II.4. Fabrication et condition de conservation

Après le dosage des composants, le béton de chanvre est malaxé à l'aide d'un malaxeur à axe Vertical (figure II. 3), Le principal critère est d'obtenir un mélange homogène et maniable, sans formation de grumeaux, ce qui nous permet d'assurer un bon contact entre les constituants (granulats, liant).



Figure II. 3: Malaxeur utilisé et forme des éprouvettes du béton de chanvre fabriqué

L'eau et le liant sont d'abord mélangés dans le malaxeur jusqu'à l'homogénéité du mélange, puis la chènevotte est versée petit à petit, et enfin l'ensemble est malaxé jusqu'à l'obtention d'un mélange parfaitement homogène et sans grumeau ou boulette.

Le béton de chanvre confectionné est alors moulé en éprouvettes en formes différentes (deux types) en fonction de l'essai de caractérisation à réaliser. On distingue ainsi :

- Les éprouvettes de forme géométrique parallélépipède de taille $15*15*4 \text{ cm}^3$, Ces éprouvettes ont servi à la détermination de la conductivité thermique.
- Les éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm utilisées pour le reste des essais expérimentaux. Dans ce cas les échantillons sont obtenus par carottage ou par découpe en utilisant une scie au disque diamanté ou au fil diamanté.



Figure II. 4 : Section transversale de l'éprouvette cylindrique

La figure II.4 représente une coupe transversale de l'éprouvette cylindrique du béton de chanvre cylindrique. Dès la fabrication, les éprouvettes du béton de chanvre ont été conservées dans une enceinte climatique régulée en température et humidité à 20°C et 50% respectivement. Ces conditions reproduisent le mieux les conditions d'exécution pour une isolation par l'intérieur, Arnaud et al. [110] ont étudié différentes conditions de cure (30%, 50%, 75% et 98%) et leurs travaux ont montré qu'une hygrométrie de 50% offre une meilleure résistance à la compression.

II.5. Propriétés Physiques

Les échanges hygrothermiques dans les matériaux de construction dépendent de la structure poreuse. Il existe un lien entre la structure du réseau poreux et l'ensemble des propriétés

thermiques et hydriques. Il est donc indispensable de caractériser le matériau étudié, sur le plan structural, notamment de déterminer la densité, sa teneur en eau maximale, et la distribution porale.

II.5.1. Surface spécifique

Les échanges hygrothermiques dans les matériaux de construction dépendent de la structure porale. Il existe un lien entre la structure du réseau poreux et l'ensemble des propriétés thermiques et hydriques. Il est donc indispensable de caractériser le matériau étudié, sur le plan structural, notamment de déterminer la densité, sa teneur en eau maximale, et la distribution porale.

La surface spécifique BET a été déterminée par la méthode d'adsorption d'azote (N_2) décrite dans la norme NF EN ISO 9277 [144]. Elle a été analysée sur le dispositif volumétrique ASAP 2020 de Micromeritics présenté sur la figure II. 5, qui utilise les techniques d'adsorption de gaz. C'est un appareil équipé d'un poste de mesure, et de deux postes de dégazage totalement indépendants.



Figure II. 5 : Micromeritics ASAP 2020

Les échantillons ont été préalablement séchés en étuve à 40 °C puis ont été placés dans les tubes porte-échantillons et placés dans le poste de dégazage pour éliminer toute impureté (eau, molécule organique) par mise sous vide et chauffage. Une fois l'échantillon est dégazé, le porte échantillon est placé dans l'azote liquide à 77 K, permettant de maintenir une température constante.

L'essai consiste à injecter un volume de gaz jusqu'à une pression P_0 dans une enceinte contenant l'échantillon à analyser. La température de l'enceinte étant proche de la température de condensation de l'azote, cette condition permet l'adsorption de l'azote à la surface du matériau à analyser. La pression d'azote dans l'enceinte diminue jusqu'à une certaine pression d'équilibre. Une fois cet équilibre atteint, un volume d'azote est envoyé dans l'enceinte jusqu'à obtenir une nouvelle pression P_0 . Ce cycle est réalisé jusqu'à ce que la pression d'équilibre après adsorption soit égale à la pression P . Ainsi la courbe représentant la quantité de l'azote adsorbée V_{ads} par l'échantillon en fonction de la pression relative (P/P_0) est appelée isotherme d'adsorption à l'azote (figure II. 6).

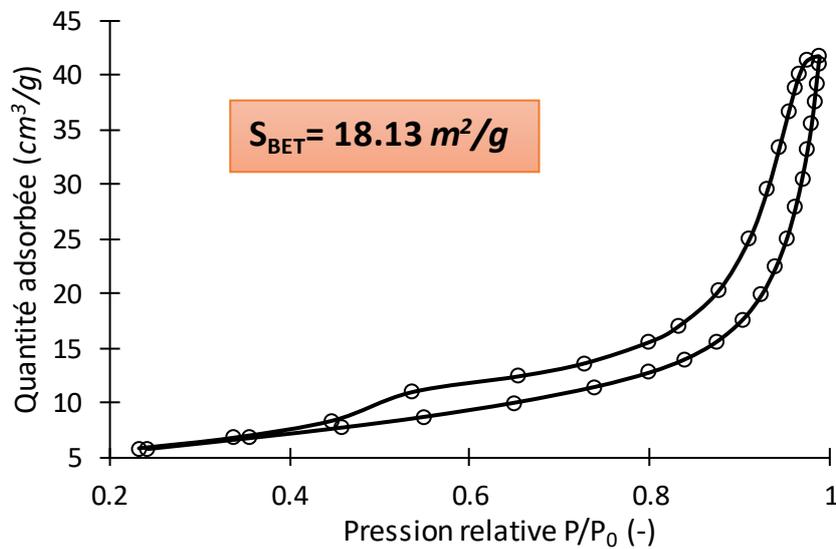


Figure II. 6 : Isotherme d'adsorption de l'azote (N₂) à 77K

La figure II. 6 montre une augmentation de volume de l'azote adsorbé avec l'augmentation de la pression relative, jusqu'à la saturation due à la condensation capillaire ce qui signifie que tous les pores sont remplis et saturés par l'adsorbat. Si on diminue la pression relative, on observe un phénomène d'hystérésis pour la courbe de désorption qui rejoint la branche d'adsorption pour une pression relative de 0.35.

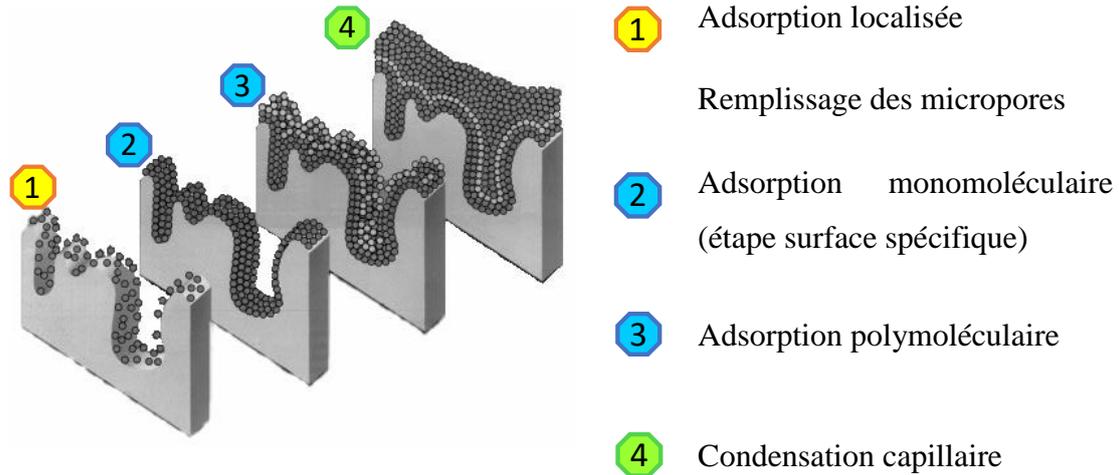


Figure II. 7 : Etape de remplissage des pores

La surface spécifique est mesurée à l'aide de l'isotherme d'adsorption à l'azote en se basant sur la méthode BET (Brunauer, Emmett et Teller) [43]. Cette méthode est essentiellement basée sur la fixation d'une couche de molécule adsorbées sur la surface des pores (figure II. 7). L'exploitation de cette courbe d'isotherme de sorption à l'azote permet d'obtenir une surface spécifique moyenne de $18.13 \text{ m}^2/\text{g}$. Cette grandeur représente la surface des pores, et une valeur de la surface spécifique plus grande, est en lien avec une porosité ouverte plus importante.

II.5.2. Porosité accessible à l'eau

La mesure de la porosité accessible à l'eau est réalisée suivant la procédure de l'AFPC-AFREM [145]. Au cours de l'essai, l'échantillon passe par quatre phases distinctes :

La phase 1 est le dégazage de l'échantillon au moyen du banc de saturation présenté dans la Figure II. 8. La mise sous vide est réalisée au moyen d'une pompe à vide capable de maintenir un vide absolu à l'intérieur du dessiccateur (pression proche de 2mm Hg) pendant 4 heures. Puis le récipient est rempli d'eau afin de saturer les échantillons tout en poursuivant le pompage pendant 24h pour maintenir l'enceinte à la vapeur d'eau saturante, ensuite l'ensemble est mis à pression atmosphérique pendant 24 heures.

La Phase 2 consiste à peser une première fois dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique, la masse de l'échantillon immergé M_{eau} est alors obtenue.

La phase 3 est de peser à l'air l'échantillon extrait de l'eau et légèrement essuyé pour obtenir la masse de l'échantillon saturé notée M_{air}

La phase 4 est la phase de séchage, l'échantillon est mis dans une étuve à une température de 105 °C jusqu'à ce que l'échantillon soit sec et que critère d'équilibre suivant soit vérifié :

$$\frac{\Delta m_{24h}}{m} \leq 0.1\% \quad \text{II. 1}$$

Où Δm_{24h} est la perte de masse entre deux pesées effectuées à 24 heures d'intervalle, et m sa masse à la première borne de l'intervalle. Après équilibre, la masse de l'échantillon sec M_{sec} est alors obtenue.

La porosité accessible à l'eau est calculée comme suit :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad \text{II. 2}$$

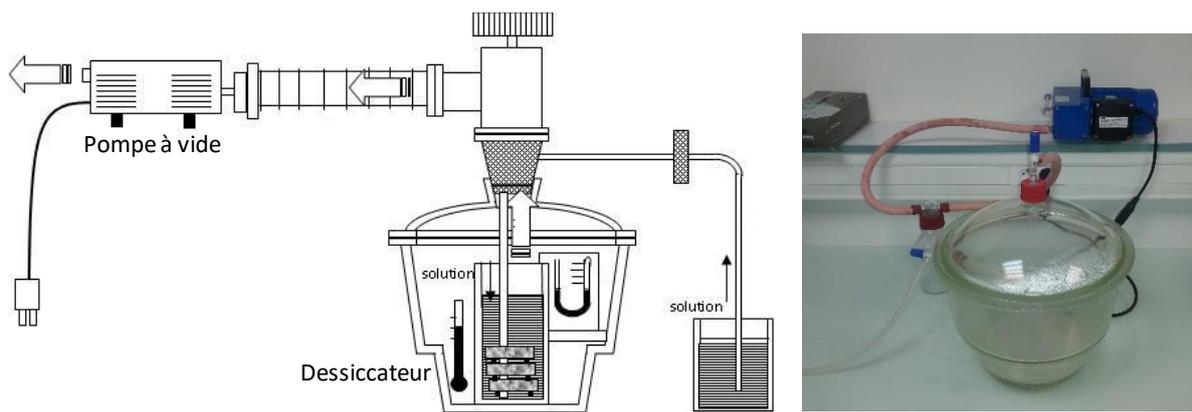


Figure II. 8 : Banc de saturation

Les essais sur le béton de chanvre sont réalisés à deux âges du matériau (30 et 60 jours). Les résultats de porosité accessible à l'eau et la teneur en eau maximale obtenus sont résumés dans la Figure II. 9, ils présentent la moyenne sur cinq mesures.

Le béton de chanvre étudié a donc une porosité moyenne élevée de l'ordre de 72.38%, et une teneur en eau maximale de 148.52%. On constate que la porosité à l'eau ainsi que la teneur en eau maximale diminuent en fonction de l'âge du matériau, cela est principalement due à la réaction d'hydrations du liant et à la formation de nouveaux hydrates qui modifient la microstructure du béton de chanvre. Dans la suite du chapitre les propriétés du béton de chanvre ont été évaluées en fonction de l'âge du matériau, ces résultats de porosité accessible à l'eau peuvent nous être utiles pour d'éventuelles justifications et explications.

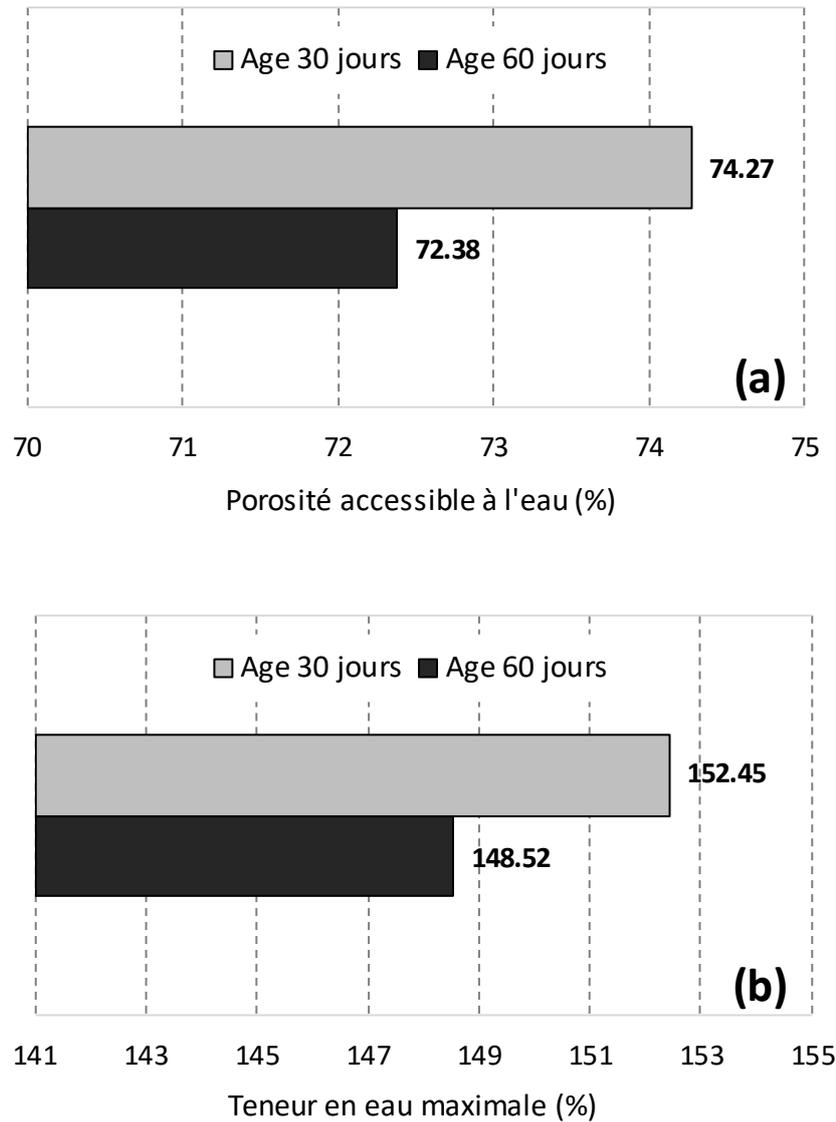


Figure II. 9 : Comparaison de : (a) porosité totale accessible à l'eau, (b) teneur en eau maximale à 30 et 60 jours

II.5.3. Porosité par intrusion de mercure

La porosimétrie par injection de mercure est l'une des techniques les plus utilisées pour déterminer la structure poreuse et ainsi que la caractérisation de microstructure des matériaux poreux. Cette technique délivre aussi des informations concernant la distribution du volume et de la taille des pores. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un porosimètre à mercure Micromeritics de type AutoPore III 9420 (Figure II. 10) pouvant atteindre une pression de 414 MPa. Ce dispositif permet de couvrir une gamme de pores allant de $0.003 \mu m$ à $360 \mu m$ de diamètre, et compte tenue de la difficulté d'un séchage préalable complet de l'échantillon sans en modifier la microstructure, cette technique tend à sous-estimer la porosité.



Figure II. 10 : Porosimètre à mercure Micrometrics-Autopore III 9420

L'essai consiste à sécher, préalablement les échantillons cubiques d'environ 15mm obtenue par sciage dans une étuve à 45°C jusqu'à stabilisation de leurs masses. Il s'agit ensuite, d'introduire progressivement du mercure (liquide non mouillant) sous pression dans la structure poreuse initialement vide. Puis le mercure est injecté dans les échantillons par paliers de pression jusqu'à l'équilibre. Ainsi, pour chaque palier de pression correspond un volume injecté. A partir de ce couple de mesures, nous pouvons remonter à toute sorte d'informations notamment le rayon des pores correspondant à chaque palier de pression et donc à la distribution de la taille des pores (supposés cylindriques) qui est basée sur l'équation de Washburn comme suit :

$$r_p = - \frac{2\sigma_{Hg} \cos \theta}{P_{Hg}} \quad \text{II. 3}$$

Où :

r_p [m] est le diamètre du pore, P_{Hg} [Pa] la pression exercée sur le mercure, σ_{Hg} [N/m] la tension superficielle de mercure ($\sigma_{Hg} = 0.480 \text{ N.m}^{-1}$ est la valeur couramment utilisée), enfin, θ l'angle de contact entre la surface solide et le mercure ($\theta = 130^\circ$ souvent recommandé pour des températures entre 20 à 25°C).

Le principal résultat de cette méthode est la distribution des pores et cela à partir d'une courbe caractéristique de l'essai $dV/d\log D = f(r_p)$. Elle traduit le volume de mercure injecté pour chaque rayon capillaire.

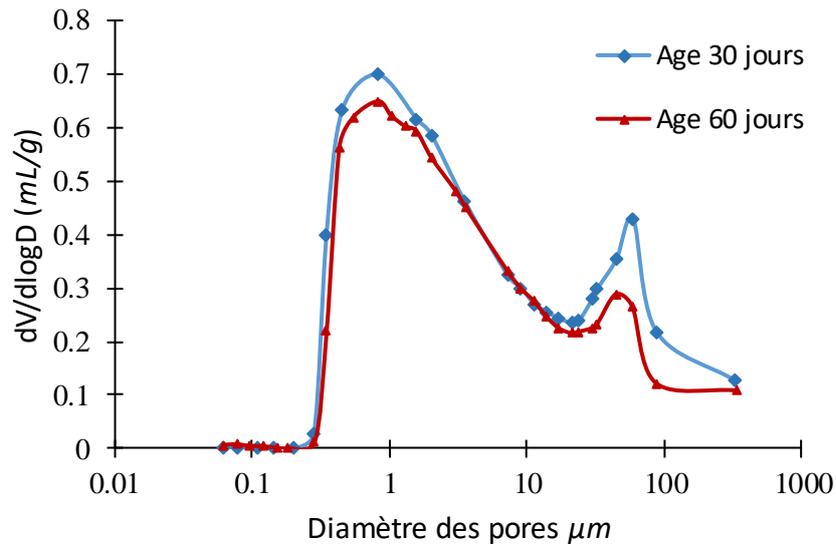


Figure II. 11 : Distributions de la taille des pores obtenues par intrusion au mercure à 30 et 60 jours d'âge

La figure II. 11 présente la distribution de la taille des pores du matériau étudié à 30 et 60 jours d'âge. Les courbes montrent que la distribution porale du béton de chanvre est bimodale, la taille des pores est comprise entre $0,34 \mu m$ et $330 \mu m$. On constate aussi deux catégories principales des pores : La première correspond à la porosité du liant et de la chènevotte, et la deuxième correspond à la porosité entre le liant et les fibres végétales (macro porosité).

La comparaison entre les deux courbes montre une légère diminution du ration $dV/dlogD$ à 60 jours. Cette diminution est principalement dû à la réaction d'hydratation du liant qui permet aux hydrates de former un réseau continu et se connecter davantage entre eux. Le vieillissement du béton de chanvre provoque une modification de sa structure interne et réduit sa porosité.

La porosimétrie au mercure est généralement assimilée à une méthode de détermination de la distribution des tailles de pores en raison de la sous-estimation de la porosité puisque cette technique ne couvre qu'une plage de diamètres de pores restreinte par rapport à la porosité accessible à l'eau. En effet, même au plus haute pression le mercure ne pénètre pas totalement dans tout l'espace poral. En outre, il y a l'effet « bouteille d'encre » qui a principalement pour résultat de sous-estimer les pores les plus fins [32,146,147].

II.6. Propriétés hydriques :

Dans cette partie du chapitre, les propriétés hydriques du béton de chanvre étudié ont été évaluées en fonction de l'âge du matériau. Nous nous intéressons principalement à l'étude des

isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau, la capacité de stockage d'humidité, et de la perméabilité à la vapeur d'eau.

II.6.1. Isotherme de sorption

Une augmentation de l'humidité relative de l'air au voisinage d'un matériau poreux engendre un échange d'humidité entre les deux milieux, et la masse du matériau augmente jusqu'à une valeur d'équilibre. Cette prise de masse est due au phénomène d'adsorption physique. Réciproquement, une baisse de l'humidité relative de l'air environnant entraîne une perte de masse apparente, due au phénomène de désorption. Cette variation de masse due à la fixation ou au départ de l'eau au sein du matériau peut être décrite par des courbes reliant la teneur en eau à l'équilibre en fonction de l'humidité relative pour une température fixée. Ces courbes appelées isothermes de sorption caractérisent la capacité d'un matériau à fixer l'humidité de l'air ambiant.

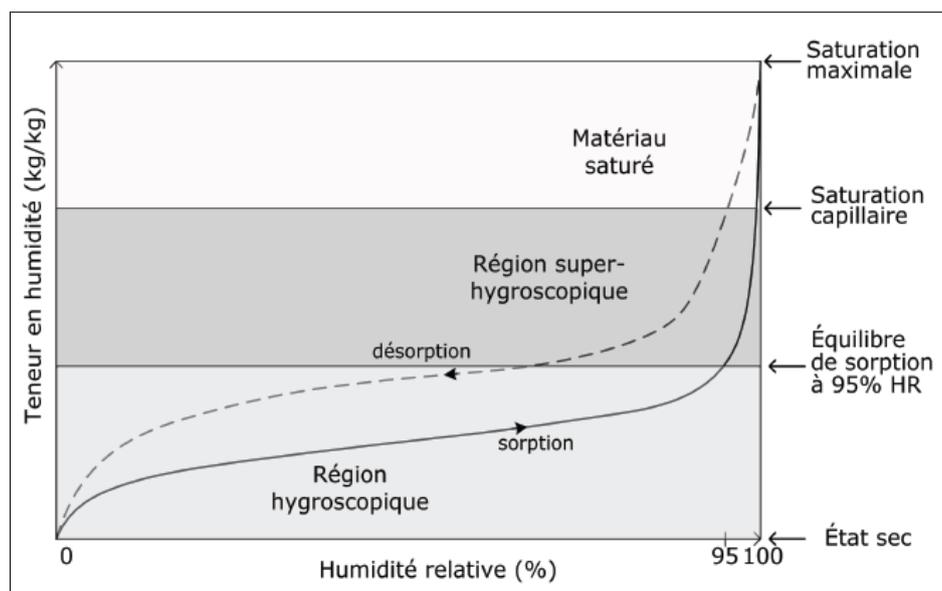


Figure II. 12 : Diagramme schématisé d'une courbe d'isotherme d'adsorption et de désorption [148]

La figure II. 12 présente un exemple d'une courbe d'isotherme d'adsorption et de désorption, l'ensemble de ces courbes est délimité en général en trois zones, chaque zone correspondant à un mode particulier de fixation d'humidité :

- **Domaine hygroscopique :** Les molécules d'eau sont liées aux parois des pores, d'abord en couche mono-moléculaire puis pluri-moléculaire.

- **Domaine super hygroscopique** : dans ce domaine l'eau occupe la majorité de l'espace poreux, où l'eau forme des capillaires entre les parois des pores, on parle alors de la condensation capillaire
- **Domaine saturé** : la teneur en eau augmente jusqu'à atteindre sa valeur de saturation maximale, où tout l'espace poreux est rempli et les déplacements d'humidité se font uniquement sous forme liquide

La méthode gravimétrique traditionnelle basée sur l'utilisation des solutions salines (ISO - 12571, 2000) [38] est trop longue pour obtenir la courbe d'isotherme d'adsorption et désorption. Pour un matériau type béton l'essai a duré environ deux années (Trabelsi, 2010) [149], pour cela plusieurs dispositifs expérimentaux d'évaluation des isothermes de sorption et désorption ont été développés dans le but de réduire le temps d'essai (deux semaines en moyenne). Ils sont principalement basés sur deux méthodes différentes : la méthode gravimétrique basée sur le suivi de la masse apparente de l'échantillon, et la méthode volumétrique basée sur la mesure du volume de la vapeur d'eau adsorbé ou désorbé par le matériau. Dans cette partie l'évaluation des isothermes d'adsorption et de désorption est basée sur une méthode volumétrique [150] en utilisant le dispositif "Belsorp Aqua3" (Figure II. 13).

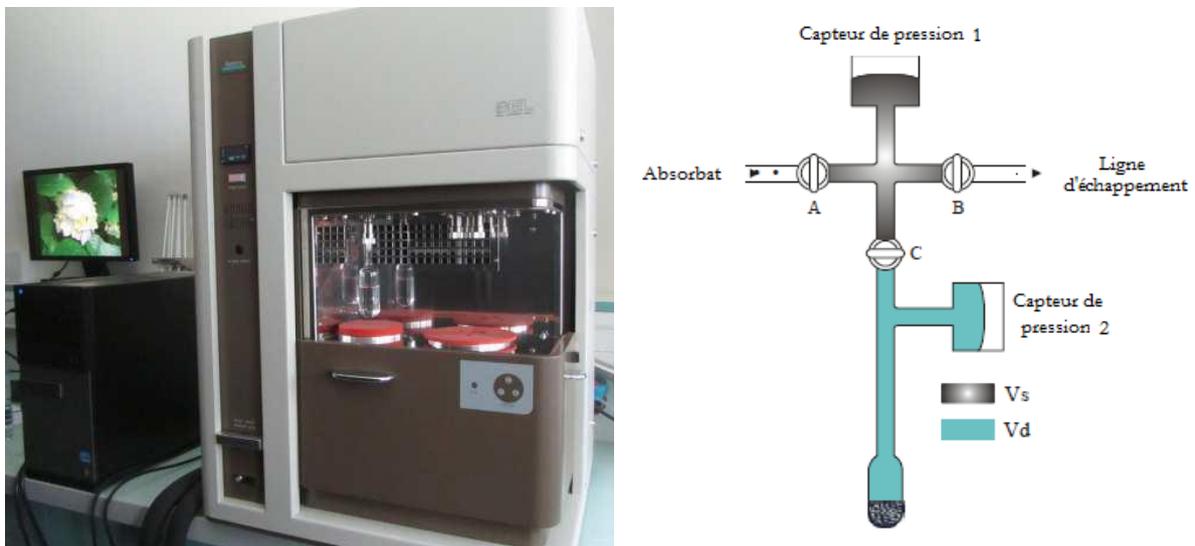


Figure II. 13 : Belsorp Aqua3 (à gauche) et son principe de fonctionnement (à droite)

Les échantillons ont été préalablement séchés en étuve à 40 °C, et placés dans les tubes porte échantillons, puis les échantillons ont été dégazés afin d'éliminer les impuretés (eau, molécules organiques) par mise sous vide et chauffage. Le montage est ensuite immergé dans un bain

parfaitement contrôlé en température. L'essai consiste à mesurer la variation du volume de la vapeur adsorbée ou libérée par un matériau moyennant l'utilisation du nombre de moles du gaz.

Le volume initial de la cellule est rempli d'un nombre de mole initial donné par la loi des gaz parfait. Après la détente du gaz dans la cellule contenant l'échantillon, ce dernier absorbe progressivement une partie du gaz injecté jusqu'à l'équilibre. Le nombre de moles restant dans la phase gazeuse est ensuite calculé connaissant la basse pression dans le système. Au final, la connaissance des températures, pressions et volumes permet de déduire la masse d'eau adsorbée par l'échantillon et de remonter ainsi à la variation de sa teneur en eau. Les différentes pressions de vapeur d'eau qui correspondent aux différentes humidités relatives permettent ainsi de tracer l'isotherme d'adsorption et de désorption.

Les essais d'isothermes d'adsorption/désorption ont été réalisés à une température constante de 25°C, et pour assurer une répétabilité des résultats, trois essais ont été réalisés pour chaque matériau testé. La Figure II. 14 représente les courbes d'isotherme d'adsorption/désorption obtenues à 25°C par la méthode volumétrique pour le béton de chanvre étudié après 7, 30 et 60 jours d'âge.

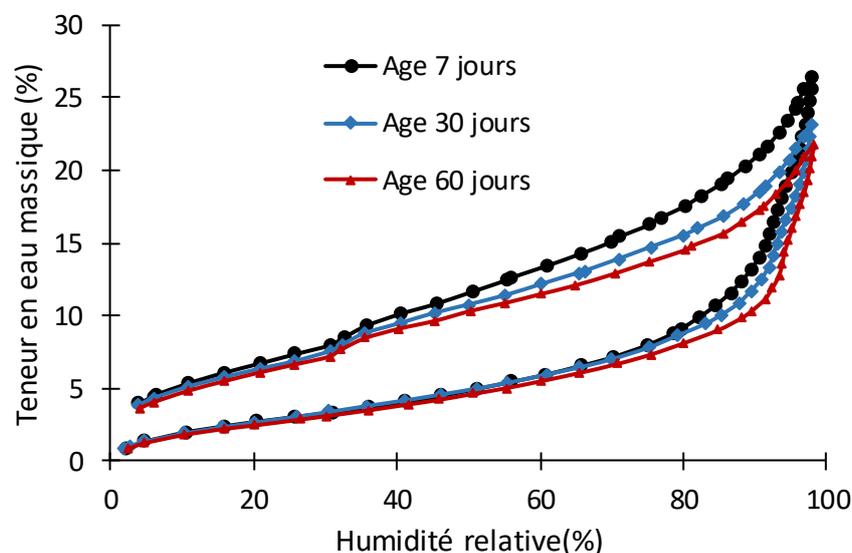


Figure II. 14 : Comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau à 25°C à 7, 30 et 60 jours d'âge

Cette courbe représente l'évolution de la teneur en eau massique du matériau en fonction de l'activité de l'eau ou l'humidité relative de l'air à l'équilibre. La teneur en eau augmente de façon progressive, et devient importante pour des humidités relatives élevées, dues au déclenchement de mécanismes de condensation capillaire. En effet, pour toutes les courbes obtenues la quantité d'eau fixée entre 0% et 80% d'humidité relative est à peu près 3 fois moins importante que celle

fixée entre 80% et 95% d'humidité relative. Il est remarqué aussi que les courbes d'isothermes d'adsorption obtenues présentent une hystérésis entre la sorption et la désorption qui s'étend aux plus basses pressions.

Les courbe d'isotherme d'adsorption et de désorption obtenue montre que le béton de chanvre a une grande capacité pour l'absorption d'eau, principalement en raison de sa porosité élevée et sa grande surface spécifique comme il est évoqué dans la partie précédente. Les isothermes de sorption obtenus sont de type II selon la classification de l'IUPAC [151], ce qui est cohérent avec la structure de la porosité du béton de chanvre [152].

La comparaison entre les courbes met en évidence l'effet de l'âge des matériaux sur les courbes d'isothermes de sorption. En effet, une différence a été observée entre les courbes aux différents âges, le taux d'adsorption et de désorption diminue avec l'âge du matériau. Par exemple, à 90% d'humidité relative, l'adsorption diminue de 11,5% entre 7 et 30 jours, et de 10% entre 30 et 60 jours. A jeune âge les hydrates de liant ne forment pas encore un réseau connecté, le comportement du béton de chanvre dans ce cas est proche de celui des particules de chanvre, qui peuvent absorber de très grandes quantités d'eau. Avec le temps, les hydrates se connectent ensemble et créer progressivement un réseau continu, ce qui réduit d'avantage la porosité du matériau et fait diminuer la capacité du béton de chanvre à stocké de l'eau.

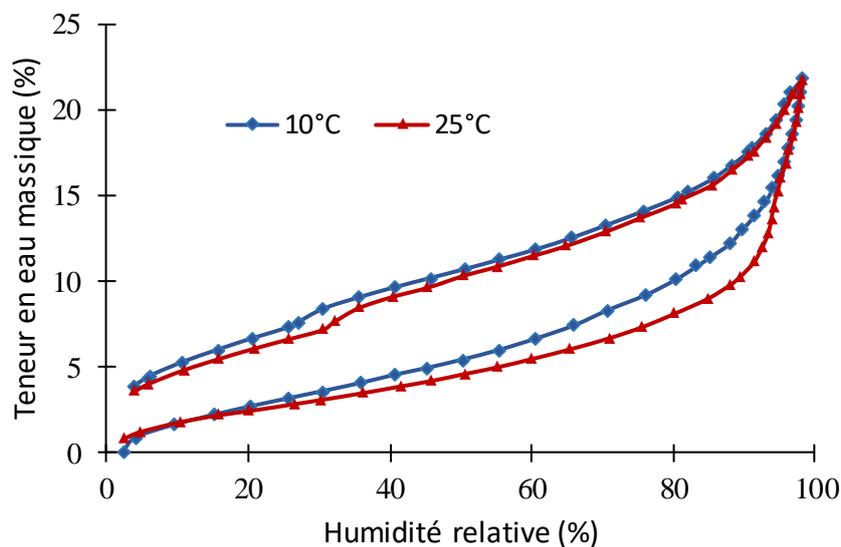


Figure II. 15 : Comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption du béton de chanvre en fonction de la température

L'effet de la température et du dosage en liant sur les isothermes d'adsorption et de désorption ont été étudié dans ce chapitre également. La Figure II. 15 illustre la comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption du béton de chanvre à deux températures différentes

(10°C et 25°C), la courbe montre un comportement similaire à celui existant dans les travaux de littérature [36,153]. Aux basses et moyennes humidités, la teneur en eau à l'équilibre diminue lorsque la température augmente pour une humidité relative donnée. Pour les fortes humidité relatives les teneurs en eau obtenues à 10°C et 25°C sont sensiblement proches.

La Figure II. 16 représente une comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption du béton de chanvre avec deux dosages en liants différents, le rapport L/C représente le dosage massique du liant sur celui de la chènevotte. On constate que, pour une même humidité relative, la teneur en eau à l'équilibre augmente avec la diminution du dosage en liant. Nous notons une tendance logique de ces courbes. En effet, la capacité d'absorption de l'eau de la chènevotte est plus importante que celle du liant. Donc la capacité d'adsorption de l'eau du matériau est proportionnelle au dosage en chènevotte.

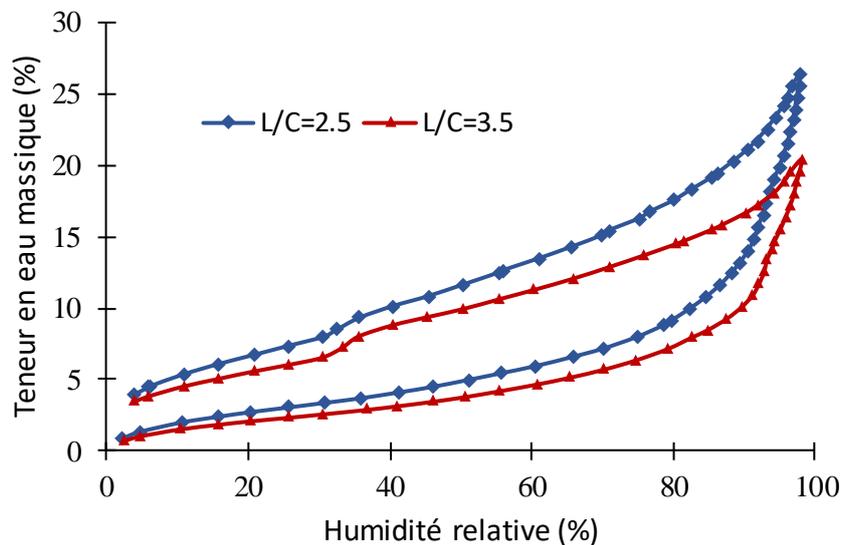


Figure II. 16 : Comparaison des isothermes d'adsorption et de désorption du béton de chanvre en fonction du dosage du liant

II.6.2. Modélisation des isothermes

Étant donné l'importance des isothermes de sorption pour l'étude du comportement des matériaux de construction, la modélisation de ces courbes d'isothermes a été réalisée en utilisant les modèles GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) et GDW (Generalised D'Arcy and Watt) [44], ce qui permet une meilleure interprétation des résultats expérimentaux. Les deux modèles cités (GAB et GDW) dérivant du modèle de Langmuir sont les modèles les plus utilisés dans la littérature, leurs expressions peuvent être écrites dans les formes suivantes (équations II. 4 et II. 5) :

GAB model :

$$U = \frac{m \cdot C \cdot K \cdot \varphi}{(1 - K \cdot \varphi)(1 - K \cdot \varphi + K \cdot C \cdot \varphi)} \quad \text{II. 4}$$

Où :

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

GDW model :

$$U = \frac{m \cdot K \cdot \varphi}{1 + K \cdot \varphi} \frac{1 - k(1 - \omega) \cdot \varphi}{1 + K \cdot \varphi} \quad \text{II. 5}$$

Où :

m : est la concentration des sites de surface primaires actifs, ω : le Taux des molécules d'eau adsorbées sur les sites primaires qui se transforment en sites secondaires d'adsorption, K et k : constantes cinétiques liées à l'adsorption sur les sites primaire et secondaire, respectivement.

Pour juger de la pertinence des résultats, un critère de performance R^2 est utilisé, qui représente le coefficient de détermination. Il mesure la qualité de l'ajustement des estimations de l'équation de régression.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (U_i - \hat{U}_i)^2}{\sum_i (U_i - \bar{U}_i)^2} \quad \text{II. 6}$$

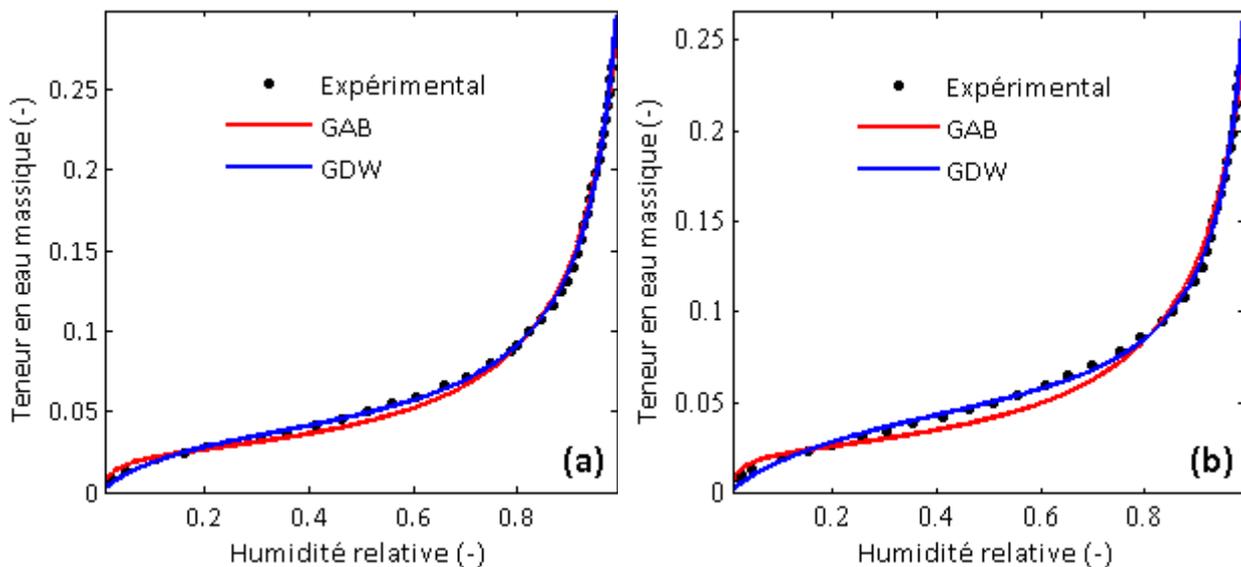
Où :

U_i : est la teneur en eau de la $i^{\text{ème}}$ mesure expérimentale [%], \hat{U}_i : la teneur en eau théorique [%], et \bar{U}_i : la moyenne des teneurs en eau mesurées [%].

Tableau II. 2 : Paramètres associés aux modèles GAB et GDW pour les différents matériaux étudiés

Age du matériau	Modèle	m	C	K	k	ω	R^2
7 jours	GAB	0.023	45.150	0.926	-	-	0.997
	GDW	0.044	-	6.679	0.943	0.476	0.999
30 jours	GAB	0.022	52.730	0.916	-	-	0.993
	GDW	0.060	-	3.820	0.953	0.266	0.998
60 jours	GAB	0.019	81.20	0.921	-	-	0.986
	GDW	0.068	-	2.722	0.964	0.187	0.997

Les figures II. 17 (a, b, et c) montrent les isothermes de la vapeur d'eau obtenues numériquement à partir des modèles GAB et GDW. Les différents paramètres de ces deux modèles ont été estimés par régression selon la méthode des moindres carrés non linéaire, et récapitulés ainsi que le critère de performance dans le tableau II. 2. On peut noter que les deux modèles reproduisent parfaitement le comportement de sorption du matériau étudié (figure), mais le modèle GDW est le plus approprié pour reproduire l'isotherme de sorption déterminé expérimentalement du béton de chanvre pour les trois âges testés.



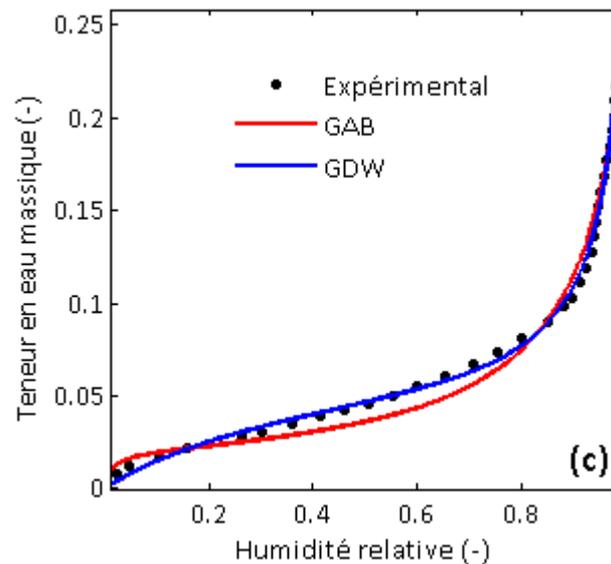


Figure II. 17 : Isotherme de sorption du béton de chanvre obtenu par les modèles GAB et GDW, à (a) 7 jours, (b) 30 jours et (c) 60 jours

II.6.3. Capacité de stockage d'humidité

Ces courbes d'isothermes nous permettent de déduire la capacité de stockage d'humidité du béton de chanvre, cette propriété constitue un paramètre d'entrée essentiel des modèles de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité. Mathématiquement la capacité de stockage d'humidité (équation II. 7) est définie par la pente de la courbe d'isotherme d'adsorption d'eau [49]:

$$C_m = \frac{\partial u}{\partial \varphi} \quad \text{II. 7}$$

Où :

C_m est la capacité de stockage d'humidité [–], u la teneur en eau massique du matériau [kg/kg], et φ l'humidité relative [%].

Les résultats de l'évolution de la capacité de stockage d'humidité en fonction de l'âge sont présentés dans la figure II. 18. L'analyse des résultats donnés dans la figure, montre une augmentation importante de C_m à partir des humidités relatives supérieures à 80%. Ce même comportement est observé pour les différents âges du matériau (7, 30 et 60 jours). Par conséquent, il est nécessaire de considérer l'évolution de la capacité de stockage de l'humidité en fonction de l'humidité relative lors de la modélisation des transferts hygrothermiques, en

particulier dans les zones d'humidité relative élevée. Il est également montré que la valeur C_m diminue avec le vieillissement du matériau.

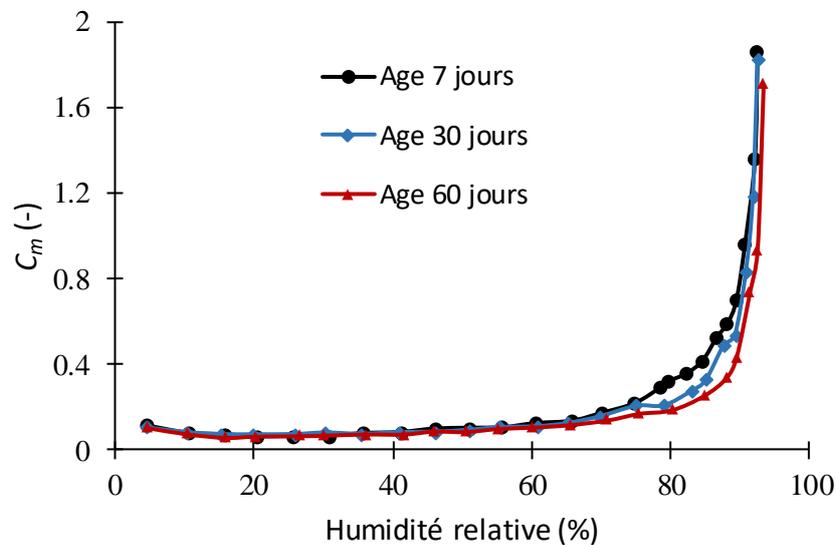


Figure II. 18 : Comparaison de la capacité de stockage d'humidité à 7, 30 et 60 jours à 25 ° C

II.6.4. Courbe de rétention d'eau

L'isotherme d'adsorption et de désorption déterminée par le dispositif Belsorp Aqua3 nécessite d'être complétée dans la région saturée, pour une meilleure description du comportement hydrique du béton de chanvre étudié. En effet la limitation de la technique volumique utilisée est due à l'imprécision des capteurs dans cette zone. Un essai de rétention d'eau est alors mené pour mieux appréhender le comportement hydrique du matériau à très fortes humidités relatives dans la zone saturée. La courbe de rétention d'eau traduit la capacité du matériau à retenir l'eau, et présente la relation entre la teneur en eau à l'équilibre du matériau et la pression capillaire dans un pore.

Pour déterminer cette courbe de rétention d'eau, nous avons utilisé la méthode d'extraction par presse à membrane par le biais de l'extracteur à membrane (voir Figure II. 19). Ce dispositif expérimental est un extracteur 10 MPa modèle 1020 de Soil-Moisture Equipment Corp (USA). Les membranes de cellulose utilisées (modèle numéro 1041D12) sont constituées de lames en cellulose régénérée avec une épaisseur de 20 μm et un rayon de pores de 2,4 nm.



Figure II. 19 : Extracteur à membrane (modèle 10120 de Soil - Moisture Equipment Corp)

Le protocole expérimental consiste à immerger la membrane dans l'eau distillée au moins 30 minutes avant le lancement de l'essai. Ensuite, les échantillons initialement saturés sous vide sont posés sur la membrane microporeuse en cellulose humide dans une enceinte dans laquelle on injecte de l'azote sous pression : la pression appliquée est l'équivalent de la pression capillaire imposée à l'échantillon. Dès que la pression à l'intérieur de la chambre augmente et dépasse la pression atmosphérique, l'excès d'eau est évacué à travers le tube sous l'extracteur jusqu'à l'équilibre. Une fois le régime permanent est atteint, les échantillons sont récupérés et pesés, puis séchés à 105°C pour déterminer leurs masses sèches. La teneur eau pour une pression donnée est ainsi calculée.

La figure II. 20 représente la courbe de rétention d'eau obtenue, elle exprime l'évolution de la teneur en eau à l'équilibre en fonction de la pression capillaire. La courbe montre que la teneur en eau du matériau étudié est légèrement sensible au changement de la pression capillaire. En effet, la teneur en eau diminue avec l'augmentation de la pression capillaire appliquée.

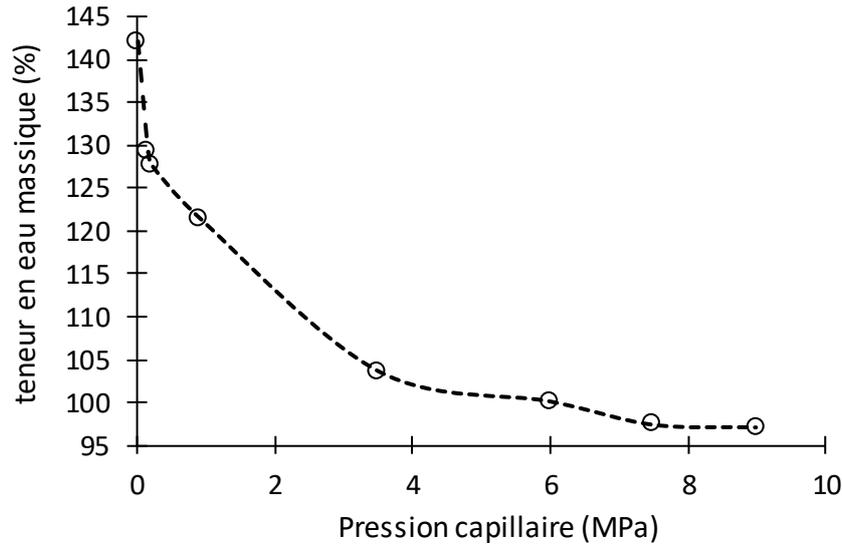


Figure II. 20 : Courbe de rétention d'eau du béton de chanvre

II.6.4.1. Relation entre la pression capillaire et l'humidité relative

Les résultats d'essai de courbe de rétention d'eau viennent compléter la courbe d'isotherme d'adsorption d'eau dans la zone saturée et nous éclaircir sur le comportement hydrique du matériau dans cette zone. De plus, les matériaux de construction sont exposés aux sollicitations hydriques de manière continue (humidité relative variable). Il est alors nécessaire de faire un changement de variable et passer de la pression capillaire à l'humidité relative ambiante en utilisant la loi de Kelvin. Elle est définie par une des relations fondamentales de la thermodynamique, elle permet de lier l'humidité relative à la pression capillaire :

$$P_c = -\frac{RT\rho_l}{M} \ln(\varphi) \quad \text{II. 8}$$

Avec :

$P_c [Pa]$: est la pression capillaire ; $\rho_l [kg/m^3]$: est la masse volumique de l'eau ; $\varphi [-]$: est l'humidité relative, $M [kg/mol]$: est la masse molaire de l'eau ($M = 18 g/mol$), $R [J/mol.K]$: est la constante des gaz parfaits ($R = 8.31443 J/mol.K$), et enfin $T [K]$: est la température absolue.

D'où l'expression de l'humidité relative est donnée par :

$$\varphi = \exp\left(-\frac{P_c M}{RT\rho_l}\right) \quad \text{II. 9}$$

Tableau II. 3 : Valeurs de la succion et de l'humidité relative issues de la relation de Kelvin

Pression capillaire (MPa)	Humidité Relative (%)
0	100
0.15	99.89
0.2	99.85
0.9	99.34
3.5	97.47
6	95.70
7.5	94.66
9	93.62

Le Tableau II. 3 donne les valeurs de la succion et les hautes humidités relatives correspondantes issues de la loi de Kelvin. La figure II. 21 présente les teneurs en eau du matériau testé pour des hautes humidités relatives. La comparaison de ces résultats avec les courbes d'isothermes d'adsorption et de désorption obtenues par le Belsorp Aqua3 présentées dans la figure II. 14 montre une augmentation brusque de la teneur en eau. De plus, cette figure montre que dans cette zone de très hautes humidités relatives, la teneur en eau augmente même pour des faibles variations d'humidité relative.

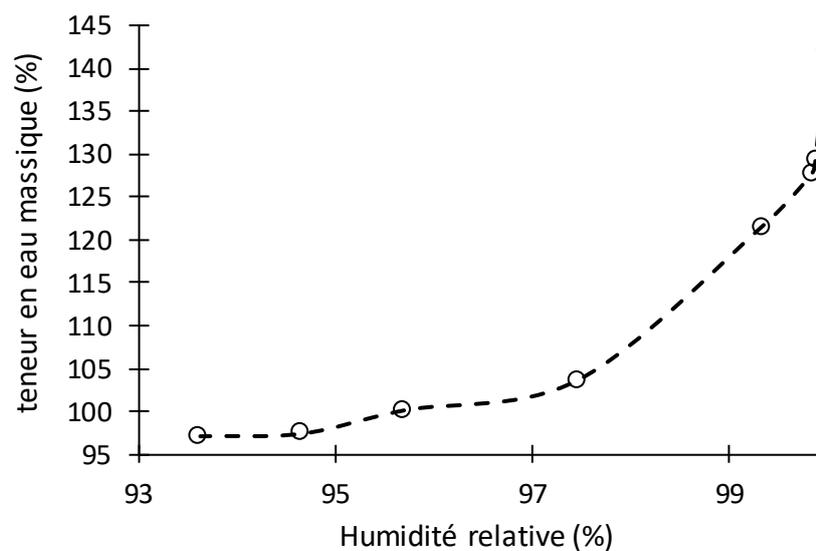


Figure II. 21 : Evolution de la teneur en eau en fonction des très hautes l'humidités relatives

II.6.5. Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur est une propriété essentielle dans la caractérisation hydrique des matériaux de construction, elle constitue un paramètre d'entrée très important des modèles de prédiction des transferts de chaleur et d'humidité. Elle donne une information sur la migration d'humidité dans ces matériaux, qui est généralement attribuée à un processus de diffusion de vapeur. Cette propriété dépend de la nature du matériau et de la pression de vapeur appliquée sur l'échantillon [154]. En revanche l'influence de l'humidité relative est peu observée pour les matériaux non-hygroscopiques [155]. De plus la température a une influence significative sur la perméabilité à la vapeur [41,156,157]. Dans cette partie, la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre est évaluée en fonction de l'âge du matériau, et pour deux hygrométries différentes (coupelle humide et coupelle sèche).

La perméabilité à la vapeur est évaluée par la méthode de la coupelle en utilisant la norme NF EN ISO 12572 [158]. Cette grandeur est mesurée dans des conditions isothermes, en imposant de part et de l'autre de l'échantillon une pression de vapeur d'eau fixe, ce qui engendre un flux de vapeur déterminé par l'exploitation de la loi de Fick à l'équilibre. La pression de vapeur dans la coupelle est régulée à l'aide des solutions salines.

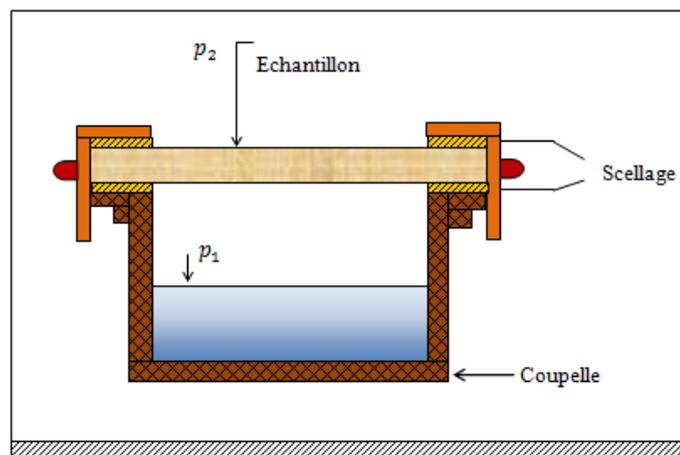


Figure II. 22 : Schéma descriptif de la coupelle

L'essai de mesure de taux de transmission de la vapeur d'eau est réalisé en utilisant le dispositif GINTRONIC Gravitest (Figure II. 23). Cet appareil est une enceinte climatique où la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air sont contrôlées. L'enceinte est réglée à une température de 23°C et une humidité relative de 50%. L'humidité relative à l'intérieur de la coupelle est assurée par une solution saline saturée de nitrate de potassium (KNO_3) pour une coupelle humide (93% : wet cup), et par le gel de silice pour une coupelle sèche (3% : dry cup).

Le Gravitest est d'une capacité de six coupelles dont une coupelle témoin et dispose d'un système de pesage automatique.

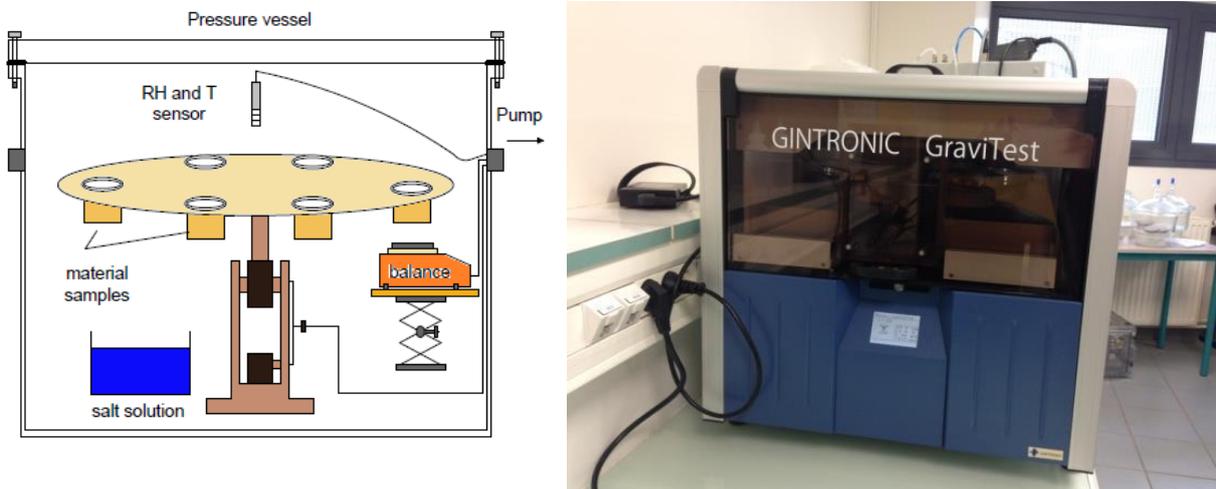


Figure II. 23 : Dispositif Gintronic-Gravitest et son principe de fonctionnement

Les masses de chaque coupelle sont mesurées à intervalle de temps réguliers jusqu'à la vérification du critère d'équilibre. Le suivi gravimétrique de la coupelle permet de déterminer la variation de masse au cours du temps. Cette variation est exprimée par la relation suivante (équation II. 10) :

$$G_{12} = \frac{m_1 - m_2}{t_1 - t_2} \quad \text{II. 10}$$

Avec G_{12} [kg/s] représentant le taux de variation massique et m_1 et m_2 [kg] sont respectivement les masses de la coupelle correspondantes à des temps successifs t_1 et t_2 [s].

L'essai se termine lorsque cinq mesures successives de G_{12} atteint une valeur comprise entre $\pm 5\%$ de G , avec G la moyenne de cinq déterminations successives pour chaque coupelle. La densité du flux de vapeur d'eau est ensuite donnée par :

$$j_v = \frac{G}{A} \quad \text{II. 11}$$

Où :

j_v [kg/m²s] est densité du flux de vapeur d'eau et A [m²] est la surface de l'échantillon.

La variation de masse est représentée en fonction du gradient de pression de vapeur d'eau imposé. L'utilisation de la loi de diffusion de Fick nous permet alors de définir la perméabilité à la vapeur d'eau telle que :

$$\delta_p = j_v \frac{e}{\Delta p_v} \quad \text{II. 12}$$

Avec :

δ_p [$kg/m.s.Pa$] est la perméabilité du matériau à la vapeur d'eau, e [m] est l'épaisseur de l'échantillon et Δp_v [Pa] est le gradient de pression de vapeur d'eau.

Pour les matériaux poreux, la perméabilité à la vapeur d'eau donnée par l'équation II. 12 est valable que dans le cas où un mélange parfait de l'air humide est considéré sur les deux faces de l'échantillon. Ce qui est difficile à réaliser expérimentalement. De ce fait une correction de cette valeur de perméabilité à la vapeur d'eau est nécessaire. La Figure III. 24 résume les résistances prises en compte dans la correction de la perméabilité à la vapeur d'eau. Par conséquent, en tenant compte de la résistance des couches aux limites et couche d'air dans la coupelle, l'expression de la perméabilité à la vapeur devient :

$$\delta_v = \frac{e}{\frac{\Delta p_v}{j_v} - (Z_{air} + Z_{s,int} + Z_{s,ext})} \quad \text{II. 13}$$

δ_v [$kg/m.s.Pa$] est la perméabilité à la vapeur d'eau réelle, $Z_{air} = d/\delta_a$ [s/m] la résistance à la vapeur d'eau dans la couche d'air séparant la solution saline et le matériau, avec d [m] l'épaisseur de la couche d'air. $Z_{s,int/ext} = 1/h_{mint/ext}$ [s/m] représente la résistance à la diffusion surfacique de la vapeur d'eau avec h_m [$kg/m^2.s.Pa$] le coefficient de transfert massique par convection, δ_a [$kg/m.s.Pa$] est la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air donnée par :

$$\delta_a = \frac{2,306.10^{-5}P_0}{R_v.T.P} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad \text{II. 14}$$

Avec :

T [K] est la température d'essai, $R_v = 462$ [N.m/Kg.K] constante des gaz de la vapeur d'eau [158], P_0 [Pa] pression atmosphérique normale et P [Pa] pression atmosphérique au moment de l'essai.

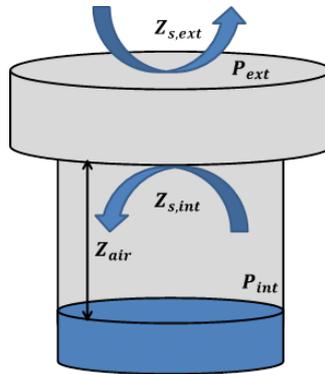


Figure II. 24 : Représentation des résistances à la vapeur d'eau introduites dans la méthode de la coupelle

Dans notre Cas : $\delta_a = 1,96 \cdot 10^{-10}$ kg/m.s.Pa. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau μ a été ainsi calculé comme suit :

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_v} \quad \text{II. 15}$$

La taille des échantillons cylindriques testés est de 8 cm de diamètre avec une épaisseur qui varie entre 1 et 3 cm. Le suivi du flux massique des échantillons testés est représenté dans la Figure II. 25.

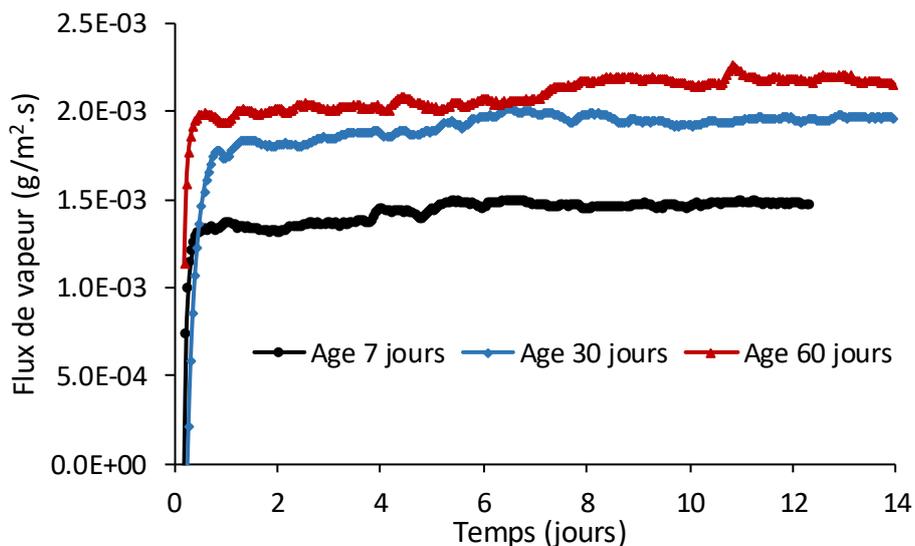


Figure II. 25 : Evolution du flux de vapeur en fonction du temps

Il y a ainsi un premier régime transitoire suivi d'un régime permanent. Ce dernier est établi lorsque le critère d'équilibre défini auparavant est atteint. Les perméabilités à la vapeur d'eau moyennes ainsi que le facteur de résistance à la vapeur d'eau du béton de chanvre à différents âges du matériau étudié sont résumées dans la figure II. 26.

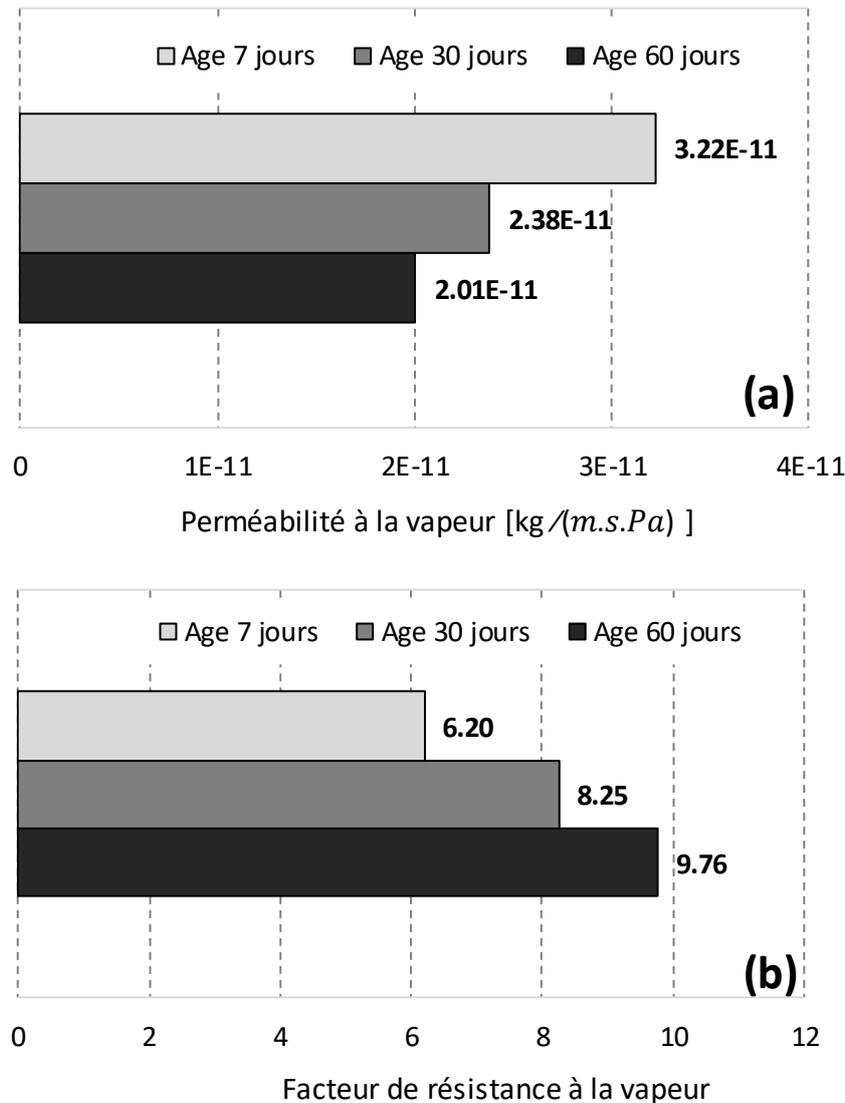


Figure II. 26 : Valeurs moyennes des différents paramètres du béton de chanvre en fonction de l'âge (a) perméabilité à la vapeur d'eau, (b) facteur de résistance à la vapeur d'eau

Les résultats obtenus (Figure II. 26) montrent que ces grandeurs caractérisant la diffusion de la vapeur d'eau dans le béton de chanvre sont élevées, ce qui donne le caractère respirant à ce matériau. On constate aussi une diminution de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre avec l'âge, ce qui fait par conséquent augmenter le facteur de résistance à la vapeur d'eau. Cette différence de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de l'âge est

principalement dû à la réaction d'hydratation, qui affecte la porosité et la microstructure du matériau.

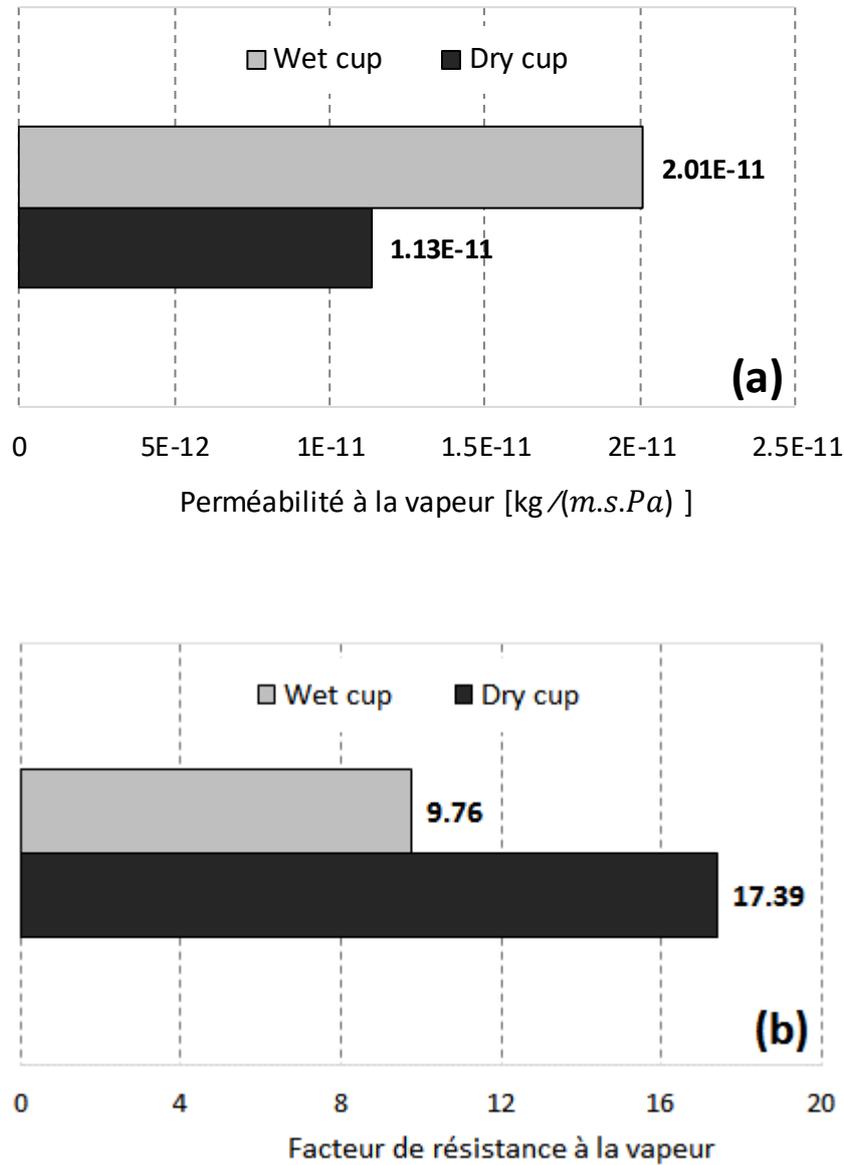


Figure II. 27 : Comparaison entre la coupelle humide et la coupelle sèche à 60 jours d'âge (a) perméabilité à la vapeur d'eau, (b) facteur de résistance à la vapeur d'eau

La figure II. 27 représente une comparaison entre la perméabilité à la vapeur d'eau à des hygrométries de 50% à 93% (wet cup) et 50% -3% (dry cup). De ces résultats, nous remarquons que la valeur de la perméabilité à la vapeur d'eau augmente avec l'augmentation du gradient d'humidité. un comportement similaire est trouvé dans la littérature pour d'autres matériaux [155,159].

Nous notons une tendance logique de ces paramètres en fonction de l'humidité relative. En effet, pour des faibles teneurs en eau le transfert d'humidité se fait par diffusion de vapeur, par

la suite lorsque la teneur en eau augmente l'humidité se diffuse par des mécanismes de condensation-évaporation aux interfaces liquide-vapeur.

II.7. Propriétés thermiques

Le béton de chanvre est un matériau poreux qui se compose généralement de trois phases : la matrice solide, liquide et enfin une phase gazeuse qui est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Ces différentes phases sont le siège de multiples phénomènes de transport telle que les transferts de chaleur. Cette partie du chapitre est consacrée à l'étude des propriétés thermiques du béton de chanvre, il s'agit principalement de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique. Comme les enveloppes des bâtiments sont exposées aux variations de température et d'humidité relative, l'effet de la température et d'humidité sur les propriétés thermiques a été étudié. De plus ces deux propriétés ont été évaluées aussi en fonction de l'âge du matériau.

II.7.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique représente une propriété intrinsèque du matériau, et elle présente son aptitude à se laisser traverser par la chaleur. Elle est une grandeur importante qui caractérise le comportement thermique du matériau, ainsi sa capacité isolante.

Les techniques permettant de mesurer la conductivité thermique des matériaux poreux de construction peuvent être classées en deux catégories :

- Les méthodes en régime permanent, telle que la méthode de la plaque chaude gardée. Le principe repose sur la mesure de la conductivité thermique, après l'établissement du régime permanent suite à l'application d'un gradient thermique.
- Les méthodes en régime transitoire, telle que la méthode flash, à l'inverse de celles en régime permanent où seule la conductivité thermique est estimée, permettent de retrouver plusieurs paramètres : conductivité, diffusivité et effusivité.

Dans ce travail, la conductivité thermique est mesurée en utilisant la méthode normalisée de la plaque chaude gardée conformément aux normes EN 12664 [160] et EN 12667 [161]. Le principe du dispositif λ -Meter EP 500^e (Figure II. 28) est de reproduire les conditions de transfert de chaleur à travers l'échantillon de surface $15 \times 15 \text{ cm}^2$ dans notre cas, et d'épaisseur 4 cm par deux plans parallèles.

L'échantillon est placé entre une plaque froide et une plaque chaude et est soumis à un gradient de température fixé. Un anneau de garde autour de la zone de mesure assure le transfert

unidirectionnel à travers l'épaisseur de l'échantillon. L'épaisseur et la surface de l'échantillon sont mesurées par le Lambda-meter, et la conductivité thermique est alors directement calculée à partir de la puissance électrique fournie selon la relation suivante :

$$\lambda = \frac{Q \cdot e}{\Delta T \cdot A} = \frac{U \cdot I \cdot e}{\Delta T \cdot A} \quad \text{II. 16}$$

λ [$W/m \cdot K$] est la conductivité thermique, e [m] l'épaisseur de l'échantillon, A [m^2] surface de l'échantillon, ΔT [K] différence de température entre les deux plaques, et Q [W] = U [V] . I [A] est la puissance électrique.

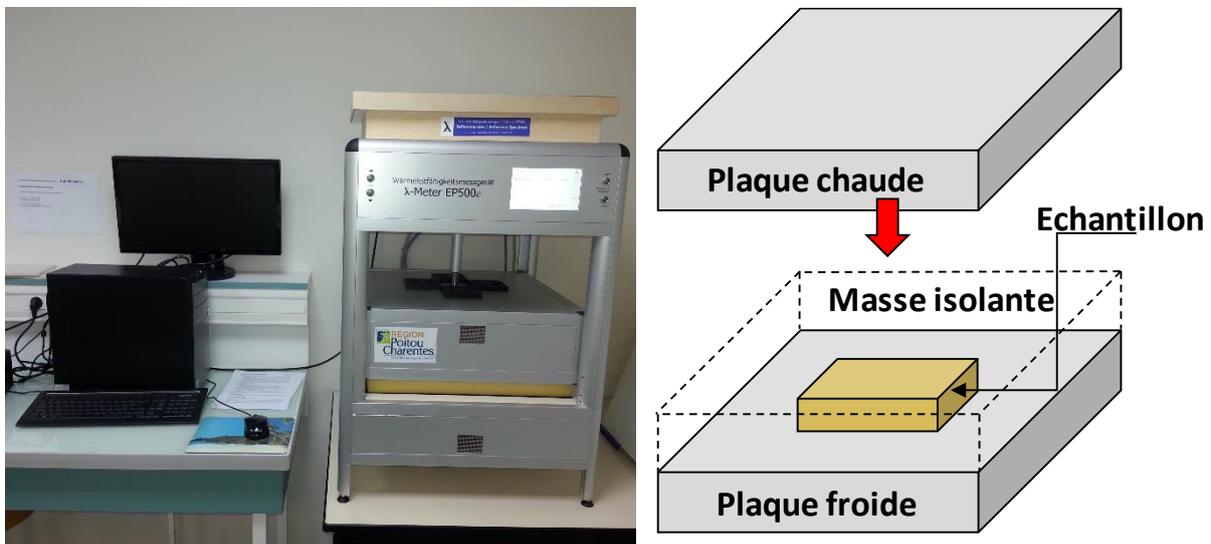


Figure II. 28 : Lambda-meter Ep 5000e

Dans un premier temps la conductivité thermique est évaluée en fonction de la température aux différents âges du béton de chanvre, par la suite l'effet de l'humidité sur la conductivité thermique est considéré. Pour montrer de façon extrême cet effet de l'humidité sur la conductivité thermique, l'échantillon testé est préalablement saturé dans l'eau par la méthode décrite dans la partie (Section II. 5. 2), puis séché progressivement. La conductivité thermique est ainsi mesurée pour chaque teneur en eau, en enveloppant l'échantillon dans un film extensible afin d'éviter toute évaporation de l'eau lors de la mesure.

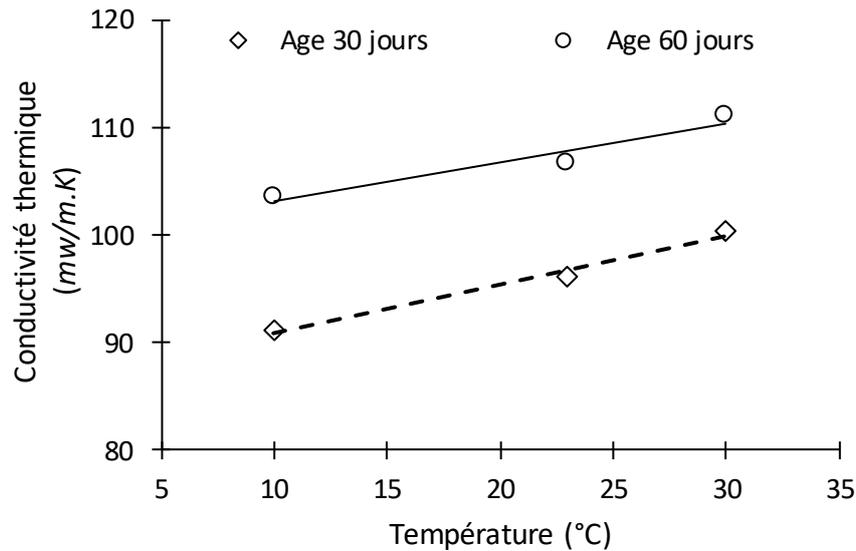


Figure II. 29 : Evolution de la conductivité thermique du béton de chanvre en fonction de la température à 30 et 60 jours d'âge

La figure II. 29 montre l'effet de la température sur la conductivité thermique du béton de chanvre étudié, cette propriété a été mesurée pour trois températures différentes (10, 23 et 30 ° C) après un séchage à 40 ° C jusqu'à stabilisation de masse. On remarque que la conductivité thermique du matériau évolue en fonction de la température d'essai, et augmente de manière linéaire. Ces résultats confortent ceux de la littérature [162], où il a été montré que la conductivité thermique est linéairement proportionnelle à la température. De plus, la conductivité thermique est directement liée à la structure poreuse du matériau, ce qui explique l'augmentation de cette propriété avec l'âge du matériau. Une augmentation de la conductivité thermique de 11% a été observée entre 30 et 60 jours. En outre, plusieurs travaux fournis par la littérature montrent également l'effet de l'état hydrique du matériau sur la conductivité thermique [163]. Ces faibles valeurs de conductivité thermique font de ce béton chanvre léger un très bon isolant thermique.

La figure II. 30 représente l'évolution de la conductivité thermique du béton de chanvre étudié en fonction de sa teneur en eau. Les résultats illustrent bien l'effet notable de l'état hydrique du matériau sur les valeurs des conductivités thermiques. En effet, une augmentation de conductivité thermique de 125% entre les états sec et saturé a été obtenue. Comme l'état sec est toutefois un état irréaliste car les matériaux de construction sont souvent exposés à des ambiances avec un taux d'hygrométrie variables. C'est pourquoi il est nécessaire de prendre en considération la variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité relative lors de la modélisation des transferts de chaleur et d'humidité.

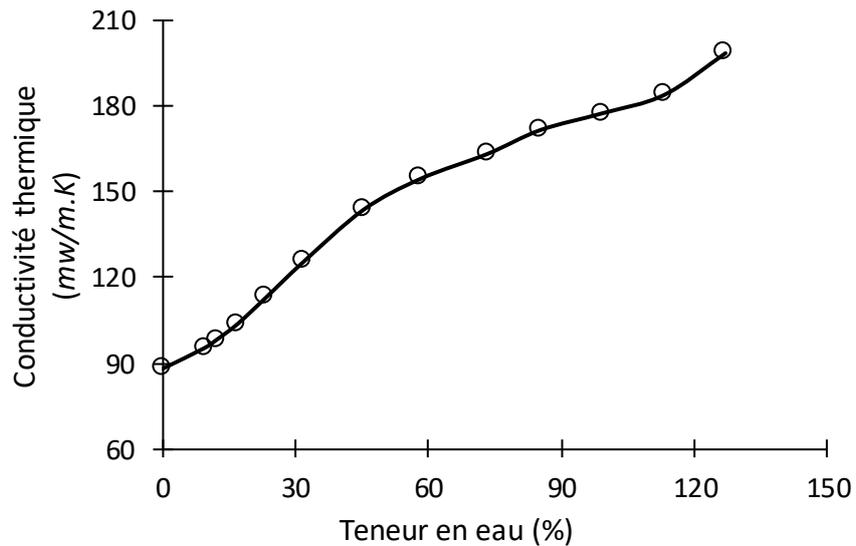


Figure II. 30 : Évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau du béton de chanvre à 23°C et à 30 jours d'âge

II.7.2. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique présente également une donnée d'entrée essentielle des modèles de transfert de chaleur et d'humidité, sa détermination est nécessaire donc pour la modélisation et l'étude du comportement des matériaux poreux de construction. Par définition la chaleur spécifique est la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température d'un kilogramme de matériau d'un degré. Le calorimètre est un outil indispensable dans la caractérisation des matériaux. Dans le cadre de cette étude la chaleur spécifique est mesurée par le calorimètre Calvet BT 2.15 (figure II. 31). L'avantage de cet appareil réside dans le fait que le capteur 3D Calvet entoure entièrement l'échantillon et la totalité de la chaleur émise est ainsi mesurée.



Figure II. 31 : Calorimètre CALVET BT 2.15

Le calorimètre est essentiellement composé d'une enceinte cylindrique parfaitement étanche, contenant une cellule de mesure dans laquelle l'échantillon à étudier est placé, et une cellule de référence contenant un produit inerte thermiquement. Chaque cellule possède une douille et un fluxmètre tridimensionnel. Le fluxmètre est une série d'anneaux de thermocouples permettant de détecter les flux de chaleur. La figure II. 32 représente une vue en coupe du dispositif de mesure. Le calorimètre est connecté à un cryostat haute performance pour réguler sa température intérieure. Une canalisation de pompage est aussi reliée au calorimètre afin d'assurer la mise sous vide de l'enceinte calorimétrique. Comme la conductivité thermique, la chaleur spécifique est aussi évaluée en fonction de la température de l'essai, l'âge du matériau et son état hydrique. L'échantillon est de forme cylindrique de 1 cm de diamètre et 5 cm de hauteur, plusieurs mesures ont été réalisées sur le même échantillon en commençant d'un état saturé jusqu'à un état sec du matériau afin suivre l'évolution de la chaleur spécifique en fonction de la teneur en eau. L'essai est réalisé avec une rampe de température de -15°C jusqu'à 35°C . La vitesse de chauffe est de $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Les cellules utilisées sont des cellules standards, elles sont conçues spécialement pour les études de solides ou de produits pulvérulents à faible tension de vapeur avec une pression interne allant jusqu'à 500 kPa. La quantité de chaleur échangée par l'échantillon est mesurée par le biais du fluxmètre 3D qui permet de remonter à la chaleur spécifique du béton de chanvre.

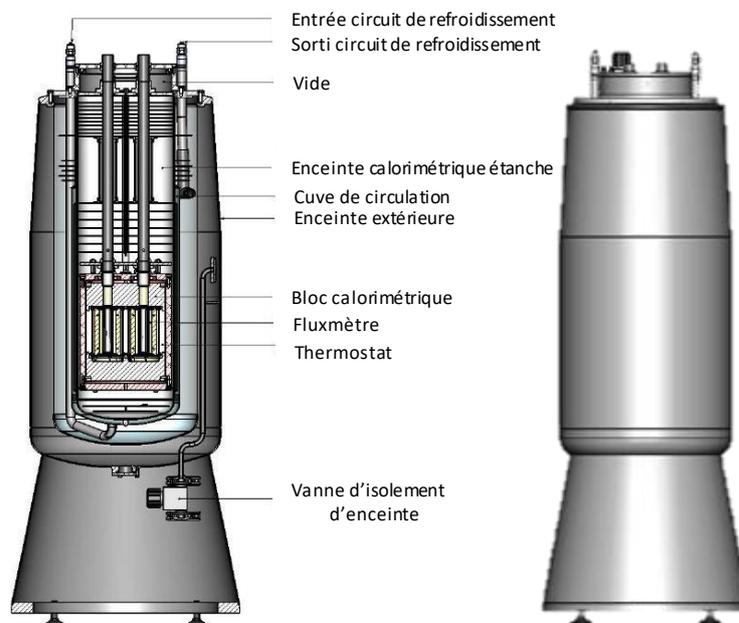


Figure II. 32 : Coupe du Calorimètre CALVET BT 2.15

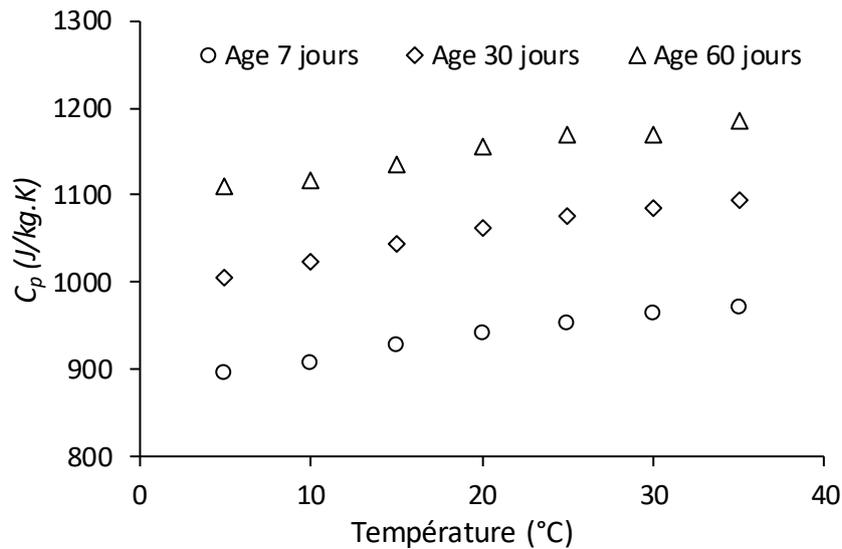


Figure II. 33 : Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la température du béton de chanvre à 7, 30 et 60 jours

La figure II. 33 montre l'évolution de la chaleur spécifique du béton de chanvre étudié en fonction de la température à 7, 30 et 60 jours après séchage à 40 ° C jusqu'à la stabilisation de la masse. Les résultats montrent une évolution de la chaleur spécifique en fonction de la température. En effet, la chaleur spécifique augmente d'environ 9% entre 5 et 35 ° C.

En ce qui concerne l'influence de l'âge des matériaux sur cette propriété, la chaleur spécifique augmente d'environ 25% entre 7 et 60 jours, cette augmentation est principalement due à l'hydratation du liant et au vieillissement du matériau.

La chaleur spécifique est sensible aux variations de la teneur en eau du matériau, la figure II. 34 montre l'effet significatif de l'état hydrique du matériau sur la valeur de la chaleur spécifique, cette valeur passe de 1161 $J/kg.K$ à l'état sec à 3021 $J/kg.K$ à l'état saturé.

De manière générale, la proportion d'air dans le matériau diminue lorsque la teneur en eau augmente. Par conséquent, la conductivité thermique et la chaleur spécifique augmentent, et la capacité isolante du matériau diminue.

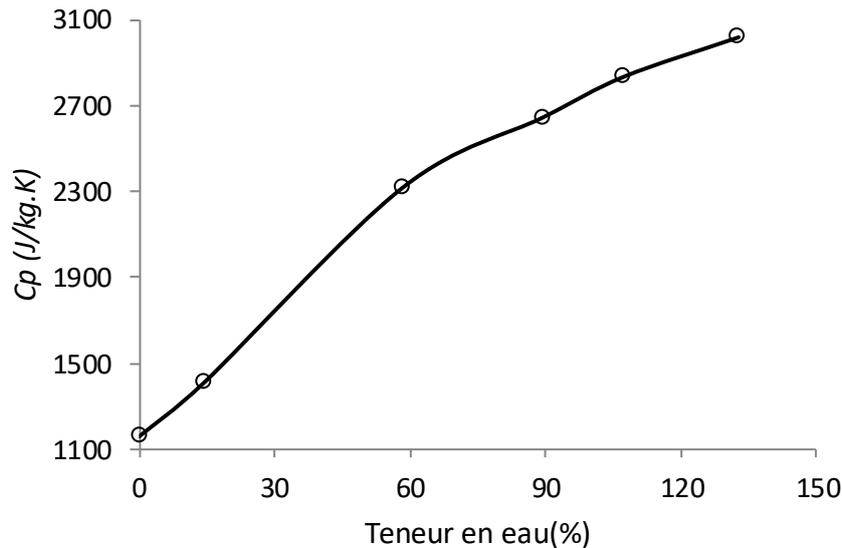


Figure II. 34 : Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la teneur en eau du matériau à 25 ° C et à 30 jours d'âge

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté plusieurs approches expérimentales qui ont été mises en place pour la caractérisation physique, hydrique et thermique des matériaux de construction à base de fibres végétales : béton de chanvre. Cette campagne expérimentale est essentielle pour une bonne prédiction du comportement hygrothermique du béton de chanvre. Toutes les propriétés hygrothermiques sont directement liées à la microstructure du matériau et évoluent en fonction de son âge. Les résultats montrent que le vieillissement du béton de chanvre réduit :

- La porosité et la teneur en eau maximale,
- Le taux d'adsorption et de désorption,
- La capacité de stockage d'humidité,
- La perméabilité à la vapeur d'eau,

Et augmente :

- La conductivité thermique,
- La chaleur spécifique du matériau.

Les résultats ont montré que l'évolution de la morphologie microscopique durant le vieillissement affecte considérablement le comportement de ce matériau.

Les isothermes d'adsorption et désorption obtenues présentent une hystérésis entre l'adsorption et la désorption, qui s'étend aux pressions les plus basses. Ce phénomène est principalement

attribué à la morphologie complexe du réseau poreux du matériau étudié. De plus, les courbes obtenues par les modèles GAB et GDW donnent une bonne approximation des isothermes de sorption. La pente de ces courbes nous permet également de calculer la capacité de stockage d'humidité, elle augmente de manière significative dans la zone super-hygroscopique ($RH > 80\%$).

Les résultats de la perméabilité à la vapeur de l'eau du béton de chanvre obtenus montrent une capacité de diffusion de vapeur d'eau élevée, Cette propriété est sensible aux variations hydriques, en effet la perméabilité à la vapeur d'eau d'une coupelle humide est supérieure à celle de la coupe sèche.

En ce qui concerne la conductivité thermique et la capacité thermique spécifique, ils dépendent fortement de l'évolution de la température. En outre, l'état hydrique du matériau a une influence significative sur les propriétés thermiques. D'où l'importance de la prise en compte de l'évolution des propriétés des matériaux en fonction de l'état hygrothermique des matériaux pour une meilleure prédiction des transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de construction.

Cette étude fournit à la littérature et aux travaux futurs des résultats qui enrichissent les bases de données, en particulier en ce qui concerne la caractérisation hygrothermique des propriétés du béton de chanvre utilisé aujourd'hui en construction neuve et en rénovation. Ces paramètres sont essentiels à l'évaluation de la technique d'isolation et à la modélisation numérique des transferts couplés chaleur d'air et d'humidité dans les parois en béton de chanvre. Le chapitre suivant sera dédié à une caractérisation à l'échelle microscopique du béton de chanvre.

Chapitre III

Caractérisation hygro-morphique par micro-tomographie aux rayons X et corrélation d'images

III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en exergue le comportement macroscopique du béton de chanvre. Or, en réalité, les propriétés macroscopiques de ce matériau dépendent directement de sa morphologie. De plus, le béton de chanvre est un matériau hétérogène constitué de la chènevotte et du liant. Ces deux derniers présentent des comportements différents vis-à-vis des variations des conditions environnementales, susceptibles de causer des changements dimensionnels considérables au contact de l'humidité relative de l'air, notamment la fibre végétale qui est un matériau hygroscopique très sensible aux variations d'humidité relative. Il est donc essentiel d'évaluer le comportement du béton de chanvre sous sollicitations hydriques pour mieux appréhender les mécanismes de dégradation de ce matériau. A l'échelle microscopique, les déformations locales sont dues à l'absorption de l'eau par les parois cellulaires de la chènevotte. En revanche, ce matériau offre une double porosité où le liant rentre également en interaction avec la vapeur d'eau. De plus, l'interface fibre végétale/liant peut présenter des déformations dans le cas d'exposition à plusieurs cycles de séchage et d'humidification. Le comportement hydrique du béton de chanvre à l'échelle macroscopique a été intensivement étudié [120,132,152,164], mais peu d'études hygro-morphiques ont été menées à l'échelle microscopique afin de mieux comprendre les interactions à petite échelle, et par la suite avoir une meilleure compréhension sur le comportement global du matériau. La corrélation d'images numériques est souvent utilisée pour des essais mécaniques, où il s'agit de déterminer les déformations du matériau sous un chargement mécanique. On retrouve ainsi peu de travaux qui s'intéressent aux déformations de la microstructure des matériaux de construction causées par des variations de l'humidité relative.

Ce chapitre est consacré à la caractérisation microscopique et hygro-morphique du béton de chanvre en se basant sur des techniques d'imagerie non destructives. Il s'agit principalement de micro-tomographie aux rayons X, et d'observations de la microstructure sous microscope électronique à balayage (MEB) couplées à des techniques de corrélation d'images. Cette partie a permis d'élaborer un dispositif original constitué d'un compartiment contrôlé en hygrométrie et équipé de caméras à très haute précision. Ces techniques renseignent sur la microstructure réelle du matériau et aident à prédire les champs de déformations du béton de chanvre sous des sollicitations hydriques. Cette partie de la thèse a été effectuée au laboratoire LMT de l'Ecole Normale Supérieure Paris Saclay.

III.2. Micro-tomographie aux rayons X

La micro-tomographie aux rayons X est apparue récemment comme un outil très puissant pour la caractérisation de la microstructure des matériaux poreux de construction [165], puisqu'elle permet d'obtenir la microstructure réelle de l'échantillon. Son utilisation a fortement augmenté ces dernières années [166].

La tomographie aux rayons X est une technique d'imagerie non destructive qui consiste à reconstruire le volume 3D d'un objet à partir d'une série de radiographies 2D. Cette technique a été développée et utilisée en premier lieu dans le domaine médical, puis dans l'industriel afin de réaliser des contrôles non destructifs et de faire des mesures dimensionnelles. Aujourd'hui, elle permet d'obtenir des résolutions de l'ordre du micromètre, ce qui explique son utilisation fréquente dans le domaine de la science des matériaux. Son principe repose sur l'analyse multidirectionnelle de l'interaction d'un faisceau de rayons X avec la matière, par enregistrement du rayonnement transmis après la traversée d'un objet.

L'essai consiste à envoyer des rayons X à travers un échantillon, ces rayons absorbés par le matériau dépendent de sa nature et le rayonnement transmis est enregistré par un détecteur. Cet enregistrement représente une radiographie d'une tranche du matériau analysé. Par la suite, la source et le détecteur tournent autour de l'échantillon. Ceci nous permet de récupérer un ensemble d'images 2D permettant la reconstruction d'une image 3D de l'échantillon (figure III.1). Une image numérique est calculée et reconstruite mathématiquement en niveaux de gris ou de couleurs, où chaque niveau traduit point par point le coefficient d'atténuation local du faisceau incident. Celui-ci, après calibration et étalonnage, peut être converti en échelle de densités [167].

La tomographie aux rayons X permet donc d'accéder au cœur de la matière pour y observer les variations d'absorption radiologiques et les différences de composition. Elle permet également de localiser très finement toute hétérogénéité, singularité, vide ou inclusions présentes dans le matériau, ainsi que de vérifier l'assemblage et le positionnement d'ensembles mécaniques complexes. Enfin, lorsque les temps d'acquisition sont compatibles avec les vitesses de certains phénomènes physiques, la tomographie peut conduire à des mesures dynamiques pour suivre, par exemple, l'évolution d'un matériau soumis à des contraintes.

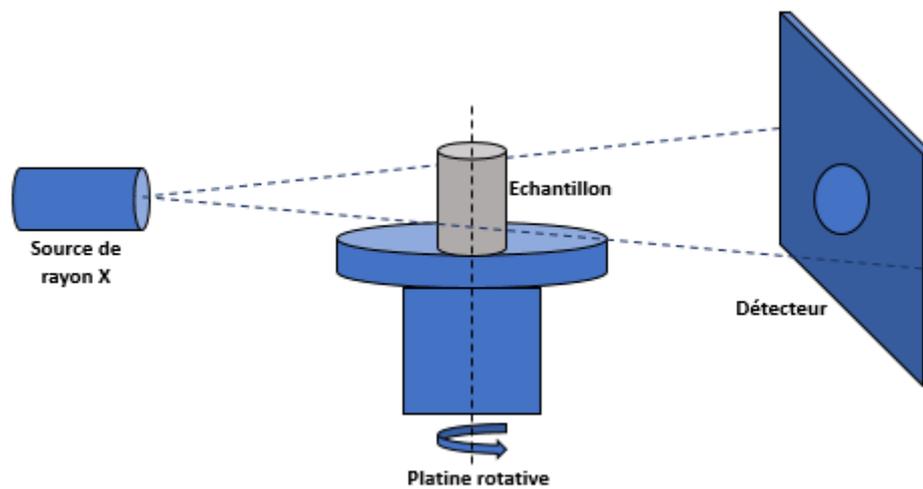


Figure III. 1 : Principe de la tomographie aux rayons X [168]

Quant aux évolutions des matériaux sous des sollicitations hydriques, rares sont les travaux qui étudient cet aspect avec de la tomographie, vue la complexité expérimentale pour garantir un état hydrique fixe du matériau poreux dans le tomographe. Dans ce qui suit, nous avons surmonté cette difficulté en utilisant une technique développée au laboratoire LMT [169–171]. Cette dernière a été appliquée pour la première fois sur des matériaux à base de fibres végétales (béton de chanvre).

III.2.1. Principe de base

Le principe de la tomographie aux rayons X repose sur l'analyse multidirectionnelle de l'interaction d'un faisceau de rayons X traversant à incidence normale une quantité de matière. La loi d'absorption de Beer-Lambert (équation III.1) exprime le nombre de photons N transmis par une tranche de matière traversée par un faisceau de rayons X en fonction du nombre de photons incidents N_0 et du coefficient d'atténuation linéique μ de la tranche de matière traversée :

$$N = N_0 \exp \left[- \int_{\Delta x} \mu(x, y, z) dx \right] \quad \text{III. 1}$$

Le coefficient d'atténuation linéique dépend de la nature du matériau cible (la section efficace et la densité du noyau) et de l'énergie de la particule incidente, dans notre cas le photon X. Le faisceau de photons X étant monochromatique, l'énergie est fixée, et la variation de l'atténuation dépendra seulement de la nature du matériau. Plusieurs phénomènes empêchent les photons X d'atteindre le détecteur :

- L'absorption du photon avec éjection d'un (photo) électron issu d'une des couches électroniques de l'atome ;
- La diffusion cohérente (sans changement de longueur d'onde) et incohérente (effet Compton). Le photon X est dévié de sa trajectoire lors de sa collision avec l'électron d'un atome.

L'amplitude de chacun de ces termes dépend de l'énergie du photon incident et donc de la longueur d'onde du faisceau incident et du numéro atomique Z de l'atome avec lequel il interagit. Pour les photons X de faible énergie, le mécanisme dominant est l'absorption du photon avec éjection d'un photoélectron. Au-delà de quelques dizaines de keV, la contribution de l'effet Compton devient progressivement prépondérante.

Certains phénomènes peuvent également empêcher l'observation de fissures et de cavités :

- Des matériaux lourds et trop épais si l'atténuation exponentielle dans de tels matériaux conduit à une absorption quasi totale du rayonnement incident et donc à la suppression quasi complète du contraste correspondant.
- Un échantillon trop transparent qui introduit un bruit statistique excessif [4].
- Un échantillon trop transparent qui introduit un bruit statistique excessif [4].

Mis à part ces contraintes d'observations, le béton de chanvre étudié est composé de fibres végétales, qui n'absorbent les rayons X que faiblement. Pour notre étude, un paramétrage du tomographe spécifique a été adapté. En effet, plusieurs tests ont été réalisés dans le but de trouver les paramètres d'acquisition les plus adéquats au scan de ce type de matériau.

III.2.2. La micro-tomographie au LMT-Cachan

Le tomographe X50 utilisé au laboratoire LMT (figure III. 2) est constitué principalement d'une source de rayons X, une platine de rotation sur laquelle l'échantillon à scanner est fixé et enfin un détecteur de rayons X. Ce dernier est relié à une centrale électronique d'acquisition et à un PC équipé d'un logiciel de reconstruction et de visualisation en 3D de l'échantillon radiographié.



Figure III. 2 : Tomographe X50 du LMT

Dans cette étude, différents échantillons de béton de chanvre de tailles différentes ont été analysés. Cette variété dimensionnelle a permis d'obtenir des reconstructions 3 D à 3 résolutions bien distinctes. Chaque échantillon a été conditionné à un état hydrique initial de 50% d'humidité relative. Par la suite, deux scans ont été réalisés sur le même échantillon à un état sec puis à 85% d'humidité relative.

L'échantillon est fixé sur une tige permettant une position optimale face à la source des rayons X, puis placé sur la platine de rotation à l'intérieur du tomographe. Par la suite, on procède au réglage des paramètres du tomographe. Cette étape consiste à ajuster la tension, le courant de l'anticathode, à régler la position de la tige et déterminer le nombre de projection de faisceau que l'on veut réaliser. La tige doit être placée de manière à assurer que l'axe passant par le centre de l'échantillon soit immobile et reste à une position identique lors de la rotation de la tige. Lors de l'analyse, la tige effectue une rotation de 360° afin de scanner toute la surface de l'échantillon avec précision. Si l'échantillon se déplace durant sa rotation, la largeur du

faisceau de rayons X devra être plus important (figure III. 3) pour analyser l'échantillon quel que soit sa position, la qualité de l'image reconstruite alors dans ce cas est plus faible.

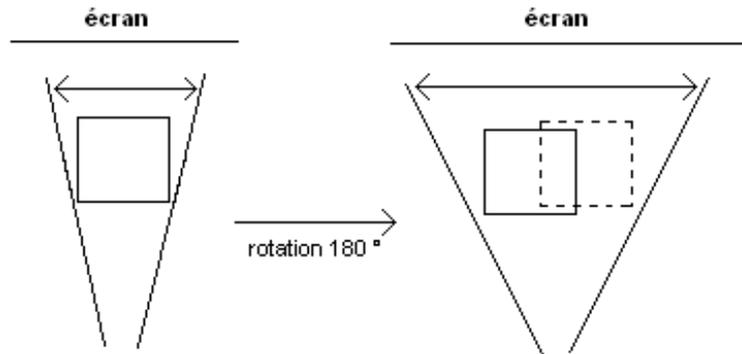


Figure III. 3 : Position de l'échantillon après rotation de la tige dans le cas d'un mauvais centrage

La durée de scan dépend directement de la résolution, et par conséquent la taille de l'échantillon, un échantillon de petite taille nécessitera un temps d'analyse plus important. Une fois l'analyse aux rayons X effectuée, il s'agit maintenant de calibrer l'appareil en utilisant une règle graduée, pour que le tomographe connaisse les dimensions de l'échantillon analysé, et on procèdera par la suite à la reconstruction 3D de la géométrie réelle du matériau via le logiciel efX. L'analyse et la manipulation des images est ensuite effectuée sous le logiciel ImageJ [172], c'est un logiciel de traitement d'image offrant un large panel d'opérations (comparaison d'image, filtrage, mesure de pixel, ...).

Chaque volume reconstitué contient plusieurs pixels dans chaque direction. Un voxel est défini comme $1 \times 1 \times 1$ pixel³. Il s'agit par la suite de segmenter le volume en retrouvant une valeur de seuillage, qui sera utilisée par la suite pour la détermination de la porosité. Dans cette étape, une fonction φ (matrice solide) ou φ (air) est assimilée à chaque voxel, en fonction de la phase qu'elle représente. φ (matrice solide) a une valeur de 0, et φ (air) a une valeur de 1. La porosité classique représentée dans l'équation III. 2 est définie comme le rapport entre les voxels pour lesquels une valeur de 1 a été attribuée et le total des voxels à l'intérieur du volume :

$$P = \int \int \int \varphi(\text{air}) dx dy dz \quad \text{III. 2}$$

Ensuite, une porosité surfacique locale qui correspond à une direction spécifique est également définie. Elle représente la porosité de la surface d'une section du volume. Les porosités locales

dans les directions x, y et z sont présentées par les équations III. 3, 4 et 5 respectivement. Chaque équation est valable respectivement pour une valeur spécifique de x, y et z [170]:

$$P(x) = \int_y \int_z \varphi(\text{air}) dydz \quad \text{III. 3}$$

$$P(y) = \int_x \int_z \varphi(\text{air}) dx dz \quad \text{III. 4}$$

$$P(z) = \int_x \int_y \varphi(\text{air}) dx dy \quad \text{III. 5}$$

Donc, l'évolution de la porosité dans chaque direction est représentée en fonction de la position le long de toute la direction. Cette approche de calcul de porosité a été adoptée dans cette étude pour faire sortir par la suite l'évolution de la porosité du béton de chanvre dans les trois directions de l'espace, ce qui reflètera l'influence de la fibre végétale sur ce paramètre.

Dans ce qui suit nous avons examiné cette évolution de la porosité sous différentes résolutions (31, 8, 7.5 et 2.3 μm). En effet, plus on affine la résolution plus on aura accès à d'autres informations concernant la microstructure du matériau ; en revanche cette qualité d'observation ou ces informations fines s'obtiennent au détriment de la représentativité du matériau. Le choix ultime de la bonne résolution pour une meilleure analyse tomographique du béton de chanvre est un compromis entre la résolution et la taille de l'échantillon. En vue de la double porosité de ce matériau, nous avons commencé par une résolution de 31.8 μm qui nous permettra dans un premier temps d'observer que les vides inter-particulaire. Par la suite, nous avons affiné la résolution pour avoir plus d'information et tenir compte de la porosité intra particulaire.

III.2.3. Reconstruction 3D

Dans ce cas le béton de chanvre de dimensions 40*45*50 mm^3 a été scanné au tomographe avec les paramètres d'acquisition suivants : Energie de faisceau de 100 KV, curent des électrons de 400 μA , la taille physique du voxel est de 31.8 μm . 1300 radiographies sont acquises au cours des 360° de rotation. La durée totale d'une seule acquisition est d'environ 1h57 minutes.

Cette résolution a été choisie dans un premier temps pour pouvoir observer la macroporosité, il s'agit de la porosité inter-particulaire qui se situes entre le liant et la chènevotte. Ces grands pores liés aux arrangements des particules végétales entre elles ; emprisonnent une importante

quantité d'air faisant de ce matériau un très bon isolant thermique, et permettent ainsi d'assurer une bonne régulation de l'hygrométrie.

La figure III. 4 (a) présente la reconstruction 3D de l'échantillon du béton de chanvre scanné au tomographe à rayons X, et la figure III. 4 (b) illustre une coupe du volume dans le plan (x, y) de l'échantillon montrant la ROI (Region Of Interest) de $700*700*700 \text{ px}^3$. Cette image 2D montre qu'on peut observer les différentes phases du matériau : le liant en couleur noir, la chènevotte en couleur grise, et l'air en couleur blanche. La coupe de l'échantillon montre la macro porosité du béton de chanvre allant jusqu'à quelques millimètres de taille, ces macropores contribuent à l'amélioration des propriétés hygrothermique du matériau par changement naturel de phase. En effet, lorsqu'un excès d'humidité se présente dans l'enveloppe, elle migre sous forme vapeur dans les macro-pores puis pénètre vers les micropores et se transforme en eau liquide par mécanismes de condensation capillaire libérant ainsi de l'énergie qui sera stocker dans la paroi. Ceci nous permet d'avoir un meilleur confort tout en augmentant la température des parois. Lorsque l'humidité relative baisse le phénomène inverse se produit, l'évaporation de l'eau piégée dans les pores conduit à l'absorption de l'énergie, ce qui permet de ralentir le réchauffement de l'habitation. La figure III. 4 (b) montre aussi une distribution aléatoire des particules végétales qui sont orientés à différents angles dans les trois directions de l'espace. Donc on ne peut pas distinguer une direction privilégiée de la chènevotte

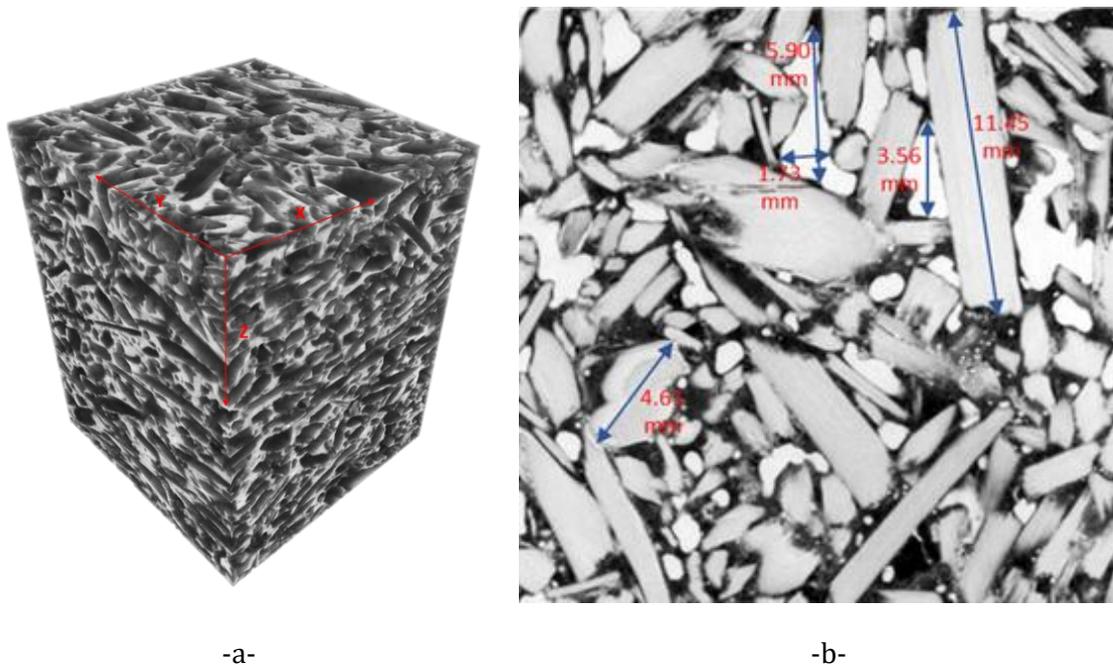


Figure III. 4 : Reconstruction 3D du béton de chanvre à une résolution de $31.8*31.8*31.8 \mu\text{m}^3$, et la ROI dans le plan (x, y)

Pour que les propriétés déterminées ne dépendent pas du volume de prise de moyenne choisi, il faut que ce dernier soit représentatif du milieu entier. Il est donc nécessaire de déterminer un volume élémentaire représentatif du matériau, ce VER joue un rôle important dans la caractérisation des matériaux hétérogènes. La définition du volume élémentaire représentatif est souvent purement géométrique, il représente le volume le plus petit à partir duquel les caractéristiques géométriques mesurées ne varient plus, il doit donc contenir toutes les caractéristiques du milieu. En général, la porosité est souvent le paramètre le plus utilisé pour définir un VER [173], et c'est aussi le paramètre déterminant pour notre calcul numérique. Afin d'assurer qu'il est possible d'extraire un volume élémentaire représentatif géométrique de notre volume reconstruit, la porosité de l'échantillon est calculée à partir des volumes de tailles croissantes. Le calcul de la porosité a été effectué sous le logiciel ImageJ [172], d'autres fonctionnalités de filtrage et de segmentation ont été utilisées comme le plugin MorphoLibJ [174], afin de permettre un meilleur traitement des données et une bonne précision des résultats obtenus. La Figure III. 5 montre les résultats de calcul de porosité en fonction de la taille du volume du béton de chanvre considéré. Les différents traitements, ainsi que les mesures de porosité ont été réalisés en utilisant les plugins de Maire et al. [175] de ImageJ.

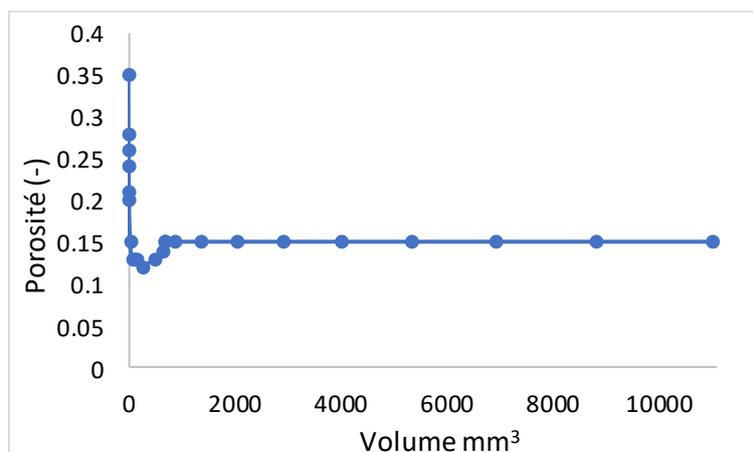


Figure III. 5 : Evolution de la porosité avec la taille du volume de mesure

Cette courbe montre que la porosité calculée est très différente pour les plus petits volumes, puis elle se stabilise à partir d'un volume supérieur à 676.09 mm^3 ($8,7768 \times 8,7768 \times 8,7768 \text{ mm}^3$). Donc, il est nécessaire de considérer un volume à étudier supérieur à ce VER, ce qui est le cas dans notre étude où le volume étudié est largement supérieur à ces valeurs, soit un volume de 4019.67 mm^3 ($15.9 \times 15.9 \times 15.9 \text{ mm}^3$).

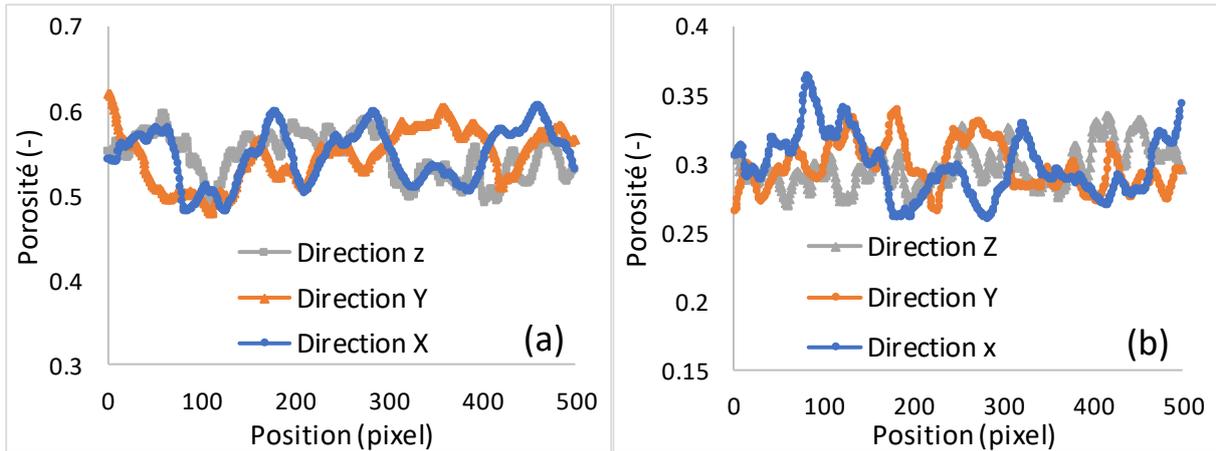


Figure III. 6 : Distribution du dosage (a) en chènevotte, (b) en liant dans les 3 directions

La figure III. 6 présente la distribution des dosages en chènevotte et en liant dans les trois directions, le dosage moyen en liant dans l'échantillon analysé à cette échelle est de 30%, et le dosage moyen en chènevotte est de 55%. Ce dernier est proche du volume des granulats végétaux utilisés pour la confection du béton de chanvre étudié qui est de 55.6% soit une erreur de 1%.

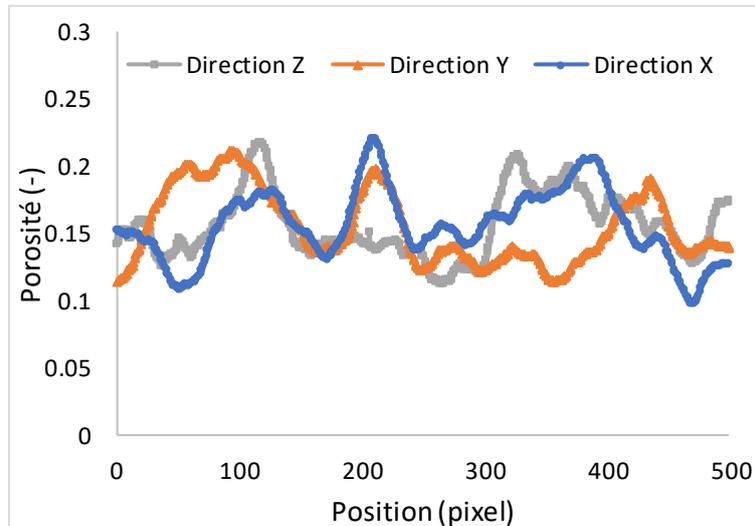


Figure III. 7 : Distribution du volume d'air dans le béton de chanvre dans les 3 directions (x, y, z)

La porosité volumique calculée par l'équation III.2 pour cet échantillon est l'ordre de 15%. Il y a lieu de noter que cette valeur ne concerne que les macros-pores entre le liant et la chènevotte de taille très supérieure à $31.8 \mu m$. En ce qui concerne la distribution de la macro-porosité dans les trois directions (x, y, z), elle est donnée dans la figure III. 7, chaque point de la courbe représente une valeur de porosité dans le plan correspondant. On constate une hétérogénéité importante de la porosité calculée, cette dernière présente des fluctuations et varie en fonction

de la position pour un maximum de 22%. En effet, la porosité située entre le liant et la chènevotte dépend aussi de l'orientation et la position des particules végétales.

Dans le scan précédent, la résolution $31.8 \mu m$ n'a pas été suffisante pour observer celle de la chènevotte, d'où la nécessité d'affiner la résolution. Dans cette partie un autre échantillon du béton de chanvre est alors scanné par tomographie aux rayons X à une résolution de $7.5 \mu m$. La résolution du scan est directement liée à la taille de l'échantillon, et les dimensions de l'échantillon dans ce cas sont alors plus petites que le scan précédent.

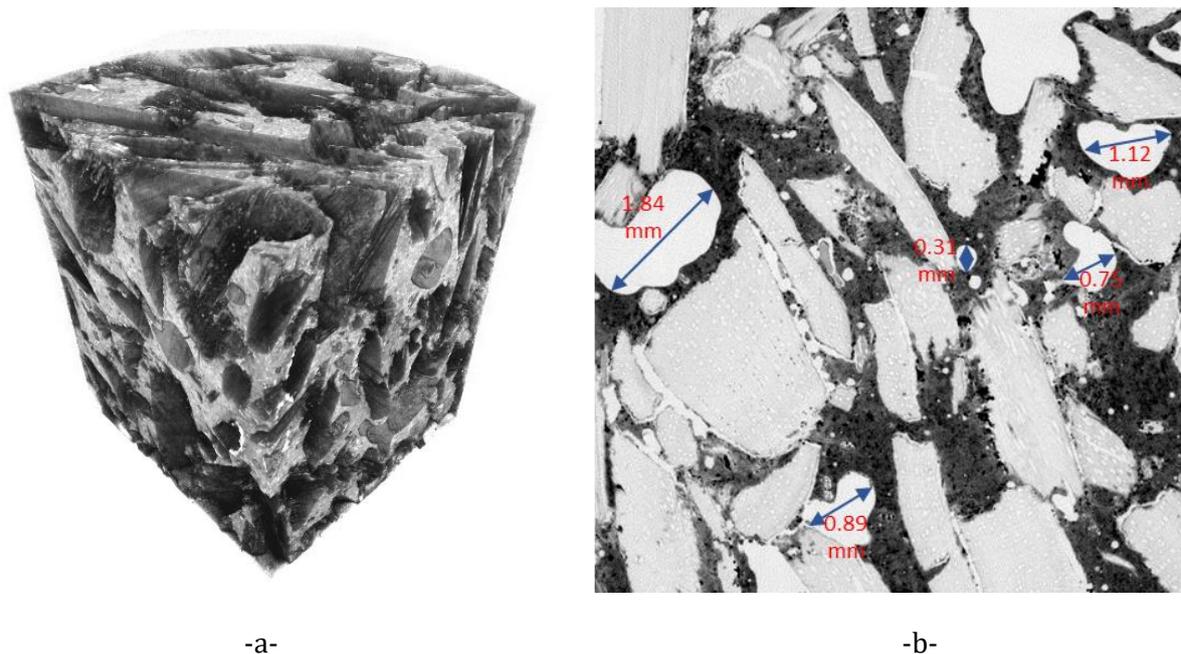


Figure III. 8 : Reconstruction 3D du béton de chanvre à une résolution de $7.5*7.5*7.5 \mu m^3$, et la ROI dans le plan (x, y)

Dans ce deuxième scan, l'échantillon du béton de chanvre circulaire de 13 mm de diamètre et 10 mm de hauteur a été scanné au tomographe avec les paramètres d'acquisition suivants : Energie de faisceau de 100 KV, curent des électrons de $120 \mu A$, la taille physique du voxel est de $7.5 \mu m$. 1200 radiographies sont acquises au cours des 360° de rotation. La durée totale d'une seule acquisition est d'environ 2h47 minutes.

La figure III. 8 (a) présente la reconstruction 3D du béton de chanvre scanné au tomographe à une résolution de $7.5 \mu m$, et la figure III. 8 (b) montre une coupe dans le plan (x, y) montrant la ROI de $1000*1000*1000 px^3$ ainsi que les différentes phases du matériau à cette échelle : la phase solide (chaux et chènevotte) en couleurs noir et grise respectivement, et l'air en couleur blanche. Cette résolution nous permet d'observer une autre catégorie de porosité, il s'agit d'une partie de la porosité de la chènevotte et du liant.

Nous commençons d'abord par la détermination du VER géométrique de l'échantillon scanné (figure III. 9) à partir de l'évolution de la porosité en fonction de la taille du volume considéré. De même, le volume étudié dans ce cas est largement supérieur au VER (216 mm^3) de ce volume scanné à 7.5 micromètre.

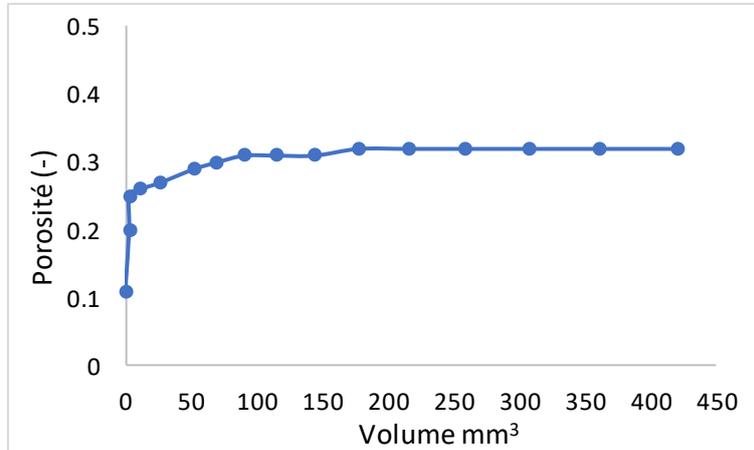


Figure III. 9 : Evolution de la porosité avec la taille du volume de mesure

La distribution de la porosité à cette échelle dans les trois directions est aussi présentée dans ce cas dans la figure III. 10. En effet, cette porosité ne concerne qu'une partie de la porosité de la chènevotte et du liant observable à cette résolution. La porosité calculée présente des fluctuations et varie en fonction de la position. De plus, pour ce matériau très hétérogène qui a une orientation de la chènevotte aléatoire, la porosité dépend de la position des fibres végétales, et augmente dans les plans qui présentent un fort dosage en ces particules végétales poreuses.

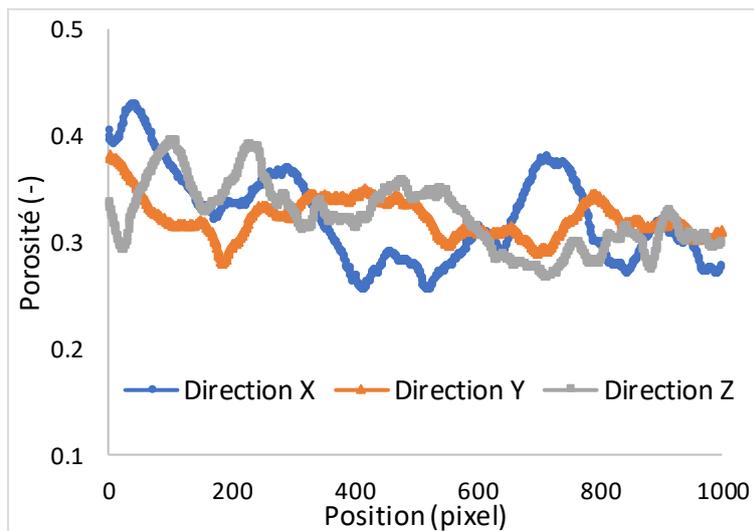


Figure III. 10 : Distribution du volume d'air dans le béton de chanvre dans les 3 directions (x, y, z)

La partie des pores de la chènevotte et du liant de taille inférieure à $7.5 \mu\text{m}$ est sous-estimée dans ce cas aussi, par ce que à cette échelle on n'observe pas la totalité de la porosité de ces particules végétales et du liant. En effet, la résolution du scan dépend principalement de la taille de l'échantillon à radiographier.

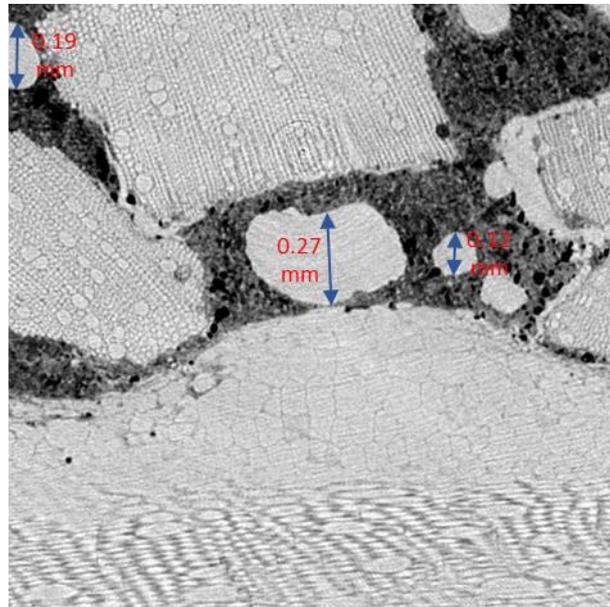


Figure III. 11 : Coupe 2D d'un volume du béton chanvre scanné à $2.3 \mu\text{m}$

Un autre test est réalisé sur un échantillon du béton de chanvre de très faibles dimensions (quelques millimètres) à une résolution de $2.3 \mu\text{m}$ (figure III. 11). Le volume des vides dans ce cas est estimé à 55%. Plus on diminue la résolution, plus la porosité observée augmente et la microstructure est mieux appréhendée. En revanche ce volume n'est pas représentatif, la macro porosité ainsi que les différentes hétérogénéités du matériau ont été sous estimées, et n'ont pas été considérées.

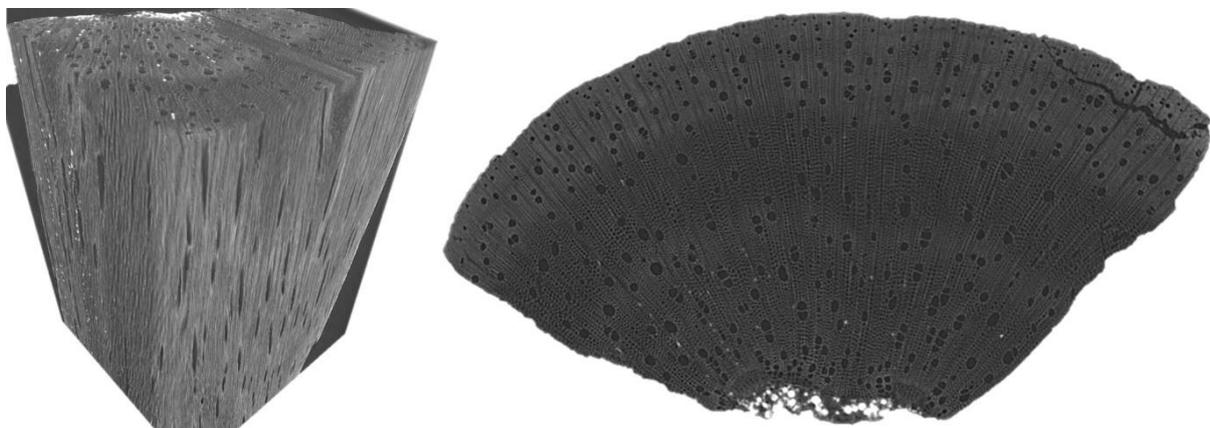


Figure III. 12 : Reconstruction 3D d'une particule de chènevotte à une résolution de $3.3*3.3*3.3 \mu\text{m}^3$, et une coupe dans le plan (x, y)

La raison principale de la sous-estimation de la porosité du matériau est due au fait que la chènevotte constitue plus de la moitié du volume total du béton de chanvre, donc la porosité totale de ce dernier dépend fortement de celle des particules végétales. Or la porosité globale de la chènevotte ne peut être estimée à des grandes résolutions et nécessite la finesse de résolution.

Un échantillon de la chènevotte étudiée de dimensions $3.7*5.4*4.40 \text{ mm}^3$ a été scanné au tomographe avec les paramètres d'acquisition suivants : Energie de faisceau de 100 KV, curent des électrons de 200 μA , la taille physique du voxel est de 3.3 μm . 1500 radiographies sont acquises au cours des 360° de rotation. La durée totale d'une seule acquisition est d'environ 4h31 minutes.

La figure III. 12 montre la microstructure de la chènevotte obtenue par tomographie aux rayons X à une résolution 3.3 μm . Cette reconstruction met en évidence la complexité de la morphologie interne de la chènevotte ainsi que la partie des pores observable à cette échelle. Les granulats végétaux utilisés dans la fabrication du béton de chanvre présentent des structures et des géométries de pores assez différentes, ces derniers sont organisés en capillaires parallèles dans la direction (z). On constate que la chènevotte présente une partie de porosité qui est assez fine pour être observée avec les résolutions précédentes. De plus, les résultats de porosité au mercure présentés dans le chapitre 2 (figure II. 11) montrent un mode principal à un diamètre des pores inférieur à 1 μm .

Ces essais de tomographie aux rayons X montrent que la résolution a un impact sur l'évaluation de la porosité du matériau, et que le béton de chanvre est un matériau à double porosité. De plus cette porosité en un point donné dépend principalement de l'orientation et de la position des fibres végétales.

III.3. Microscope électronique à balayage MEB

Nous avons constaté à travers les essais de micro-tomographie aux rayon X que la chènevotte présente une structure complexe et nécessite des résolutions inférieures à 1 μm pour pouvoir se renseigner en détail sur ces fibres végétales. Pour cela nous avons fait recours à d'autre techniques d'imagerie basées sur des observations surfaciques afin de mieux caractériser la fibre végétale, il s'agit de la microscopie électronique à balayage. Cette technique nous permet d'observer les cellules et les parois cellulaires de la chènevotte.

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM Scanning Electron Microscopy en anglais) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon avec des profondeurs de champs supérieures à la microscopie optique, en utilisant le principe des interactions électrons-matière.



Figure III. 13 : Microscope électronique à balayage (MEB) au LMT-Cachan

Le microscope électronique à balayage (figure III. 13) est utilisé au laboratoire LMT, son principe de base consiste à la projection d'un faisceau d'électrons accélérés sous une différence de potentiel donnée, sur la surface de l'échantillon à analyser, qui réémet certaines particules en réponse. Ces dernières sont amplifiées puis détectés et convertis en un signal électrique. Ce processus est réalisé en chaque point de l'échantillon par un balayage du faisceau, ceci permet d'avoir une cartographie de l'intensité de signal représentant une variation sur la zone balayée de l'intensité du signal reçu par le détecteur. Cette variation est liée à la topographie ou à la composition chimique de la surface observée, en fonction des particules analysées et du détecteur utilisé, tous ces signaux peuvent servir à reconstituée une image.

III.3.1. Analyse des images MEB

L'analyse par microscope électronique à balayage (MEB) a été effectuée sur la chènevotte. Les figures III. 14 et III. 15 illustrent une observation au microscope électronique à balayage à deux résolutions différentes. Les pores de ces particules végétales sont de différentes catégories comme le montre la figure III. 14, ils peuvent être classés en trois types selon leurs tailles : les vaisseaux principaux (vessels), les vaisseaux secondaires (woody fibres), et enfin les cellules parenchymes (parenchyma cells). De plus, les parois entre les cellules sont des parois lignocellulosiques principalement composées de cellulose (40 à 60%), d'hémicelluloses (10 à 20%) et de lignines, qui sont les trois polymères les plus abondants dans la nature [129].

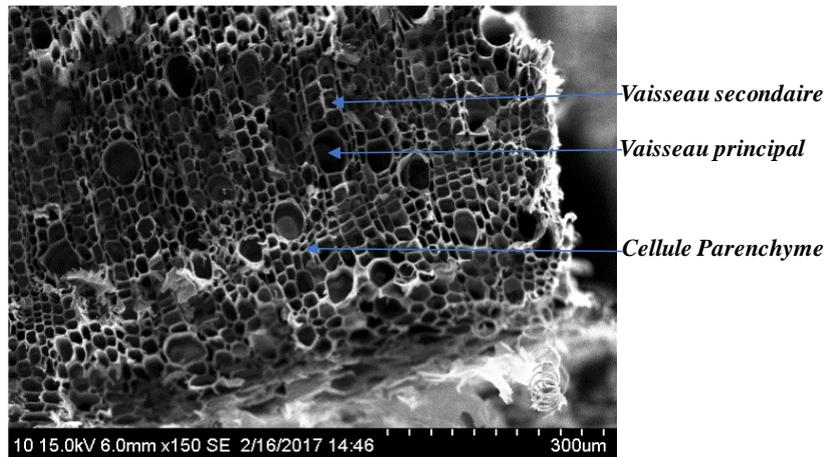


Figure III. 14 : Coupe transversale d'une particule de chènevotte au MEB montrant les différents pores

La très forte porosité de la chènevotte est visible au MEB. De plus, la chènevotte présente des structures et des géométries de pores assez différentes. En effet, dans ces particules végétales, on retrouve généralement deux zones : la moelle (partie qui n'a pas été lignifiée) de la plante, et la partie bois de la tige du chanvre.

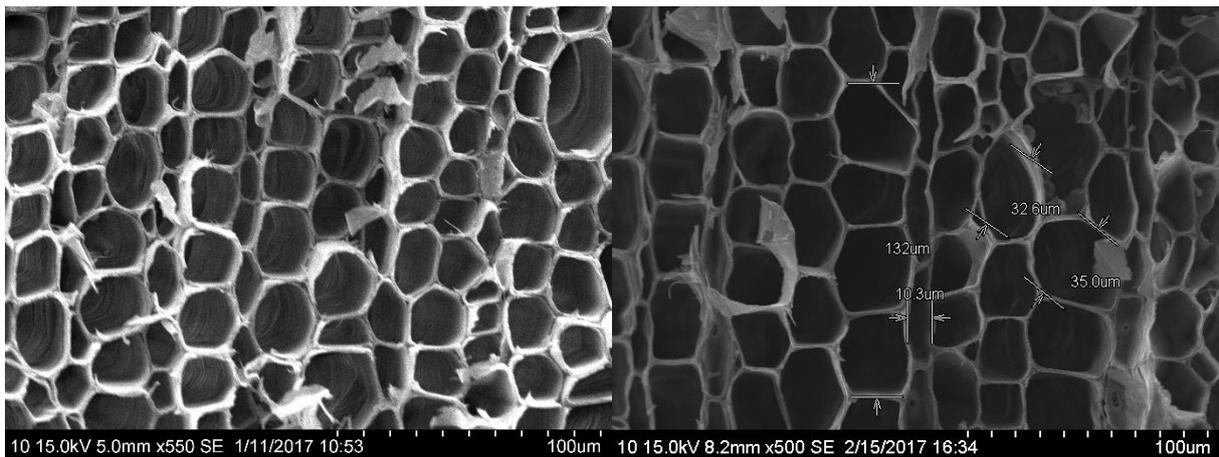


Figure III. 15 : Coupe transversale de la chènevotte observée au MEB

L'exploitation des différentes images de la chènevotte obtenues par la microscopie électronique à balayage permet d'estimer sa porosité surfacique observée. La valeur moyenne de 10 mesures de la porosité de la chènevotte est de 75.84%. En effet ces particules végétales sont très poreuses et hygroscopiques, ce qui explique sa forte capacité d'absorption d'eau.

La figure III. 16 illustre une coupe longitudinale d'une tige de chènevotte. La figure montre que la porosité de la chènevotte est organisée en capillaires parallèles au sens de croissance de la plante, cette morphologie des pores permet d'augmenter la capacité d'absorption d'eau. Ces

capillaires représentent en fait les cellules du bois, et il apparaît sur cette figure que ces cellules peuvent communiquer entre elles par des trous appelés ponctuations.

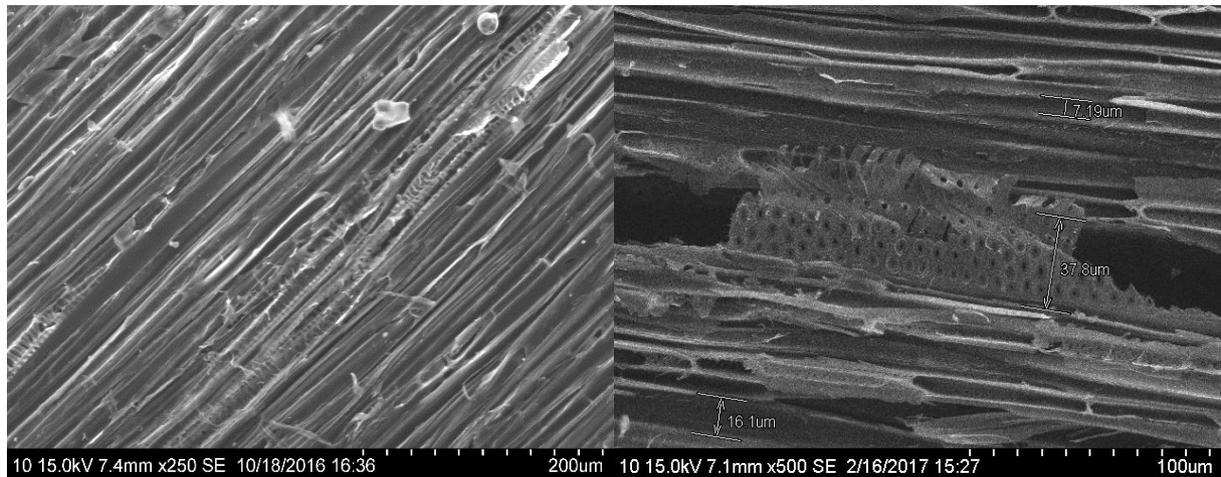


Figure III. 16 : Coupe longitudinale de la chènevotte observée au MEB

Ces ponctuations jouent un rôle important lors des transferts d'humidité dans la direction transversale de la chènevotte, en effet, ces vides laissent passer la vapeur d'eau ainsi que l'eau liquide afin de traverser les différentes cellules du matériau. Concernant la direction longitudinale, le transfert d'humidité est plus important dans cette direction, par ce que les molécules d'eau se déplacent librement à travers les pores de la chènevotte organisés en capillaires parallèles. De plus, le transfert thermique est plus élevé dans la direction longitudinale de la chènevotte. L'alignement régulier des parois des pores capillaires dans cette direction donne à la chènevotte une conductivité thermique plus importante dans cette direction. En revanche, dans la direction transversale de la chènevotte, le transfert de chaleur est moins important. La figure III. 17 (a) représente une exploitation d'une image MEB qui est transformée en maillage, puis importée dans le logiciel de simulation numérique COMSOL Multiphysics. Par la suite, un flux de chaleur conductif est appliqué dans la direction x de l'échantillon afin de pouvoir tracer sur la surface de l'échantillon le champ de température illustré sur la figure III. 17 (b).

Nous constatons que le transfert de chaleur dans la direction transversale de la chènevotte est ralenti, cela est principalement dû à la présence des pores. En effet, la phase solide présente une conductivité thermique plus importante que l'air, donc la chaleur se diffuse rapidement dans les parois en bois des cellules. Puis la cinétique du transfert est atténuée au niveau des pores. Ce qui explique les distributions non homogènes de la température présentée sur la figure III. 17 (b).

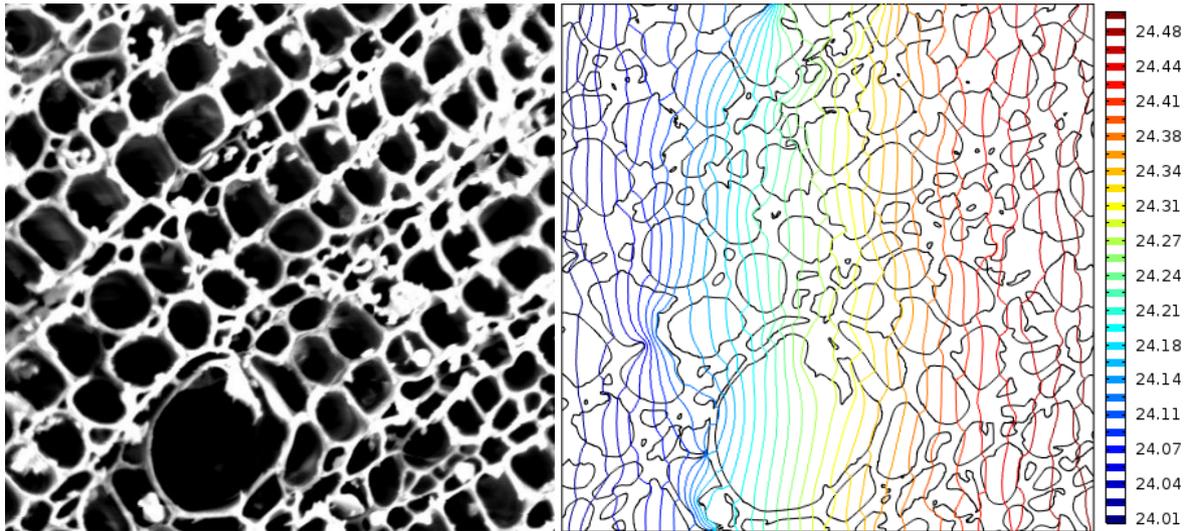


Figure III. 17 : (a) Image MEB de la chènevotte, (b) courbes isovaleurs des températures calculées.

III.4. Corrélation d'images numériques (CIN)

La plupart des travaux sur le comportement hygro-morphique du béton de chanvre se concentrent sur le comportement macroscopique et ne fournissent pas une estimation réelle des déformations microscopiques et morphologiques résultant des sollicitations hygrothermiques. Dans le but de progresser dans la compréhension du comportement du béton de chanvre à l'échelle microscopique, des essais de corrélation d'images numériques ont été réalisés. Cette technique permis de visualiser les champs de déformations dans l'échantillon sous sollicitations hydriques.

III.4.1. Principe de la CIN

La corrélation d'images est une technique de mesure qui permet de déterminer les champs de déplacements [176] à différents niveaux de sollicitations, à partir des images (2D) ou volume (3D), elle peut être utilisée de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique [177]. Cette méthode est largement utilisée en sciences des matériaux pour déterminer les champs de déformations, détecter des fissures. Elle peut être également utilisée dans le cas des matériaux poreux et fibreux

Si l'état de référence est représenté par une fonction tridimensionnelle de niveaux de gris $f(x)$, et l'état déformé est représenté par la fonction tridimensionnelle de niveaux de gris $g(x)$, la conservation du niveau de gris exige [178] :

$$f(x) = g(x + u(x)) \quad \text{III. 6}$$

Où $u(x)$ est le champ de déplacements recherché. Il est considéré homogène et bilinéaire, sa détermination consiste à minimiser le carré de résidu de la corrélation sur l'ensemble de la région d'intérêt, ce qui induit une diminution de l'incertitude de mesure pour une taille d'élément ou de fenêtre d'interrogation identique [179] :

$$\phi_c = |g(x + u(x)) - f(x)| \quad \text{III. 7}$$

Le problème à résoudre est non linéaire et mal posé puisqu'il y a trois inconnues pour un niveau de gris donné. Pour cela, une approche globale de la corrélation d'images est proposée [177,180], il s'agit de décomposer $u(x)$ sur une base de fonctions de forme de type éléments finis, imposant la continuité du champ de déplacements. Le champ de déplacements est alors recherché sous la forme :

$$u(x) = \sum_i u_n \psi_n(x) \quad \text{III. 8}$$

Où u_n sont les degrés de liberté inconnus associés à la base de fonctions de forme $\psi_n(x)$. Le problème consiste donc à minimiser ϕ_c^2 par rapport aux inconnues u_n . La solution est approchée itérativement [177], où à chaque itération n le vecteur contenant toutes les amplitudes u_n est corrigé par les amplitudes de déplacement $\{du\}$. Enfin le système linéaire à résoudre est :

$$[M]\{du\} = \{b\} \quad \text{III. 9}$$

Où $[M]$ est la matrice de corrélation d'images donnée par :

$$M_{kl} = \int_{\Omega} [(\psi_k \cdot \nabla f)(x)(\psi_l \cdot \nabla f)(x)] dx \quad \text{III. 10}$$

Et le vecteur $\{b\}$ est comme suit :

$$b_k = \int_{\Omega} (f - \tilde{g}^{(n)}) (\psi_k \cdot \nabla f)(x) dx \quad \text{III. 11}$$

III.4.2. Corrélation d'images numériques 2D

L'objectif de cette partie est de mesurer les champs de déplacements et de déformations de la surface du béton de chanvre sollicité à différents états de chargement hydrique. Le principe général de la CIN 2D est d'acquérir d'abord deux (ou plusieurs) images, à deux (ou plusieurs)

stades de chargement, d'une même zone de la surface de l'échantillon testé, par la suite, on procède à la recherche des points homologues entre l'image de référence et l'image déformée en se basant sur la ressemblance de leur voisinage, et enfin en déduire le champ de déplacements, puis par dérivation, le champ de déformations.

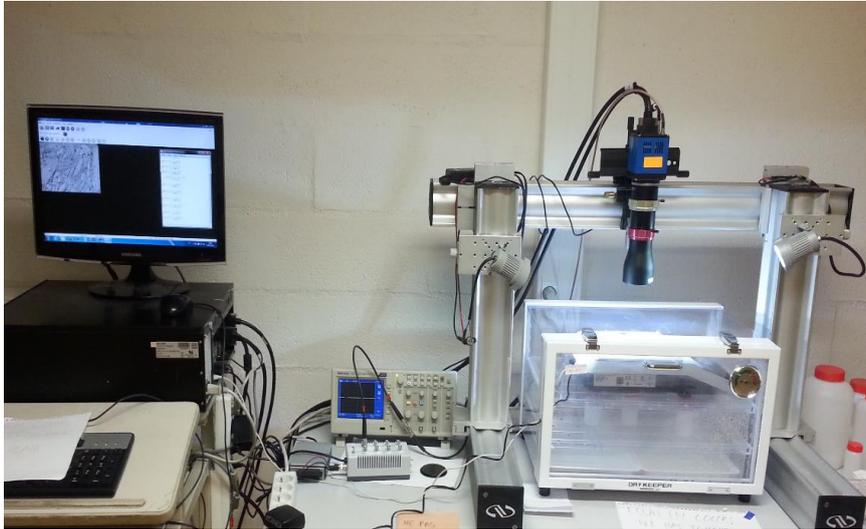


Figure III. 18 : Dispositif expérimental développé au LMT-Cachan

Le dispositif expérimental (Figure III. 18) utilisé dans cette partie du chapitre a été développé au laboratoire LMT-Cachan. Il est composé d'un dessiccateur où l'échantillon à étudier est conditionné en utilisant des solutions salines, d'une caméra de résolution $6.5 \mu m$, de deux projecteurs qui nous permette d'éclairer le dessiccateur et la surface de l'échantillon, d'une centrale d'acquisition des données, et enfin d'un trigger (déclencheur) qui permet le déclenchement de l'acquisition du signal et de contrôler le période d'acquisition des images. De plus, Une balance reliée à la centrale d'acquisition est placée à l'intérieur du dessiccateur afin de suivre l'évolution de la masse des échantillons de béton de chanvre étudié durant l'essai.

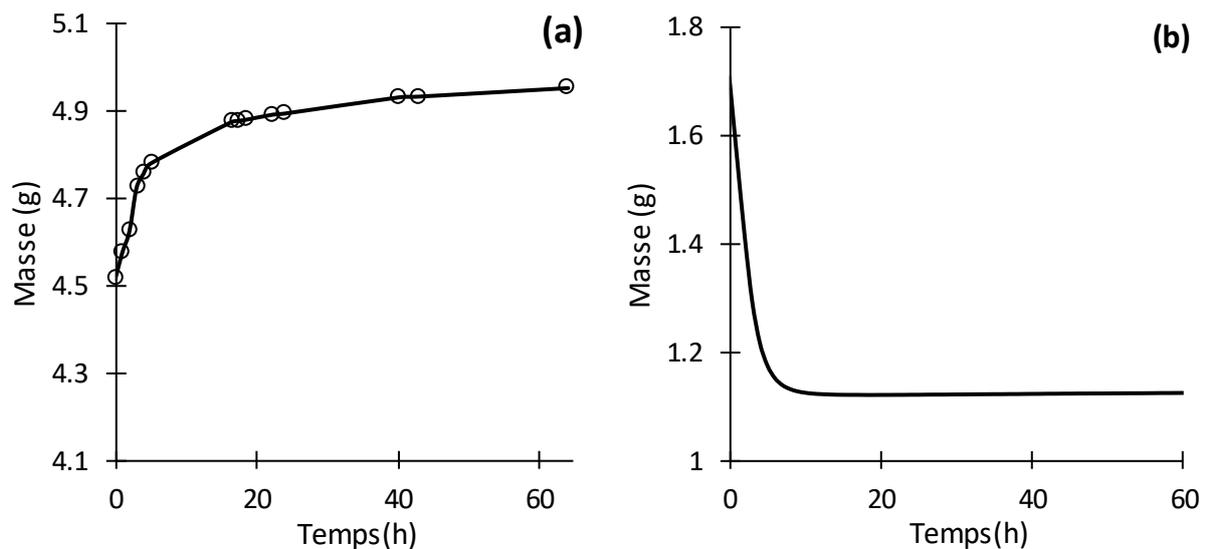


Figure III. 19 : Evolution de la masse des échantillons dans le temps (a) humidification et (b) séchage

L'essai consiste à imposer à un échantillon de béton de chanvre des sollicitations hydriques d'humidification ou de séchage. Ensuite le long de séchage ou de sorption nous allons suivre l'évolution de la morphologie de la surfacique de l'échantillon en faisant une succession d'images jusqu'à un équilibre donnée. Ces images seront par la suite post traitées afin d'extraire les champs des déplacements / déformations associés.

La figure III. 19 (a) (respectivement (b)) représente l'évolution de la masse de l'échantillon du béton de chanvre étudié durant la sollicitation hydrique d'humidification (respectivement de séchage). Dans les deux cas la vitesse d'adsorption ou la désorption d'eau est importante pendant les premières heures puis diminue avec le temps. L'équilibre est atteint plus vite dans le cas de séchage en raison de la diminution de la taille d'échantillon.

L'humidité relative à l'intérieur du dessinateur est assurée par des solutions salines saturées. Pour la condition d'humidification, l'échantillon est séché au préalable dans une étuve à 60°C jusqu'à stabilisation de masse puis placé dans le dessiccateur régulé à 76% d'humidité relative en utilisant des Chlorures de sodium NaCl. Concernant la condition de séchage, l'échantillon initialement saturé en eau est sollicité à une humidité relative de 3% dans le dessiccateur assuré par le gel de silice. Ce dernier est initialement séché dans un four à la température de 140°C pendant 4 heures pour augmenter sa capacité d'adsorption et maintenir une faible humidité relative à l'intérieur du dessiccateur. La salle d'essai est maintenue à une température ambiante constante, donc les effets thermiques sont négligés. La durée de l'essai est en moyenne de 3 jours.



Figure III. 20 : Image de référence
(échantillon sec, T=25°C)



Figure III. 21 : Image déformée après
humidification (75%HR, T=25°C)

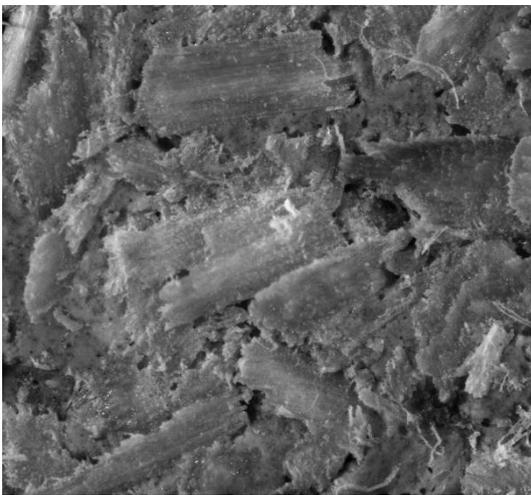


Figure III. 22 : Image de référence
(échantillon saturé, T= 25°C)

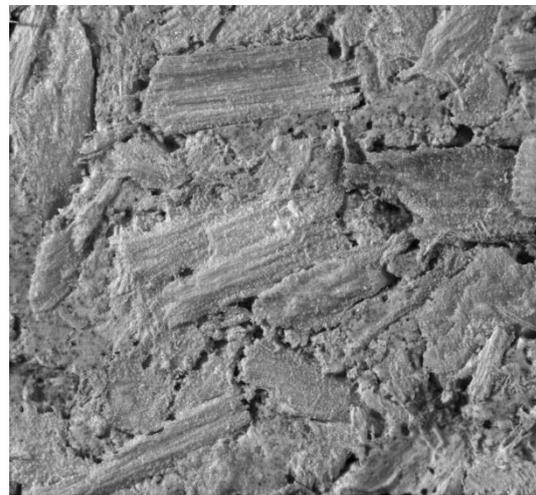


Figure III. 23 : Image déformée après
séchage (03%HR, T= 25°C)

En effet, le béton de chanvre et spécialement la fibre végétale présente une grande capacité d'adsorption au début de l'humidification en vue du caractère hygroscopique de cette dernière. Pour cela, les fréquences de prise des images sont plus petites au début de l'essai pour pouvoir suivre les déformations des premiers instants, et faciliter le traitement des résultats.

Autrement dit, la période entre deux images successives est plus petite au début de l'essai pour pouvoir suivre les déformations des premiers instants. Le logiciel utilisé pour faire la corrélation d'images est le code de corrélation Correli_Q4 [177], c'est un logiciel développé au laboratoire LMT de l'ENS Cachan. Il utilise des élément Q4 pour la discrétisation des images. Les figures III. 20 - 23 présentent les premières et les dernières images prises pour chaque cas de sollicitation hydrique (humidification et séchage).

La taille de la ROI est 16 pixel. Les résultats obtenus illustrent des champs de déformations dans le sens XX (Figure III. 24), YY (Figure III. 25) et XY (Figure III. 26), des champs des déplacements dans le direction XX (Figure III. 27), YY (Figure III. 28).

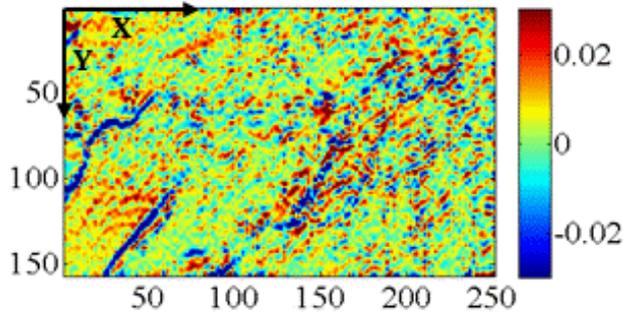


Figure III. 24 : Champs de déformations dans le sens XX

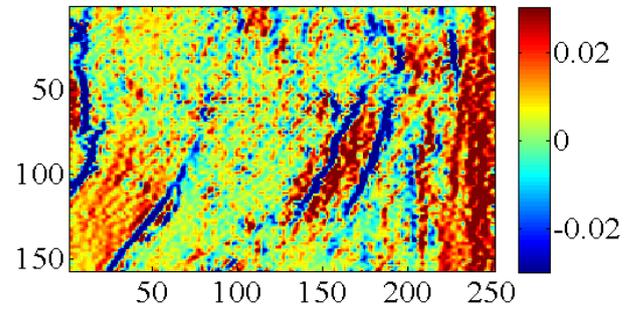


Figure III. 25 : Champs de déformations dans le sens YY

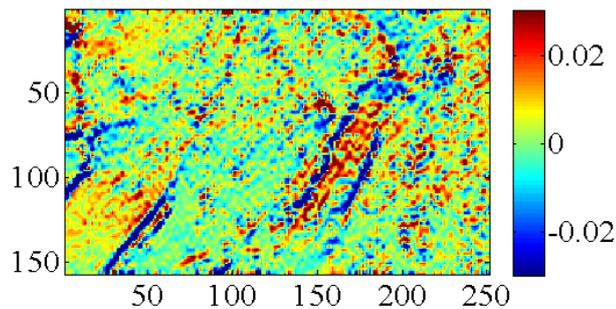


Figure III. 26 : Champs de déformations dans le sens XY

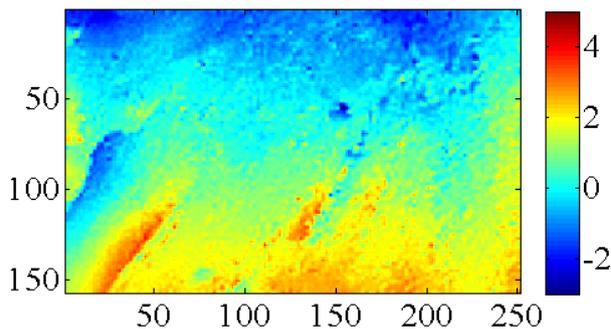


Figure III. 27 : Champs de déplacements dans la direction XX (en px)

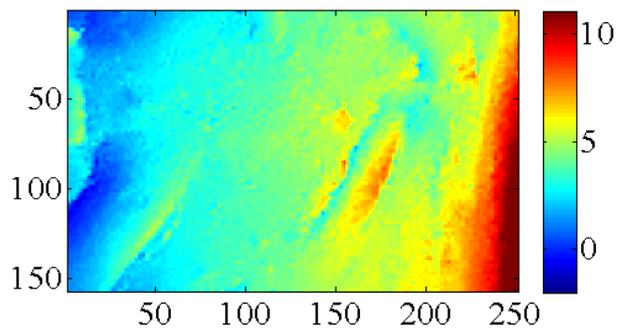


Figure III. 28 : Champs de déplacements dans la direction YY (en px)

On peut observer que les déformations et les déplacements sont anisotropes et dépendants de la microstructure. Les plus grandes déformations observées sont au niveau des interfaces entre la chènevotte et le liant. Cela est dû au gonflement des particules végétales et la fermeture des pores limitant les interfaces. Le champ de déformations dans le sens YY montre que les

déformations de la matrice (liant) sont homogènes et proches de zéro, parce que les déformations mécaniques sous sollicitation hydrique du liant ne sont pas importantes comparée à celle des granulats végétaux, et il ne subit que de faible déformation. La zone rouge représente la région avec la déformation maximale positive (gonflement), et la zone bleue représente la région avec la déformation maximale négative (rétrécissement). La comparaison entre les images déformées et l'image de référence met en évidence le gonflement des particules végétales qui cause le rétrécissement des vides. Ces effets sont dus à l'hygroscopicité de la chènevotte et sa capacité élevée d'absorption de l'eau. Le même comportement est observé sur toutes les figures III. 24-III. 26, qui confirment les résultats obtenus.

A partir des figures III. 27 et III. 28 représentant les champs des déplacements sur la surface de l'échantillon, on constate que le déplacement suivant la direction YY est deux fois plus grand que celui dans la direction XX . Cela est fortement dépendant de l'orientation des fibres dans le liant puisque c'est la fibre végétale qui dicte le gonflement.

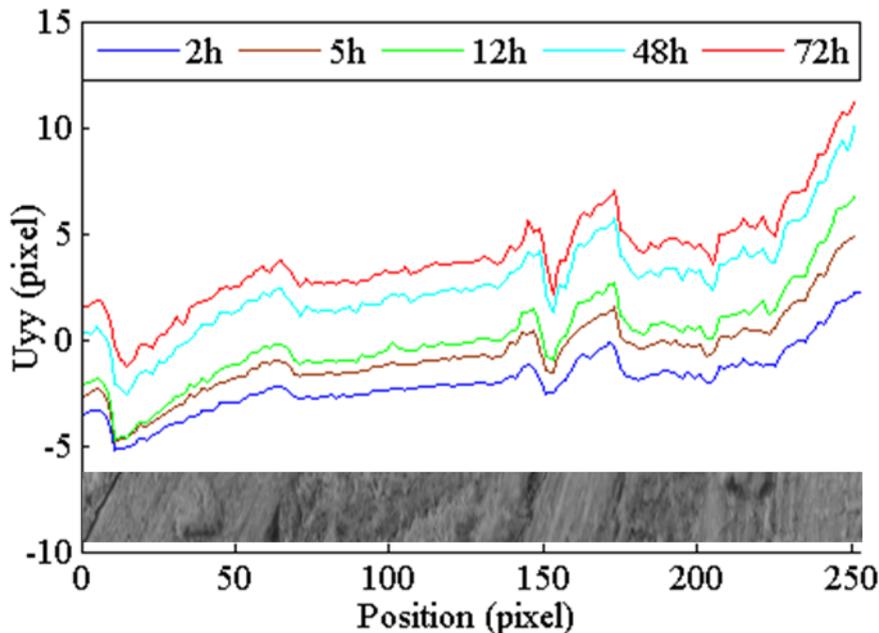


Figure III. 29: déplacement dans le sens YY en fonction du temps au milieu de l'échantillon (coupe à 100 pixels)

La figure III. 29 représente les valeurs des déplacements dans les directions y le long de ligne horizontale situé à 100 Pixels (centre de l'échantillon étudié), et cela en fonction du temps partant de l'instant 2h de sollicitation hydrique jusqu'à 72h d'humidification à 76% d'humidité relative. Cette figure montre que les déplacements les plus importants selon la ligne horizontale sont marqués pour la chènevotte et l'air. Le liant est faiblement influencé par la sollicitation

hydrique appliquée. De plus, les valeurs des déplacements augmentent dans le temps parce que les phénomènes de transfert d'humidité sont très lents.

La cinétique du gonflement de la fibre végétale qui est à la base un matériau très hygroscopique est ralentie par la présence du liant. En effet, la littérature a montré que la chènevotte absorbe d'importante quantité d'eau au bout de quelque minute (30mn) contrairement au béton de chanvre qui est montré dans la figure ou le matériau continue d'absorber de l'eau et présente des déformations jusqu'à 72h.

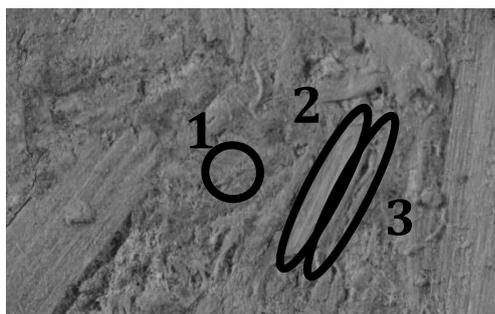


Figure III. 30 : Image de référence (sec, T=25°C) avec numérotation des trois zones

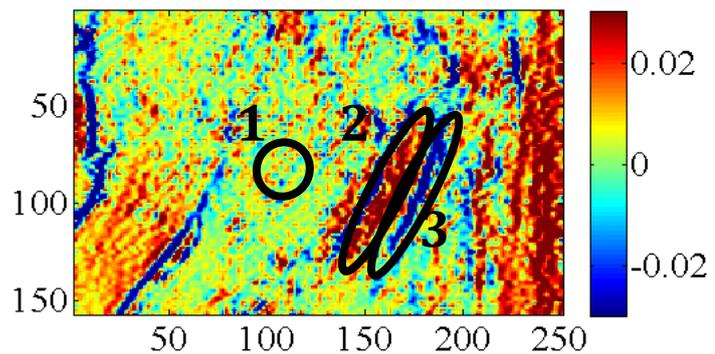


Figure III. 31 : Champs de déformations dans le sens YY avec numérotation des trois zones

Tableau III. 1 : Valeurs des déformations locales dans les trois zones considérées

Numéro de la zone	Tenseurs des déformations locales dans les différentes zones
-1- Liant	$E = \begin{bmatrix} 0,000422 & -0,000394 \\ -0,000394 & 0,000629 \end{bmatrix}$
-2- Chènevotte	$E = \begin{bmatrix} 0,019138 & 0,011239 \\ 0,011239 & 0,046383 \end{bmatrix}$
-3- Air	$E = \begin{bmatrix} -0,031092 & -0,011184 \\ -0,011184 & -0,108049 \end{bmatrix}$

Le logiciel Correli_Q4 donne la possibilité d'estimer des déformations locales sur une région choisie à l'aide de sa fonction appelée gauge virtuel. Nous l'avons utilisé afin de comparer les

valeurs des déformations locales dans le liant (zone 1), la chènevotte (zone 2) et porosité (zone 3) (Figures III. 30 et III. 31), et les résultats sont représentés dans le tableau III. 1.

Le tableau III. 1 montre que les valeurs des déformations au niveau de la chènevotte sont beaucoup plus importantes que les déformations du liant, qui subit un faible gonflement dû à l'augmentation de l'humidité relative. Enfin les déformations au niveau de l'interface liant-chènevotte (vides inter particulaires) sont encore plus importantes que celles des granulats végétaux. Cette partie est sollicitée en compression due au gonflement du chanvre qui tend à refermer les vides entre les particules. Etant donné la résistance de l'air est très petite donc les interfaces subissent des grandes déformations en se rétrécissant.

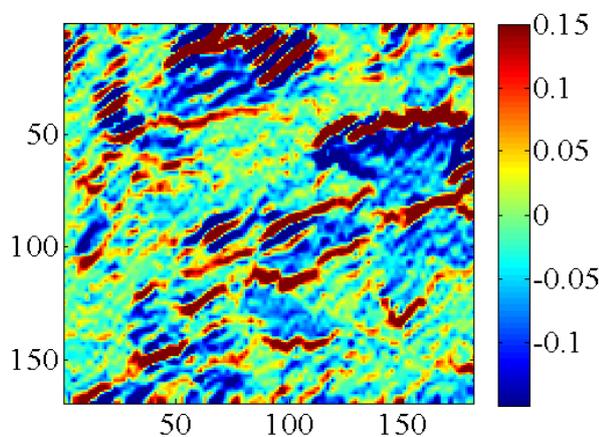


Figure III. 32: Champs de déformations dans le sens XX

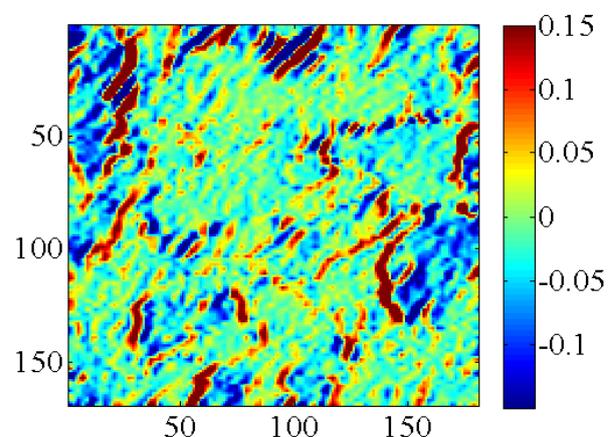


Figure III. 33: Champs de déformations dans le sens YY

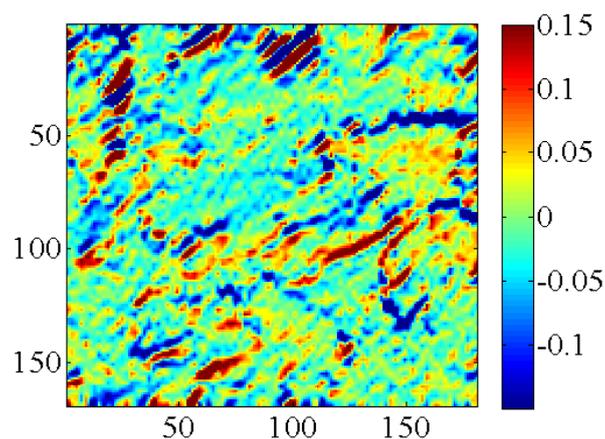


Figure III. 34 : Champs de déformations dans le sens XY

Concernant les résultats du séchage de l'échantillon du béton de chanvre, les champs de déformations dans les directions XX , YY et XY sont présentés dans les figures III. 32, III. 33 et III. 34 respectivement. Les champs des déformations sur la surface de l'échantillon montrent

que l'exposition du béton de chanvre à une humidité relative très basse conduit à un échange d'humidité entre l'échantillon et l'enceinte du dessiccateur. Ceci conduit à la perte de masse due à la désorption d'eau. La chènevotte libère les grandes quantités d'eau absorbées, ce départ d'eau conduit à un changement du volume des particules végétales en se rétrécissement (zones bleues sur les figures). Par conséquent, les vides inter-particulaires se défont et leur taille augmente d'avantage (zones rouges sur les figures). Par ailleurs, Les zones du liant sont peu influencées par l'augmentation de l'humidité relative et marquent de très faibles déformations.

III.4.3. Corrélation d'images volumiques

La corrélation d'images 2D présentée dans la partie précédente du chapitre permet d'étudier le comportement du béton de chanvre en fonction des variations d'humidité relative qu'à la surface de l'échantillon. La suite du chapitre est consacrée à l'exploitation des observations tomographiques qui nous permettront par la suite de suivre l'évolution de la microstructure du béton de chanvre sous sollicitations hydriques. Pour cela, la corrélation d'images volumiques locale a été utilisée pour estimer les champs de déformations dans l'ensemble de l'échantillon du béton de chanvre pour une meilleure compréhension du comportement hygro-morphique global du béton de chanvre.

III.4.3.1. Procédure expérimentale

Dans cette partie de chapitre on propose une approche scientifique qui consiste à utiliser une procédure d'identification basée sur la technique de tomographie aux rayons X couplée à la corrélation volumique où l'hygrométrie du matériau sera considérée lors des scans. L'essai consiste à scanner par la tomographie aux rayons X le même échantillon sollicité à deux humidités relatives différentes, en gardant la même position du scan à l'intérieur du tomographe. Autrement dit, le même échantillon du béton de chanvre a été étudié, il a été conditionné à deux paliers d'humidité relative bien définis et à température constante. A chaque fois qu'il atteignait l'équilibre en masse, il était scanné en micro-tomographe. Ensuite, la corrélation d'images numériques (CIN) permet d'estimer les déformations morphologiques dues aux sollicitations hydriques.

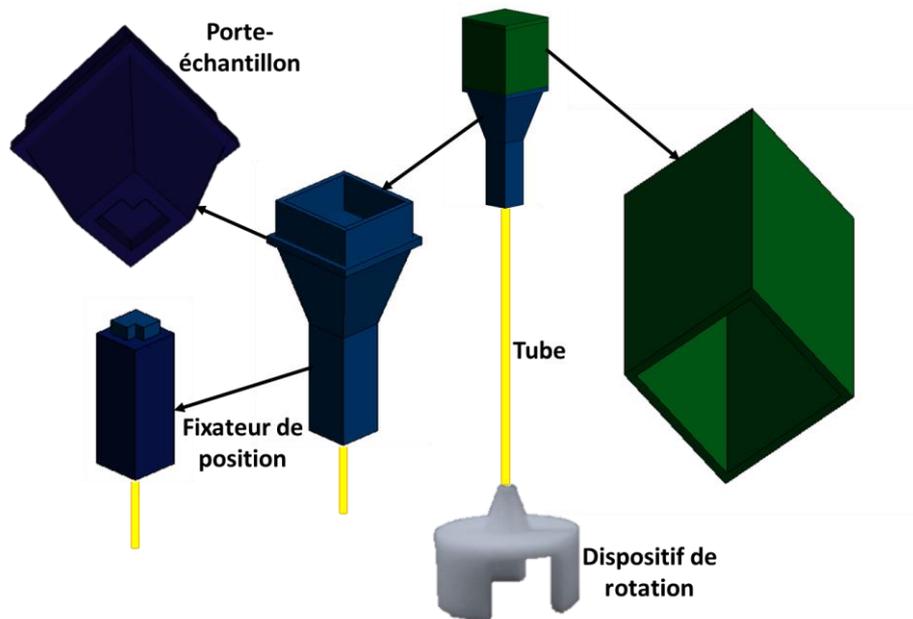


Figure III. 35 : Dispositif adapté pour maintenir le conditionnement de l'échantillon

La difficulté de l'essai réside dans le fait que la durée du scan de l'échantillon dure plusieurs heures, et le matériau peut échanger de l'humidité avec son milieu. De plus il est nécessaire de garder la même position de scan afin de pouvoir utiliser la corrélation d'images numériques pour la détermination des déformations causées que par les sollicitations hydriques appliquées. Afin de conserver une humidité relative constante de l'échantillon du béton de chanvre dans le tomographe pendant l'essai, ainsi que la position du scan initial, un dispositif (figure III. 35) original adapté au tomographe a été conçu[170]. Le porte-échantillon est à base de plexiglas, plusieurs tests réalisés au laboratoire LMT ont confirmé que le porte-échantillon de plexiglas est imperméable à la vapeur d'eau. Il est aussi composé d'un système de fixation qui permet de conserver la même position de scan pour chaque cas de sollicitation hydrique.

Deux cas d'hygrométrie ont été étudiés :

- Etat sec (0% d'humidité relative) : l'échantillon est séché dans une étuve à 60°C jusqu'à stabilisation de sa masse.
- Etat humide (85% d'humidité relative) : l'échantillon est conditionné à une humidité relative de 85% jusqu'à l'équilibre.

L'échantillon du béton de chanvre de dimensions $12*13*13.5 \text{ mm}^3$ a été scanné au tomographe avec les paramètres d'acquisition suivants : Energie de faisceau de 100 KV, curen des électrons de 200 μA , la taille physique du voxel est de 17.1 μm . 1500 radiographies sont acquises au

cours des 360° de rotation. La durée totale d'une seule acquisition est d'environ 2h30 minutes. La figure III. 36 représente la reconstruction 3D de l'échantillon de béton de chanvre scanné au tomographe à rayons X à l'état sec. La radiographie de l'échantillon est effectuée à une résolution de 17.1 μm , cette résolution est largement suffisante pour pouvoir distinguer les différentes phases du matériau (chènevotte, macroporosité, et liant) et leurs variations dimensionnelles vis-à-vis du gonflement étudié dans notre cas.



Figure III. 36 : Reconstruction 3D du béton de chanvre à une résolution de 17.1*17.1*17.1 μm^3

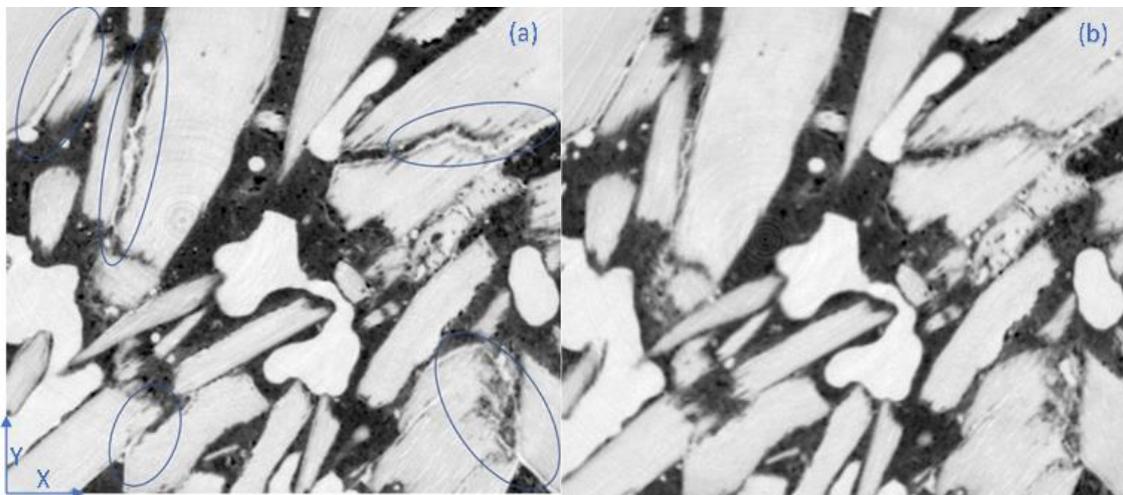


Figure III. 37 : Coupe obtenue par tomographie aux rayons X du béton de chanvre (résolution 17.1 μm) (a) 0% HR (b) 85% HR

Après les scans, l'invariabilité de la teneur en eau de l'échantillon du béton de chanvre a été vérifiée par pesée. Ces conditions expérimentales permettent de quantifier le gonflement et de mieux observer les variations morphologiques du béton de chanvre en passant d'un état hydrique à l'autre. En plus, afin de garantir que la zone étudiée n'a pas du tout subi de transferts d'humidité lors des scans, elle a été choisie de taille de 6,84*6,84*6.84 mm^3 , et

correspond au cœur de l'échantillon. De plus, le choix de ces deux niveaux d'humidité relative distincts permet de quantifier par comparaison entre les différents volumes étudiés, le phénomène de gonflement de la chènevotte, ainsi que ses effets sur la microstructure complexe de béton de chanvre. La figure III. 37 présente deux coupes des volumes obtenus par tomographie aux rayons X à deux états hydriques différents (sec et humide). On remarque une diminution des vides qui se situent entre le liant et la chènevotte, il s'agit de la porosité inter-particulaire. Cette modification de la microstructure du béton de chanvre sous sollicitations hydriques est principalement due à la présence de la chènevotte dans le matériau. En effet, lorsque le béton de chanvre est exposé à des humidités relatives élevées, il commence à absorber l'eau qui peut affecter directement sa microstructure en raison de la forte l'hygroscopicité des particules végétales.

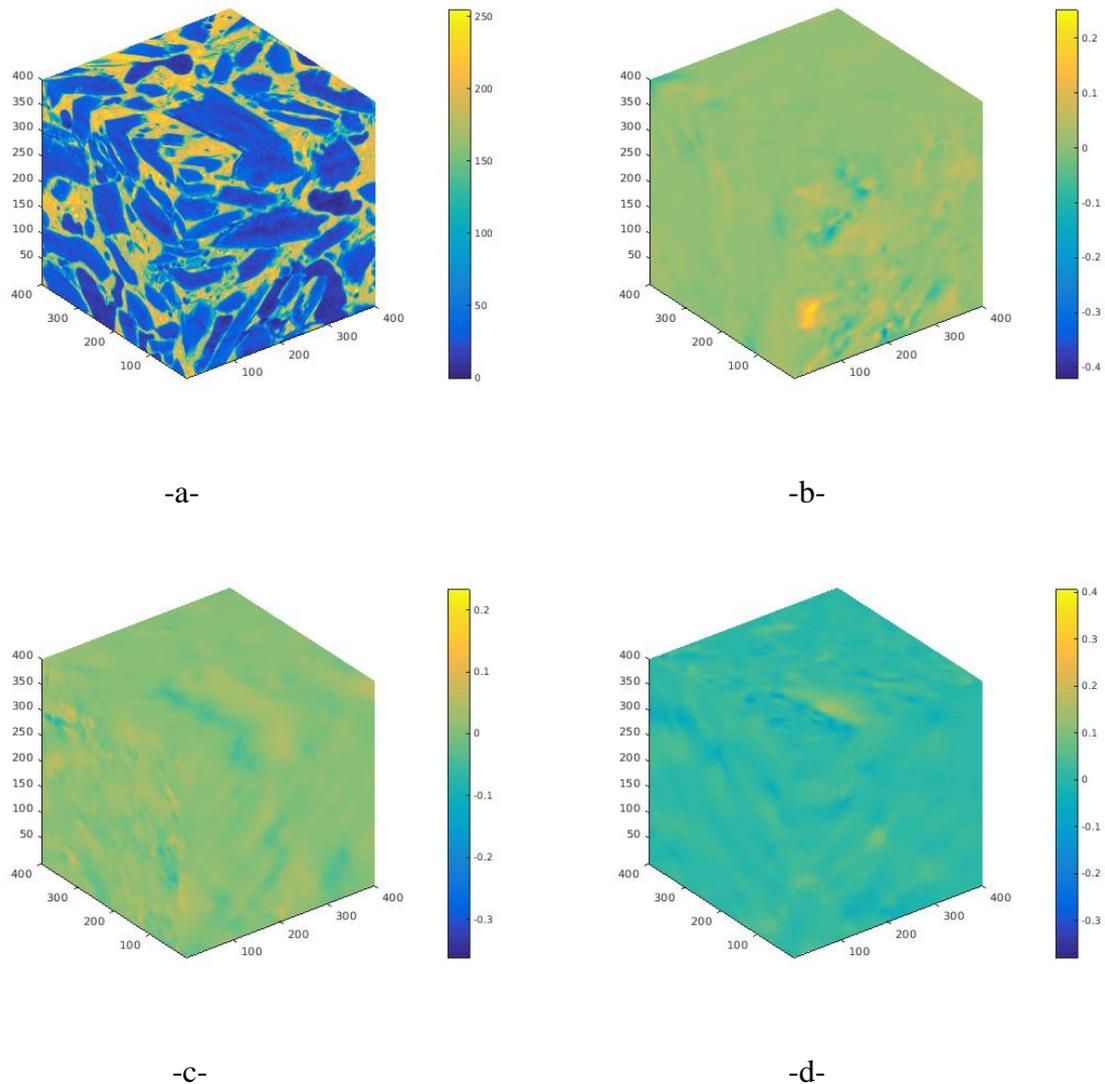
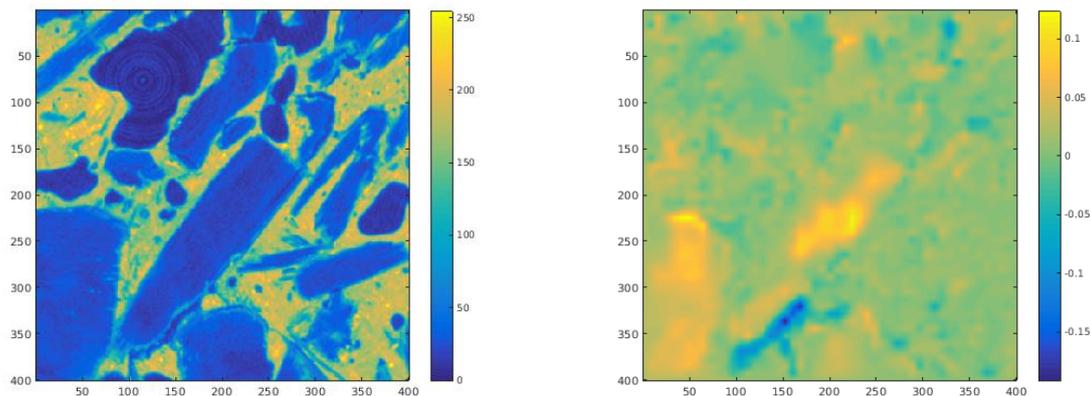


Figure III. 38 : ROI de 400x400x400 pix³ (a) à 0% HR, et déformations équivalentes à 85% HR (b) ϵ_{xx} (c) ϵ_{yy} et (d) ϵ_{zz}

La CIN a été utilisée pour quantifier les différents champs de déformations dans toutes les directions des volumes étudiés. Les résultats des calculs de corrélation d'images 3D présentés dans cette partie du chapitre sont issus des calculs réalisés avec le code Correli-C8R qui utilise des éléments C8 [181] pour la discrétisation. Ensuite, un traitement spécial a été réalisé afin d'extraire les champs de déformations.

Le volume de référence, scanné à l'état sec est illustré dans la figure III. 38 (a). Les champs de déformations dans les directions XX , YY et ZZ entre le volume de référence du béton de chanvre à 0% HR (figure III. 38 (a)) et le volume déformé (85% HR), obtenues par la corrélation d'images numériques 3D sont illustrées dans les figure III. 38 (b), (c) et (d) respectivement. Les déformations ont été calculées dans toutes les directions des volumes étudiés.

La Région d'intérêt (ROI) sélectionnée pour le calcul des champs de déformations est de $400 \times 400 \times 400 \text{ px}^3$ ($6,84 \times 6,84 \times 6,84 \text{ mm}^3$). La figure III. 38 (a) correspond à l'état de référence où le matériau était complètement séché, on peut distinguer les trois phases du matériau : la phase en couleur jaune représente le liant, la phase en couleur bleue représente la chènevotte, et enfin la phase en couleur bleu foncé représente la porosité.



-a-

-b-

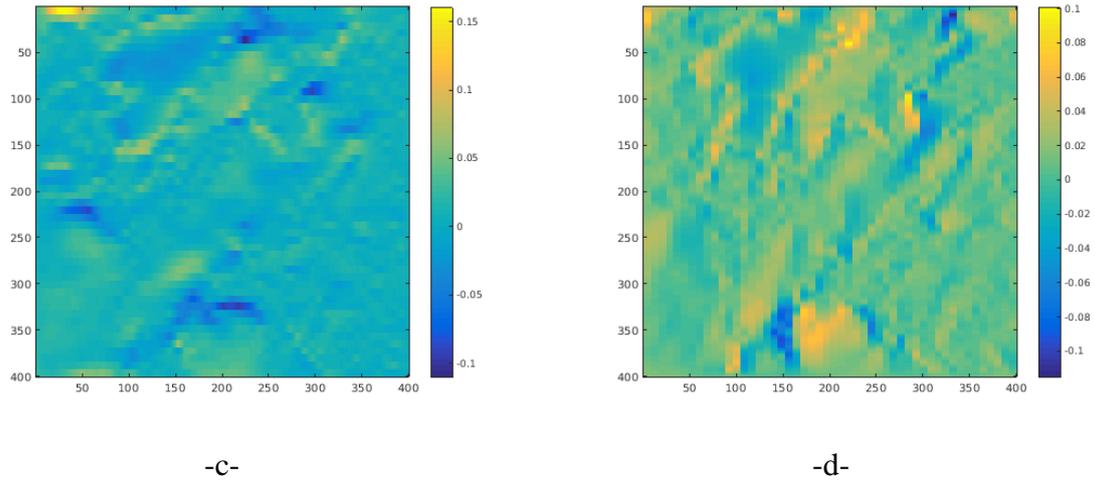
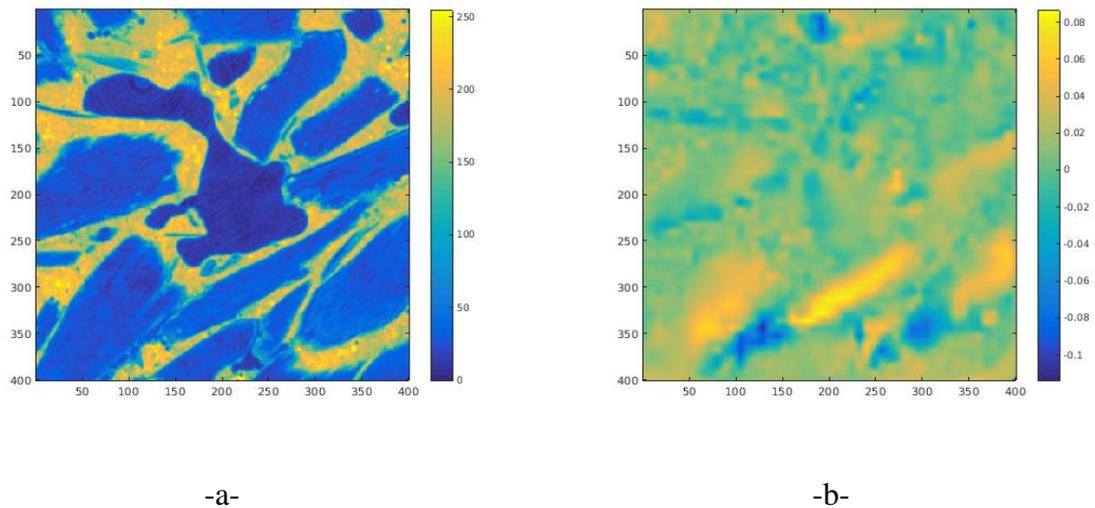


Figure III. 39 : (a) coupe de l'échantillon à 100px (1.71 mm), et Champs de déformations (b) ϵ_{zz} (c) ϵ_{xx} (d) ϵ_{yy}

Les champs de déformations ont été examinés suivant l'orientation et la section sélectionnée au long du volume considéré. Nous présentons deux coupes à 100 px (1.71mm) et 200 px (3.42mm). Ces différentes positions nous permettent de renseigner sur l'ordre de grandeur des déformations quel que soit le slice examiné.

La figure III. 39 (b) présente les champs de déformations dans la direction ZZ sur une surface de l'échantillon située à 100 px à partir de la position 0 px. Cette surface de l'échantillon de référence est illustrée sur la figure III. 39 (a). Les champs de déformations dans les directions XX et YY sur la surface située à 100 pixels sont présentés dans les figures III. 39 (c) et (d) respectivement. Chaque image est représentée dans une échelle choisie sur laquelle on distingue les déformations positives (gonflement) et négatives (rétrécissement).



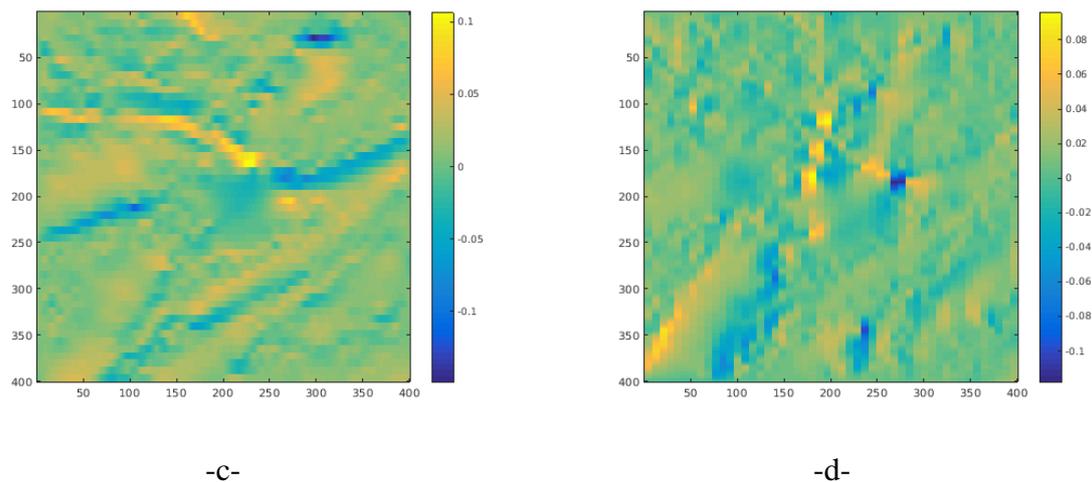


Figure III. 40 : (a) coupe de l'échantillon à 200px (3.42 mm), et Champs de déformations (b) ϵ_{zz} (c) ϵ_{xx} (d) ϵ_{yy}

Une autre représentation des champs de déformations dans la direction ZZ est montrée sur la figure III. 40 (b), ces déformations correspondent à la surface de l'échantillon située cette fois-ci à 200 pixel (3.42mm) pixels à partir de la position 0 pixel. Cette surface de l'échantillon de référence est présentée sur la figure III. 40 (a). Les figure III. 40 (c) et III. 40 (d) illustrent les champs de déformations dans les directions XX et YY respectivement. De même la couleur jaune correspond à la zone dilatée provoquée par le gonflement et la bleue correspond à la zone comprimée résultante. Les deux coupes du volume de référence présentées dans les figures III. 39 -a- et III. 40 -a- permettent de mieux interpréter la déformation après humidification sur les champs de déformations qui leurs correspondent, afin de généraliser par la suite pour les autres figures.

La réponse du béton de chanvre à la sollicitation d'humidité relative de 85% conduit à des variations morphologiques du matériau et l'apparition des déformations dans l'échantillon étudié. Selon les résultats, ces déformations sont beaucoup plus considérables sur la partie végétale du matériau. En effet, les particules végétales subissent un gonflement dû au phénomène d'adsorption d'eau. Ce qui s'explique par les zones dilatées jaunes correspondant aux particules végétales. Le gonflement de la chènevotte contribue alors à la réduction de l'espace poreux (air en bleu foncé) situé entre le liant et les granulats végétaux. D'une manière générale, les zones qui correspondent à la chènevotte présentent une déformation majoritaire positive (augmentation du volume). La porosité diminue toujours en raison du rétrécissement des vides causé par le gonflement de la chènevotte, ce qui a affecté la microstructure du béton de chanvre et a modifié sa morphologie interne.

Ces déformations peuvent être quantifiées dans toutes les directions du matériau, ce qui donne également une idée plus claire de la direction favorable au gonflement. L'avantage de cette technique utilisée, c'est que les déformations sont calculées sur les géométries réelles du béton de chanvre obtenues après la reconstruction 3D. De plus, Les déformations observées dans la zone super hygroscopique (85% d'humidité relative) sont plus importantes que celles observées dans la zone hygroscopique (76 % d'humidité relative).

Enfin, les variations dimensionnelles trouvées montrent que l'anisotropie du matériau conduit à un comportement différent dans chaque direction. Ces déformations doivent être prises en considération pour la prédiction du comportement thermo-hydomécanique du béton de chanvre et d'autre matériau de construction en général.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la caractérisation du comportement hygro-morphique du béton de chanvre. D'abord, plusieurs essais tomographiques ont été réalisés sur le béton de chanvre à différentes résolutions, et les volumes 3D du matériau réel scanné ont été ainsi reconstruits. Ceux-ci nous ont permis par la suite de déterminer un VER et de mesurer la porosité du béton de chanvre à différentes échelles. Ce matériau à une large distribution de la taille des pores allant des micropores aux macropores (vides entre le liant et la chènevotte). Par la suite, la corrélation d'images numériques 2D a permis d'évaluer et d'analyser les champs de déplacements et de déformations à la surface de l'échantillon sous sollicitations hydriques.

Enfin, une méthodologie a été développée couplant l'utilisation des images tomographiques 3D et la corrélation d'images numériques afin de quantifier les déformations du matériau dans chaque direction sous sollicitation hydriques.

Il a été indiqué que la chènevotte présente des déformations importantes en comparant avec le liant. L'humidification du matériau conduit à un gonflement des particules végétales et la diminution de la porosité présente entre le liant et la chènevotte. De plus, le séchage hydrique entraîne un retrait des granulats végétaux et la dilatation de la porosité inter particulaire.

Ce chapitre a mis en évidence la complexité de la microstructure des matériaux poreux de construction, le prochain chapitre sera consacré à une approche permettant une description fine et complète des phénomènes physiques qui interviennent à l'échelle microscopique, pour pouvoir obtenir le comportement macroscopique équivalent.

Chapitre IV

Homogénéisation des HAM transferts dans les matériaux poreux de construction

Pour prédire le comportement hygrothermique des matériaux de constructions, plusieurs modèles phénoménologiques de transferts ont été développés. Les différents paramètres d'entrée de ces modèles sont évalués expérimentalement ou par voie numérique. La plupart des matériaux utilisés dans la construction des bâtiments sont des matériaux poreux présentant à l'échelle microscopique une structure complexe et présentent de fortes hétérogénéités. Les processus physiques de transferts ainsi que la topologie des interfaces liquide vapeur air et leurs interactions avec la matrice solide (lignes de contact, détachement des bulles de vapeur des surfaces solides, . . .) rendent le problème extrêmement complexe. De plus, l'ensemble des phénomènes mis en jeu à l'échelle microscopique sont à la base des phénomènes impliqués à l'échelle macroscopique : Le comportement macroscopique du matériau est fortement dépendant des mécanismes qui agissent aux niveaux de ses constituants. Il est alors nécessaire de disposer des lois macroscopiques qui nous permettent de prendre en compte l'hétérogénéité et la complexité des milieux poreux et de décrire leur comportement global à grande échelle.

Une solution possible pour décrire ces milieux fortement hétérogènes à l'échelle du pore est de les assimiler à des milieux continus équivalents à l'échelle macroscopique ayant le même comportement en moyenne, en utilisant des méthodes d'homogénéisation, aussi appelées changement d'échelles ou passage micro-macro. Le milieu effectif est alors caractérisé par des propriétés de transport effectives, ou coefficients macroscopiques, qui traduisent la physique à l'échelle du pore.

L'une des méthodes d'homogénéisation qui existent est la méthode d'homogénéisation périodique. La méthode d'homogénéisation périodique est principalement basée sur la méthode des développements asymptotiques [81–84]. Cette méthode suppose que la microstructure du milieu macroscopique est constituée d'une répétition périodique d'une certaine cellule élémentaire de base.

Cette méthode d'homogénéisation périodique est plus rigoureuse. Elle nous permet d'obtenir des modèles pertinents. Elle est basée sur une analyse dimensionnelle des équations de transfert à l'échelle microscopique, faisant apparaître naturellement des nombres sans dimension caractérisant le problème

IV.1. Description de la microstructure du milieu périodique

Les éléments de la structure interne du matériau forment ce qu'on appelle microstructure. Cette dernière affecte les propriétés des matériaux macroscopiques de manière significative. A l'échelle macroscopique, de nombreux matériaux présentent une géométrie homogène mais ils sont en réalité très hétérogènes à l'échelle microscopique. En effet, le comportement macroscopique des matériaux dépend fortement des mécanismes impliqués à l'échelle microscopique. La figure IV. 1 représente une coupe tomographique illustrant la microstructure du béton, elle met en évidence la microstructure complexe de ce matériau.

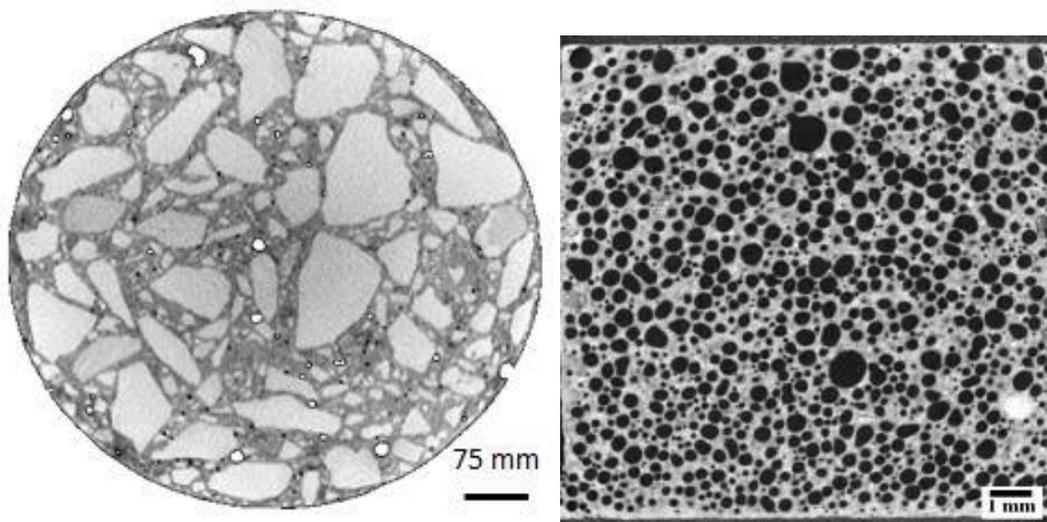


Figure IV. 1 : Image 2D obtenue par tomographie des rayons X du plâtre [165] (à droite) et du béton [182] (à gauche)

Considérons un milieu poreux dont la microstructure constituée de la répétition périodique d'une cellule élémentaire (voir figure IV. 2). Cette cellule est composée d'une phase solide Ω_s^* , une phase liquide Ω_l^* et d'une phase gazeuse Ω_g^* . Les interfaces entre ces différentes phases Γ_{lg}^* , Γ_{sg}^* et Γ_{ls}^* représentent respectivement les interfaces liquide-gaz, solide gaz, et liquide solide.

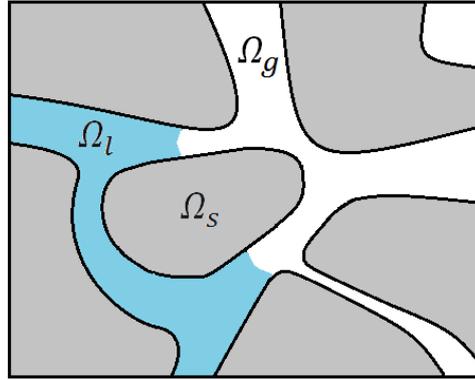


Figure IV. 2 : Exemple d'une microstructure périodique partiellement saturé

IV.2. Description microscopique des équations phénoménologiques HAM :

IV.2.1. Equations de Conservation de la Masse

Les équations de conservation sont écrites séparément pour chaque constituant de chaque phase (liquide, vapeur et air sec) en se référant aux hypothèses suivantes : la phase liquide ne contient qu'une composante (eau), Il n'y a pas de réaction chimique dans la phase gazeuse, Cette dernière est considérée comme un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, et finalement la phase solide est considérée comme indéformable et non réactive.

- Phase liquide

A l'échelle microscopique, l'équation de continuité de l'eau liquide est donnée classiquement par [78,183] :

$$\frac{\partial^* \rho_l^*}{\partial t^*} + \text{div}^*(\rho_l^* v_l^*) = 0 \quad \text{dans } \Omega_l^* \quad \text{IV. 1}$$

- Vapeur dans la phase gazeuse

De même, l'équation de continuité de la vapeur d'eau est donnée par l'équation classique suivante [184]:

$$\frac{\partial^* \rho_v^*}{\partial t^*} + \text{div}^*(\rho_v^* v_v^*) = 0 \quad \text{dans } \Omega_g^* \quad \text{IV. 2}$$

La vapeur d'eau est en mouvement suite à l'agitation thermique. Il s'agit donc d'un processus diffusif [78,185,186]. Ensuite, le flux de vapeur d'eau est donné comme suit :

$$\rho_v^* v_v^* = -D_v^* \text{grad}^* \rho_v^* \quad \text{IV. 3}$$

L'équation IV. 2 devient alors :

$$\frac{\partial^* \rho_v^*}{\partial t^*} - \text{div}^*(D_v^* \text{grad}^* \rho_v^*) = 0 \quad \text{dans } \Omega_g^* \quad \text{IV. 4}$$

- Air sec dans la phase gazeuse

L'équation de continuité de l'air sec est donnée par [187] :

$$\frac{\partial^* \rho_a^*}{\partial t^*} + \text{div}^*(\rho_a^* v_a^*) = 0 \quad \text{dans } \Omega_a^* \quad \text{IV. 5}$$

Les conditions aux limites associées à ces équations sur les différentes interfaces peuvent s'écrire :

Solide-liquide :

L'interface liquide-solide est considérée comme une surface passive (imperméable). La condition aux limites sur l'interface liquide-solide Γ_{ls}^* pour l'équation de conservation de la masse d'eau est donnée par :

$$v_l^* n_{ls}^* = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{ls}^* \quad \text{IV. 6}$$

Gaz-solide :

L'interface gaz-solide est également considérée comme interface passive, elle comporte deux phases différentes :

- Interface vapeur d'eau-solide :

$$v_v^* n_{gs}^* = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs}^* \quad \text{IV. 7}$$

Ainsi, la condition relative à l'équation IV. 4 de conservation de la masse de la vapeur d'eau devient :

$$(D_v^* \text{grad}^* \rho_v^*) n_{gs}^* = 0 \quad \Gamma_{gs}^* \quad \text{IV. 8}$$

- Interface air sec-solide :

$$v_a^* n_{gs}^* = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs}^* \quad \text{IV. 9}$$

Liquide-gaz

Dans la région hygroscopique, où l'on a une faible humidité relative, la condition aux limites sur l'interface liquide-gaz de l'équation IV. 4 est exprimé par [186] :

$$(D_v^* grad^* \rho_v^*) n_{gl}^* = -\rho_v^* v_v^* n_{gl}^* \quad \text{sur } \Gamma_{lg}^* \quad \text{IV. 10}$$

L'équation de continuité à l'interface liquide-gaz est donnée par [186,187]:

$$\rho_l^* (v_l^* - \omega_{lg}^*) n_{lg}^* = \rho_v^* (v_v^* - \omega_{lg}^*) n_{lg}^* \quad \text{sur } \Gamma_{lg}^* \quad \text{IV. 11}$$

En prenant compte de l'équation IV. 3 cette dernière condition devient :

$$\rho_l^* (v_l^* - \omega_{lg}^*) n_{lg}^* = (D_v^* grad^* \rho_v^* + \rho_v^* \omega_{lg}^*) n_{gl}^* \quad \text{sur } \Gamma_{lg}^* \quad \text{IV. 12}$$

Avec : $n_{lg}^* = -n_{gl}^*$

Et pour l'air sec, l'équation de continuité à l'interface prend la forme suivante [183,184]:

$$\rho_a^* (v_a^* - \omega_{lg}^*) n_{lg}^* = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{lg}^* \quad \text{IV. 13}$$

L'interface gaz-liquide résulte d'une modification thermodynamique de l'eau. Il est supposé donc que l'air sec n'intervient pas dans le changement de phase liquide-vapeur sur cette interface.

IV.2.2. Equations de conservation de l'énergie :

Dans la phase solide, le transfert de chaleur est gouverné par la conduction seulement :

$$\rho_s^* c_s^* \frac{\partial^* T_s^*}{\partial t^*} - div^*(\lambda_s^* grad^* T_s^*) = 0 \quad \text{dans } \Omega_s^* \quad \text{IV. 14}$$

En revanche, dans les phases liquide et gazeuse, le transfert de chaleur est régi par la conduction et la convection. La conservation d'énergie de chaque phase peut être écrite respectivement [74,188]:

$$\rho_\gamma^* c_\gamma^* \frac{\partial^* T_\gamma^*}{\partial t^*} - div^*(\lambda_\gamma^* grad^* T_\gamma^*) + \rho_\gamma^* c_\gamma^* v_\gamma^* grad^* T_\gamma^* = 0 \quad \text{dans } \Omega_\gamma^* \quad \text{IV. 15}$$

Avec $\gamma = l$ ou g

Les conditions aux limites sur les différentes interfaces sont données par :

$$\text{Gaz-liquide:} \quad T_g^* = T_l^* \quad \text{sur } \Gamma_{gl}^* \quad \text{IV. 16}$$

$$-\lambda_g^* \frac{\partial^* T_g^*}{\partial y^*} \cdot n_{gl}^* = -\lambda_l^* \frac{\partial^* T_l^*}{\partial y^*} \cdot n_{gl}^* + q_{gl}^* \cdot n_{gl}^* \quad \text{sur } \Gamma_{gl}^* \quad \text{IV. 17}$$

$$\text{Gaz-solide:} \quad T_g^* = T_s^* \quad \text{sur } \Gamma_{gs}^* \quad \text{IV. 18}$$

$$\lambda_g^* \frac{\partial^* T_g^*}{\partial y^*} \cdot n_{gs}^* = \lambda_s^* \frac{\partial^* T_s^*}{\partial y^*} \cdot n_{gs}^* \quad \text{sur } \Gamma_{gs}^* \quad \text{IV. 19}$$

$$\text{Liquide-solide:} \quad T_l^* = T_s^* \quad \text{sur } \Gamma_{ls}^* \quad \text{IV. 20}$$

$$\lambda_l^* \frac{\partial^* T_l^*}{\partial y^*} \cdot n_{ls}^* = \lambda_s^* \frac{\partial^* T_s^*}{\partial y^*} \cdot n_{ls}^* \quad \text{sur } \Gamma_{ls}^* \quad \text{IV. 21}$$

Ces termes (équations IV. 16 – IV. 21) représentent la continuité des températures et des flux de chaleur sur les interfaces Γ_{gl}^* , Γ_{gs}^* et Γ_{ls}^* . En plus des termes de conduction et de convection, La consommation ou la production d'énergie dues au changement de phase sont ajoutées au bilan d'énergie. Dans ce cas, q_{gl}^* est une source hétérogène de chaleur [71,74] au niveau de l'interface liquide- gaz.

D'autre part, la moyenne temporelle de chaque équation dans la phase i est donnée par :

$$\left\langle \frac{\partial^* \varphi^*}{\partial t^*} \right\rangle_i = \frac{\partial^*}{\partial t^*} \langle \varphi^* \rangle_i - \frac{1}{|\Omega|^*} \int_{\Gamma_{lg}^*} \varphi^* \omega_{lg}^* n_{lg}^* d\Gamma^* \quad \text{IV. 22}$$

Avec : $\varphi^* = \rho_v^*, \rho_l^*, \rho_a^*, T_l^*, T_g^*$ et T_s^*

Où :

ρ_i : représente la masse volumique de la phase " i ", v_i : sa vitesse. ω_{lg} : la vitesse de l'interface liquide-gaz. n_{ij} : le vecteur unitaire normal dirigé du domaine Ω_i vers le domaine Ω_j , et D_v le coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air libre.

IV.3. Analyse dimensionnelle des équations

Les grandeurs physiques sans dimensions sont définies en divisant chaque variable par sa valeur caractéristique. Ces variables sont estimées en fonction du paramètre ε qui représente le rapport entre la taille caractéristique à l'échelle microscopique " l " et la taille caractéristique à l'échelle

macroscopique "L". Le paramètre de perturbation ε , vérifie la condition de séparation d'échelle et l'existence d'un milieu équivalent :

$$\varepsilon = \frac{l}{L} \ll 1 \quad \text{IV. 23}$$

En introduisant dans les équations précédentes (équations IV. 1 – IV. 22) les grandeurs adimensionnelles suivantes :

$$\begin{aligned} y &= \frac{y^*}{l} & x &= \frac{x^*}{L} & t &= \frac{t^*}{t^r} & \omega_{lg} &= \frac{\omega_{lg}^*}{\omega_{lg}^r} \\ D_v &= \frac{D_v^*}{D_v^r} & \rho_\beta &= \frac{\rho_\beta^*}{\rho_\beta^r} & v_\beta &= \frac{v_\beta^*}{v_\beta^r} & T_\alpha &= \frac{T_\alpha^*}{T_\alpha^r} \\ C_\alpha &= \frac{C_\alpha^*}{C_\alpha^r} & \lambda_\alpha &= \frac{\lambda_\alpha^*}{\lambda_\alpha^r} & q_{lg} &= \frac{q_{lg}^*}{q_{lg}^r} \end{aligned}$$

Avec : $\alpha = g, l$ et $s \quad \beta = a, v$ et l

Où y représente la variable d'espace microscopique, et x la variable d'espace macroscopique. Les variables indexées par "r" sont les variables de référence, supposées connues. Le signe * désigne les grandeurs dimensionnelles, et les variables apparues sans * sont des grandeurs adimensionnelles.

En remplaçant les variables adimensionnelles définies dans les équations de transport précédentes (équations IV. 1 – IV. 22), on obtient les nouvelles équations adimensionnelles :

De transport de l'eau liquide :

$$\tau_l \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \text{div}(\rho_l v_l) = 0 \quad \text{dans } \Omega_l \quad \text{IV. 24}$$

De transport de la vapeur d'eau :

$$\tau_v \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \text{div}(D_v \text{grad} \rho_v) = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 25}$$

De transport de l'air sec

$$\tau_a \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \text{div}(\rho_a v_a) = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 26}$$

Les conditions aux limites associées à ces équations sur les différentes interfaces deviennent :

Liquide-solide :

$$v_l \cdot n_{ls} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 27}$$

Gaz-solide :

$$(D_v \text{grad} \rho_v) \cdot n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 28}$$

$$v_a \cdot n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 29}$$

Gaz-liquide :

$$-(D_v \text{grad} \rho_v) \cdot n_{gl} = \gamma \rho_v v_v \cdot n_{gl} \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 30}$$

Enfin, l'analyse dimensionnelle des équations de continuité sur l'interface liquide-gaz est donnée par :

$$(\lambda \rho_l v_l - \zeta \rho_l \omega_{lg}) \cdot n_{lg} = (D_v \text{grad} \rho_v + \delta \rho_v \omega_{lg}) \cdot n_{gl} \quad \text{sur } \Gamma_{lg} \quad \text{IV. 31}$$

$$\sigma_a \rho_a (v_a + \omega_{lg}) \cdot n_{lg} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{lg} \quad \text{IV. 32}$$

Les équations de conservation d'énergie dans les trois phases sont :

$$P_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} - \text{div}(\lambda_s \text{grad} T_s) = 0 \quad \text{dans } \Omega_s \quad \text{IV. 33}$$

$$P_s C_1 C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} - \lambda_1 \text{div}(\lambda_l \text{grad} T_l) + P_l C_l v_l \text{grad} T_l = 0 \quad \text{dans } \Omega_l \quad \text{IV. 34}$$

$$P_s C_2 C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} - \lambda_2 \text{div}(\lambda_g \text{grad} T_g) + P_l C_3 v_1 C_g v_g \text{grad} T_g = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 35}$$

Avec $C_\alpha = \rho_\alpha c_\alpha$

Ensuite, les conditions aux limites des différentes interfaces deviennent :

$$\text{Gaz-liquide :} \quad T_g = T_l \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 36}$$

$$\lambda_3 \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \cdot n_{gl} = \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial y} \cdot n_{gl} + N_{lv} q_{gl} \cdot n_{gl} \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 37}$$

$$\text{Gaz-solide :} \quad T_g = T_s \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 38}$$

$$\lambda_2 \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \cdot n_{gs} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \cdot n_{gs} \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 39}$$

$$\text{Liquide-solide :} \quad T_l = T_s \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 40}$$

$$\lambda_1 \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial y} \cdot n_{ls} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \cdot n_{ls} \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 41}$$

Les relations de moyenne temporelle de chaque équation prennent alors les expressions suivantes :

$$\left\langle \frac{\partial \rho_\beta}{\partial t} \right\rangle = \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho_\beta \rangle - \frac{\mathcal{R}_\beta}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{lg}^*} \rho_\beta \omega_{gl} \cdot n_{lg} d\Gamma \quad \text{IV. 42}$$

$$\left\langle C_\alpha \frac{\partial T_\alpha}{\partial t} \right\rangle = C_\alpha \frac{\partial}{\partial t} \langle T_\alpha \rangle - \frac{\mathcal{R}_T}{|\Omega|^*} \int_{\Gamma_{lg}^*} T_\alpha \omega_{lg} \cdot n_{lg} d\Gamma \quad \text{IV. 43}$$

Les nombres sans dimension suivants caractérisant les différents transferts apparaissent naturellement après l'analyse dimensionnelle des équations de transfert microscopique :

$$\begin{aligned} \tau_v &= \frac{l^2}{D_v^r t^r} & \tau_l &= \frac{l}{v_l^r t^r} & \tau_a &= \frac{l}{v_a^r t^r} & \gamma &= \frac{v_l^r l}{D_v^r} & \lambda &= \frac{\rho_l^r v_l^r l}{\rho_v^r D_v^r} \\ \delta &= \frac{\omega_{gl}^r l}{D_v^r} & \zeta &= \frac{\rho_l^r}{\rho_v^r} \delta & \sigma_a &= \frac{v_a}{\omega_{lg}} & P_s &= \frac{C_a^r l^2}{\lambda_s^r t^r} & P_l &= \frac{C_l^r v_l^r l}{\lambda_s^r} \\ C_1 &= \frac{C_l^r}{C_s^r} & C_2 &= \frac{C_g^r}{C_s^r} & C_3 &= \frac{C_g^r}{C_l^r} & \lambda_1 &= \frac{\lambda_l^r}{\lambda_s^r} & \lambda_2 &= \frac{\lambda_g^r}{\lambda_s^r} \\ \lambda_3 &= \frac{\lambda_g^r}{\lambda_l^r} & v_1 &= \frac{v_g^r}{v_l^r} & N_{lv} &= \frac{l}{\lambda_l^r} q_{gl}^r & \mathcal{R}_v &= \frac{t^r \omega_{gl}^r}{l} & \mathcal{R}_a &= \frac{t^r \omega_{gl}^r}{l} \\ \mathcal{R}_l &= \frac{t^r \omega_{lg}^r}{l} & \mathcal{R}_T &= \frac{t^r \omega_{lg}^r}{l} \end{aligned}$$

Tous ces paramètres qui apparaissent sont des nombres sans dimension, ils caractérisent les différents transferts considérés dans les milieux poreux, par exemple : l'inverse du nombre de Fourier τ_v, P_s , le nombre de Peclet P_l, δ , Le rapport des conductivités thermiques $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, Le rapport des capacités thermiques C_1, C_2, C_3 . Afin de se ramener à un problème adimensionnel à une seule échelle, nous exprimons les nombres sans dimension en fonction du paramètre de perturbation ε . Pour un transfert d'humidité en ses deux formes (liquide et vapeur). Compte tenu des valeurs caractéristiques, des différents phénomènes physiques, et pour des problèmes homogénéisables. Les ordres de grandeur des nombres sans dimension correspondant sont alors donnés par [186,188,189] :

$$\begin{aligned}
 \tau_l &= \mathcal{O}(\varepsilon) & \tau_v &= \mathcal{O}(\varepsilon^3) & \tau_a &= \mathcal{O}(\varepsilon) & \gamma &= \mathcal{O}(\varepsilon^2) & \lambda &= \mathcal{O}(\varepsilon) & \delta &= \mathcal{O}(\varepsilon^2) \\
 \zeta &= \mathcal{O}(\varepsilon) & \sigma_a &= \mathcal{O}(1) & P_s &= \mathcal{O}(\varepsilon^2) & C_1 &= \mathcal{O}(1) & C_2 &= \mathcal{O}(\varepsilon) & C_3 &= \mathcal{O}(\varepsilon) \\
 \lambda_1 &= \mathcal{O}(1) & \lambda_2 &= \mathcal{O}(\varepsilon) & \lambda_3 &= \mathcal{O}(\varepsilon) & N_{lv} &= \mathcal{O}(\varepsilon^2) & P_l &= \mathcal{O}(\varepsilon) & v_1 &= \mathcal{O}(\varepsilon) \\
 \mathcal{R}_T &= \mathcal{O}(\varepsilon) & \mathcal{R}_v &= \mathcal{O}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) & \mathcal{R}_l &= \mathcal{O}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) & \mathcal{R}_g &= \mathcal{O}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)
 \end{aligned}$$

IV.4. Modèles (passage) macroscopiques

La procédure classique d'homogénéisation périodique consiste à remplacer les ordres de grandeur des nombres sans dimension dans le système d'équations adimensionnelles (équations IV.24 – IV. 43). Ensuite les variables inconnues du problème sont recherchées sous la forme d'un développement en série formelle en fonction du paramètre de perturbation ε comme suit :

$$\psi(x, y) = \psi^{(0)}(x, y) + \varepsilon\psi^{(1)}(x, y) + \varepsilon^2\psi^{(2)}(x, y) + \dots \quad \text{IV. 44}$$

Où : $\psi = \rho_\beta, v_\beta, \omega_{lg}$ et T_α $\alpha = g, l$ et s $\beta = a, v$ et l

Notons que toutes Les grandeurs ψ^i sont y-périodiques. Les deux variables x et y sont reliées par : $x = \varepsilon y$. Les opérateurs de dérivation *grad* et *div* s'écrivent :

$$grad = grad_y + \varepsilon grad_x = \frac{\partial}{\partial y} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \quad \text{IV. 45}$$

$$div = div_y + \varepsilon div_x \quad \text{IV. 46}$$

En annulant les facteurs des différentes puissances successives de ε , on obtient une série de problèmes en cascade couplés $\mathcal{P}_0, \mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2 \dots$. Après calcul, on montre que les inconnues à l'ordre

principal sont solutions des équations homogénéisées couplées de transfert de chaleur, air et d'humidité à l'échelle macroscopique :

IV.4.1. Transfert d'humidité

IV.4.1.1. Phase liquide

En annulant le facteur de ε^0 dans les équations IV.24 et IV. 27 on obtient le problème \mathcal{P}_0 :

$$\operatorname{div}_y(\rho_l^0 v_l^0) = 0 \quad \text{dans } \Omega_l \quad \text{IV. 47}$$

$$v_l^0 n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 48}$$

Ensuite, l'annulation du facteur de ε^1 dans les équations IV.24 et IV. 27 permet d'obtenir le problème \mathcal{P}_1 :

$$\frac{\partial \rho_l^0}{\partial t} + \operatorname{div}_y(\rho_l^1 v_l^0 + \rho_l^0 v_l^1) + \operatorname{div}_x(\rho_l^0 v_l^0) = 0 \quad \text{dans } \Omega_l \quad \text{IV. 49}$$

$$v_l^1 n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 50}$$

L'équation macroscopique du transfert de l'eau liquide est obtenue en moyennant l'équation précédente dans le domaine Ω_l :

$$\left\langle \frac{\partial \rho_l^0}{\partial t} \right\rangle_l + \langle \operatorname{div}_y(\rho_l^1 v_l^0 + \rho_l^0 v_l^1) \rangle_l + \langle \operatorname{div}_x(\rho_l^0 v_l^0) \rangle_l = 0 \quad \text{dans } \Omega_l \quad \text{IV. 51}$$

Et en utilisant le théorème de la divergence, le deuxième terme de cette dernière équation devient :

$$\langle \operatorname{div}_y(\rho_l^1 v_l^0 + \rho_l^0 v_l^1) \rangle_l = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_l^1 v_l^0 + \rho_l^0 v_l^1) n_{lg} d\Gamma \quad \text{IV. 52}$$

L'annulation du facteur ε^1 dans l'équation IV. 42 relative à la phase liquide donne par ailleurs :

$$\left\langle \frac{\partial \rho_l^0}{\partial t} \right\rangle_l = \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho_l^0 \rangle_l - \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_l^0 \omega_{lg}^1 + \rho_l^1 \omega_{lg}^0) n_{lg} d\Gamma \quad \text{IV. 53}$$

L'équation IV. 51 devient :

$$\frac{\partial \langle \rho_l^0 \rangle_l}{\partial t} + \text{div}_x \langle \rho_l^0 v_l^0 \rangle_l + \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_l^1 v_l^0 + \rho_l^0 v_l^1) n_{lg} d\Gamma \frac{1}{|\Omega|} - \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_l^0 \omega_{lg}^1 + \rho_l^1 \omega_{lg}^0) n_{lg} d\Gamma = 0 \quad \text{IV. 54}$$

On aura alors :

$$\frac{\partial \langle \rho_l^0 \rangle_l}{\partial t} + \text{div}_x (\langle \rho_l^0 v_l^0 \rangle_l) + \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_l^0 (v_l^1 - \omega_{lg}^1) + \rho_l^1 (v_l^0 - \omega_{lg}^0)) n_{lg} d\Gamma = 0 \quad \text{IV. 56}$$

Rappelons la relation reliant les deux moyennes : phase et intrinsèque $\langle \rho_l \rangle = \theta_l \langle \rho_l \rangle^l$, où la valeur moyenne $\langle \rho_l \rangle^l$ correspond à la masse volumique du liquide ρ_l qui peut être supposée constante [78]. Ainsi, l'équation macroscopique de transfert de l'eau liquide obtenue après calcul est donnée par :

$$\rho_l^0 \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \text{div}_x (\rho_l^0 \langle v_l^0 \rangle_l) + m_l = 0 \quad \text{IV. 57}$$

Avec

$$m_l = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_l^0 (v_l^1 - \omega_{lg}^1) + \rho_l^1 (v_l^0 - \omega_{lg}^0)) \cdot n_{lg} d\Gamma \quad \text{IV. 58}$$

m_l : représente le taux massique d'évaporation de la phase liquide à l'interface liquide-gaz.

Le flux du liquide visqueux est régi par la loi de Darcy couplée à l'échelle macroscopique comme suit [40,190]

$$v_l = -\Lambda_{ll} \nabla (P - P_c) \quad \text{IV. 59}$$

Où Λ_{ll} représente le tenseur de Darcy définie par l'expression [40,90] :

$$\Lambda_{ll} = \frac{K_{rl} K_l}{\mu_l} \quad \text{IV. 60}$$

K_{rl} : est la perméabilité relative de la phase liquide, K_l est la perméabilité intrinsèque du matériau, et μ_l est la viscosité du liquide.

La pression capillaire P_c est une caractéristique du milieu poreux dépendante, à la fois, de la température et de la teneur en eau, ce qui nous permet d'écrire :

$$\nabla P_c = \left(\frac{\partial P_c}{\partial \theta_l} \right) \nabla \theta_l + \left(\frac{\partial P_c}{\partial T} \right) \nabla T \quad \text{IV. 61}$$

L'expression de v_l est alors donnée par l'équation suivantes :

$$v_l = \Lambda_{ll} \left(\frac{\partial P_c}{\partial \theta_l} \right) \nabla \theta_l + \Lambda_{ll} \left(\frac{\partial P_c}{\partial T} \right) \nabla T - \Lambda_{ll} \nabla P \quad \text{IV. 62}$$

Enfin, L'équation de transfert de l'eau liquide s'écrit :

$$\rho_l^0 \frac{\partial \theta_l}{\partial t} - \rho_l^0 \operatorname{div}_x \left(-\Lambda_{ll} \left(\frac{\partial P_c}{\partial \theta_l} \right) \nabla \theta_l - \Lambda_{ll} \left(\frac{\partial P_c}{\partial T} \right) \nabla T + \Lambda_{ll} \nabla P \right) + m_l = 0 \quad \text{IV. 63}$$

IV.4.1.2. Phase Vapeur

L'annulation du facteur de ε^0 dans les équations IV. 25, IV.28 et IV. 30 conduit au problème \mathcal{P}_0 qui s'écrit :

$$-\operatorname{div}_y \left(D_v \cdot \frac{\partial \rho_v^0}{\partial y} \right) = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 64}$$

$$D_v \cdot \frac{\partial \rho_v^0}{\partial y} n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 65}$$

$$D_v \cdot \frac{\partial \rho_v^0}{\partial y} n_{gl} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 66}$$

L'inconnue ρ_v^0 est recherchée sous la forme : $\rho_v^0(x, y) = \rho_v^0(x)$, cette solution est indépendante de la variable y . Par la suite, En annulant le facteur de ε^1 dans les équations IV. 25, IV.28 et IV. 30 on obtient le problème \mathcal{P}_1 :

$$-\operatorname{div}_y \left(D_v \left(\frac{\partial \rho_v^1}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} \right) \right) = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 67}$$

$$D_v \left(\frac{\partial \rho_v^1}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} \right) n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 68}$$

$$D_v \left(\frac{\partial \rho_v^1}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} \right) n_{gl} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 69}$$

La solution de ce problème s'écrit sous la forme :

$$\rho_v^1(x, y) = \chi(y) \frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} + \bar{\rho}_v^{-1}(x) \quad \text{IV. 70}$$

$\bar{\rho}_v^{-1}(x)$: est une fonction arbitraire indépendante de y . En remplaçant l'expression de $\rho_v^1(x, y)$ dans les équations IV.67 – IV. 69 on obtient le problème local caractérisant $\chi(y)$:

$$\text{div}_y \left(D_v \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) \right) = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 71}$$

$$D_v \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 72}$$

$$D_v \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) n_{gl} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 73}$$

$$\langle \chi \rangle_g = 0 \quad \text{IV. 74}$$

Enfin, En annulant le facteur de ε^2 dans les équations IV. 25, IV.28 et IV. 30 on obtient le problème \mathcal{P}_2 :

$$-\text{div}_y \left(D_v \left(\frac{\partial \rho_v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^1}{\partial x} \right) \right) - \text{div}_x \left(D_v \left(\frac{\partial \rho_v^1}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} \right) \right) = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 75}$$

$$D_v \left(\frac{\partial \rho_v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^1}{\partial x} \right) n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 76}$$

$$D_v \left(\frac{\partial \rho_v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^1}{\partial x} \right) n_{gl} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 77}$$

L'équation macroscopique du transfert d'humidité en phase vapeur est obtenue en moyennant l'équation précédente :

$$-\langle \text{div}_y \left(D_v \left(\frac{\partial \rho_v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^1}{\partial x} \right) \right) \rangle_g - \langle \text{div}_x \left(D_v \left(\frac{\partial \rho_v^1}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} \right) \right) \rangle_g = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 78}$$

Et en utilisant le théorème de la divergence, le deuxième terme de cette dernière équation devient :

$$\langle \text{div}_y \left(D_v \left(\frac{\partial \rho_v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^1}{\partial x} \right) \right) \rangle_g = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{gl}} D_v \left(\frac{\partial \rho_v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^1}{\partial x} \right) n_{gl} d\Gamma \quad \text{IV. 79}$$

Alors l'équation IV. 78 devient :

$$-div_x \left(\langle D_v \left(\frac{\partial \rho_v^1}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} \right) \rangle_g \right) - \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{gl}} D_v \left(\frac{\partial \rho_v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^1}{\partial x} \right) n_{gl} d\Gamma = 0 \quad \text{IV. 80}$$

Rappelons que :

$$\rho_v^1(x, y) = \chi(y) \frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} + \bar{\rho}_v^1(x) \quad \text{IV. 81}$$

Alors :

$$D_v \left(\frac{\partial \rho_v^1}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} \right) = D_v \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) \frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} \quad \text{IV. 82}$$

L'équation homogénéisée de transfert d'humidité en phase vapeur à l'échelle macroscopique obtenue s'écrit :

$$div_x \left(-D_v^{hom} \left(\frac{\partial \rho_v^0}{\partial x} \right) \right) - m_g = 0 \quad \text{IV. 83}$$

Avec :

$$m_g = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{gl}} D_v \left(\frac{\partial \rho_v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho_v^1}{\partial x} \right) \cdot n_{gl} d\Gamma \quad \text{IV. 84}$$

m_g : représente le taux massique de condensation de la vapeur d'eau à l'interface liquide-gaz.

La densité de vapeur est une fonction de la température, de la teneur en eau et de la pression totale.

$$\nabla \rho_v = \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial \theta_l} \right) \nabla \theta_l + \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right) \nabla T + \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial P} \right) \nabla P \quad \text{IV. 85}$$

On aura :

$$-div_x \left(D_v^{hom} \left(\left(\frac{\partial \rho_v}{\partial \theta_l} \right) \nabla \theta_l + \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right) \nabla T + \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial P} \right) \nabla P \right) \right) - m_g = 0 \quad \text{IV. 86}$$

L'annulation du facteur ε^2 dans l'équation de conservation de la masse au niveau de l'interface liquide-gaz (équation IV. 31) permet d'obtenir :

$$m_l = m_g \quad \text{IV. 87}$$

Cette expression traduit l'équation de conservation de masse à l'interface liquide-gaz, elle peut être interprétée comme l'égalité des flux de molécules échappant à la phase condensée et y pénétrant.

Pour obtenir une description complète du transfert total d'humidité, les deux équations de transfert d'humidité sous ses deux formes IV. 63 et IV. 86 doivent être additionnée ensemble. Donc, l'équation macroscopique du transfert d'humidité est donnée par :

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} - \text{div}_x(j_l + j_v) = 0 \quad \text{IV. 88}$$

Avec :

$$j_l = D_{\theta,l} \nabla \theta_l + D_{T,l} \nabla T - D_{P,l} \nabla P \quad j_v = D_{\theta,v} \nabla \theta_l + D_{T,v} \nabla T + D_{P,v} \nabla P$$

$$D_{\theta,l} = -\Lambda_{ll} \left(\frac{\partial P_c}{\partial \theta_l} \right) \quad D_{\theta,v} = \frac{1}{\rho_l} D_v^{hom} \frac{\partial \rho_v}{\partial \theta_l}$$

$$D_{T,l} = -\Lambda_{ll} \left(\frac{\partial P_c}{\partial T} \right) \quad D_{T,v} = \frac{1}{\rho_l} D_v^{hom} \frac{\partial \rho_v}{\partial T}$$

$$D_{P,l} = \Lambda_{ll} \quad D_{P,v} = \frac{1}{\rho_l} D_v^{hom} \frac{\partial \rho_v}{\partial P}$$

Ensuite, la conservation de l'équation de masse finale devient :

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} - \text{div}_x(D_\theta \nabla \theta_l + D_T \nabla T - D_P \nabla P) = 0 \quad \text{IV. 89}$$

$D_\theta = D_{\theta,v} + D_{\theta,l}$: est coefficient de diffusion macroscopique, donné par la somme du coefficient de diffusion à la vapeur et le coefficient de diffusion de la phase liquide.

$D_T = D_{T,v} + D_{T,l}$: est le coefficient de thermogradient donné par la somme du coefficient de thermogradient de la phase vapeur et le coefficient thermogradient de la phase liquide.

$D_P = D_{P,v} + D_{P,l}$: est le coefficient de filtration (somme du coefficient de filtration de l'eau liquide et coefficient de filtration de la vapeur d'eau).

D_v^{hom} : désigne le tenseur de diffusion de vapeur d'eau homogénéisé.

$$D_v^{hom} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_g} D_v \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) d\Omega \quad \text{IV. 90}$$

Le tenseur de diffusion homogénéisé dépend du coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air, mais aussi de la géométrie de la microstructure. Le rôle de cette dernière apparaît explicitement à travers la variable locale χ , le calcul de cette variable dépend de la connaissance de la morphologie du milieu poreux.

$\chi(y)$: est périodique et de moyenne nulle sur Ω_g . Le vecteur χ est solution du problème local :

$$\begin{aligned} \operatorname{div}_y \left(D_v \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) \right) &= 0 && \text{dans } \Omega_g \\ D_v \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) \cdot n_{gs} &= 0 && \text{sur } \Gamma_{gs} \\ D_v \left(\frac{\partial \chi}{\partial y} + I \right) \cdot n_{gl} &= 0 && \text{sur } \Gamma_{gl} \\ \langle \chi \rangle_g &= 0 \end{aligned} \quad \text{IV. 91}$$

IV.4.2. Transfert de la phase gazeuse

En annulant le facteur de ε^0 dans les équations IV. 26 et IV. 29 on obtient le problème \mathcal{P}_0 :

$$\operatorname{div}_y(\rho_a^0 v_a^0) = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 92}$$

$$v_a^0 n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 93}$$

En annulant le facteur de ε^1 dans les équations IV. 26 et IV. 29 on obtient le problème \mathcal{P}_1 :

$$\frac{\partial \rho_a^0}{\partial t} + \operatorname{div}_y(\rho_a^1 v_a^0 + \rho_a^0 v_a^1) + \operatorname{div}_x(\rho_a^0 v_a^0) = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 94}$$

$$v_a^1 n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 95}$$

L'équation macroscopique est obtenue en moyennant l'équation IV. 94 dans l'air sec dans la phase gazeuse :

$$\left\langle \frac{\partial \rho_a^0}{\partial t} \right\rangle_g + \left\langle \operatorname{div}_y(\rho_a^1 v_a^0 + \rho_a^0 v_a^1) \right\rangle_g + \left\langle \operatorname{div}_x(\rho_a^0 v_a^0) \right\rangle_g = 0 \quad \text{dans } \Omega_g \quad \text{IV. 96}$$

Et en utilisant le théorème de la divergence, le deuxième terme de cette dernière équation devient :

$$\langle \text{div}_y(\rho_a^1 v_a^0 + \rho_a^0 v_a^1) \rangle_g = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_a^1 v_a^0 + \rho_a^0 v_a^1) n_{lg} d\Gamma \quad \text{IV. 97}$$

Par ailleurs, l'annulation du facteur ε^1 dans l'équation IV. 42 permet d'obtenir :

$$\left\langle \frac{\partial \rho_a^0}{\partial t} \right\rangle_g = \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho_a^0 \rangle_g - \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_a^0 \omega_{lg}^1 + \rho_a^1 \omega_{lg}^0) n_{lg} d\Gamma \quad \text{IV. 98}$$

On aura alors :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \rho_a^0 \rangle_g}{\partial t} + \text{div}_x(\langle \rho_a^0 v_a^0 \rangle_g) - \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_a^0 \omega_{lg}^1 + \rho_a^1 \omega_{lg}^0) n_{lg} d\Gamma \\ + \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_a^1 v_a^0 + \rho_a^0 v_a^1) n_{lg} d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad \text{IV. 99}$$

$$\frac{\partial \langle \rho_a^0 \rangle_g}{\partial t} + \text{div}_x(\langle \rho_a^0 v_a^0 \rangle_g) + \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_a^0 (v_a^1 - \omega_{lg}^1) + \rho_a^1 (v_a^0 - \omega_{lg}^0)) n_{lg} d\Gamma = 0 \quad \text{IV. 100}$$

L'annulation du facteur ε^1 dans l'équation IV. 32 donne :

$$(\rho_a^0 (v_a^1 - \omega_{lg}^1) + \rho_a^1 (v_a^0 - \omega_{lg}^0)) n_{lg} = 0 \quad \text{IV. 101}$$

En intégrant l'équation sur Γ_{gl} et en divisant par $|\Omega|$:

$$\frac{1}{|\Omega|} \int_{\Gamma_{lg}} (\rho_a^0 (v_a^1 - \omega_{lg}^1) + \rho_a^1 (v_a^0 - \omega_{lg}^0)) n_{lg} d\Gamma = 0 \quad \text{IV. 102}$$

$$m_a = 0 \quad \text{IV. 103}$$

Le flux d'air sec n'intervient pas dans le changement de phase liquide-vapeur. Ainsi l'équation macroscopique du transfert d'air sec en phase gazeuse est obtenue par :

$$\frac{\partial \langle \rho_a^0 \rangle_g}{\partial t} + \text{div}_x(\langle \rho_a^0 v_a^0 \rangle_g) = 0 \quad \text{IV. 104}$$

La phase gazeuse est un mélange d'air sec et de vapeur. En sommant l'équation de transfert de l'air sec (équation IV. 104) et l'équation de transfert de vapeur d'eau (équation IV. 86) on obtient la description macroscopique suivante :

$$\frac{\partial \langle \rho_a^0 \rangle_g}{\partial t} + \text{div}_x(\langle \rho_a^0 v_a^0 \rangle_g) - \text{div}_x \left(D_v^{hom} \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial \theta_l} \right) \nabla \theta_l + D_v^{hom} \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right) \nabla T + D_v^{hom} \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial P} \right) \nabla P \right) - m_g = 0 \quad \text{IV. 105}$$

En ce qui concerne le terme de la vitesse de l'air sec, la formule d'Auriault et al. [191] et Mchirgui [90], est utilisée cette fois à l'échelle macroscopique comme suit :

$$\langle v_a \rangle = -\Lambda_{aa} \nabla P_a \quad \text{IV. 106}$$

Avec :

$$\Lambda_{aa} = \frac{K_{ra} K_a}{\mu_a} \quad \text{IV. 107}$$

K_{ra} est la perméabilité relative de l'air sec, et K_a est la perméabilité intrinsèque du matériau et μ_a est la viscosité de l'air sec.

De plus, la pression totale du gaz est la somme des pressions partielles de l'air et de la vapeur, donc :

$$P_a = P - P_v \quad \text{Or:} \quad P_a = P - \varphi P_{vs} \quad \text{IV. 108}$$

Avec φ : l'humidité relative et P_{vs} : la pression de vapeur saturante.

D'après Crausse et al. [192] l'expression (106) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\langle v_a \rangle = -\Lambda_{aa} \nabla P + \Lambda_{aa} \left(P_{vs} \frac{\partial \varphi}{\partial T} + \varphi \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \right) \nabla T + \Lambda_{aa} P_{vs} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_l} \nabla \theta_l \quad \text{IV. 109}$$

Donc l'équation de transfert dans la phase gazeuse devient :

$$\theta_g \frac{\partial \langle \rho_a^0 \rangle_g}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} - \text{div}_x (K_{P,P} \nabla P + K_{\theta,P} \nabla \theta_l + K_{T,P} \nabla T) - m_g = 0 \quad \text{IV. 110}$$

On aura ainsi :

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} - \text{div}_x (K_{P,P} \nabla P + K_{\theta,P} \nabla \theta_l + K_{T,P} \nabla T) - m_g = 0 \quad \text{IV. 111}$$

Avec :

$$h_a = \theta_g \frac{\partial \langle \rho_a^0 \rangle^g}{\partial P} \quad \text{IV. 112}$$

$$K_{P,P} = D_v^{hom} \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial P} \right) + \langle \rho_a^0 \rangle_g \Lambda_{aa} \quad \text{IV. 113}$$

$$K_{\theta,P} = D_v^{hom} \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial \theta_l} \right) - \langle \rho_a^0 \rangle_g \Lambda_{aa} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_l} \quad \text{IV. 114}$$

$$K_{\theta,T} = D_v^{hom} \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right) - \langle \rho_a^0 \rangle_g \Lambda_{aa} \left(P_{vs} \frac{\partial \varphi}{\partial T} + \varphi \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \right) \quad \text{IV. 115}$$

h_a : représente la capacité de l'air humide. $K_{P,P}$: coefficient de perméabilité de l'air humide.
 m_g : représente le taux massique d'évaporation donné par l'équation IV. 84 .

Notons, que ce terme de changement de phase est en fonction de la vitesse de l'interface liquide gaz ω_{lg} . Si cette vitesse diminue, l'interface liquide gaz disponible pour le changement de phase diminue aussi

IV.4.3. Transfert de chaleur

En annulant le facteur de ε^0 dans les équations IV. 33 - IV. 41 on obtient le problème \mathcal{P}_0 :

$$-\text{div}_y \left(\lambda_\alpha \frac{\partial T_\alpha^0}{\partial y} \right) = 0 \quad \text{dans } \Omega_\alpha \quad \text{IV. 116}$$

$$T_g^0 = T_l^0 \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 117}$$

$$\lambda_l \frac{\partial T_l^0}{\partial y} n_{gl} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 118}$$

$$T_g^0 = T_s^0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 119}$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s^0}{\partial y} n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 120}$$

$$T_l^0 = T_s^0 \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 121}$$

$$\lambda_l \frac{\partial T_l^0}{\partial y} n_{ls} = \lambda_s \frac{\partial T_s^0}{\partial y} n_{ls} \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 122}$$

Les inconnues T_g^0 , T_l^0 et T_s^0 sont indépendantes de y recherchées sous la forme :

$$T_g^0(x, y) = T_l^0(x, y) = T_s^0(x, y) = T^0(x) \quad \text{IV. 123}$$

En annulant le facteur de ε^1 dans les équations IV. 33 – IV. 41 on obtient le problème \mathcal{P}_1

$$-div_y \left(\lambda_\alpha \left(\frac{\partial T_\alpha^1}{\partial y} + \frac{\partial T^0}{\partial x} \right) \right) = 0 \quad \text{dans } \Omega_\alpha \quad \text{IV. 124}$$

$$T_g^1 = T_l^1 \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 125}$$

$$\lambda_l \left(\frac{\partial T_l^1}{\partial y} + \frac{\partial T^0}{\partial x} \right) n_{gl} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 126}$$

$$T_g^1 = T_s^1 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 127}$$

$$\lambda_s \left(\frac{\partial T_s^1}{\partial y} + \frac{\partial T^0}{\partial x} \right) n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 128}$$

$$T_l^1 = T_s^1 \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 129}$$

$$\lambda_l \left(\frac{\partial T_l^1}{\partial y} + \frac{\partial T^0}{\partial x} \right) n_{ls} = \lambda_s \left(\frac{\partial T_s^1}{\partial y} + \frac{\partial T^0}{\partial x} \right) n_{ls} \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 130}$$

Il s'agit d'un problème de conduction en régime permanent, mais avec la présence du terme source $\frac{\partial T^0}{\partial x}$. La solution de ce problème s'écrit sous la forme :

$$T_\alpha^1(x, y) = \chi_\alpha(y) \frac{\partial T^0}{\partial x} + \bar{T}^1(x) \quad \text{IV. 131}$$

$\bar{T}^1(x)$: est une fonction arbitraire indépendante de y . En remplaçant l'expression (131) dans les équations IV. 124 – IV. 130 on obtient le problème local caractérisant $\chi_\alpha(y)$:

$$-div_y \left(\lambda_\alpha \left(\frac{\partial \chi_\alpha}{\partial y} + I \right) \right) = 0 \quad \text{dans } \Omega_\alpha \quad \text{IV. 132}$$

$$\lambda_l \left(\frac{\partial \chi_l}{\partial y} + I \right) n_{gl} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gl} \quad \text{IV. 133}$$

$$\lambda_s \left(\frac{\partial \chi_s}{\partial y} + I \right) n_{gs} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gs} \quad \text{IV. 134}$$

$$\lambda_l \left(\frac{\partial \chi_l}{\partial y} + I \right) n_{ls} = \lambda_s \left(\frac{\partial \chi_s}{\partial y} + I \right) n_{ls} \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 134}$$

$$\chi_g = \chi_l = \chi_s \quad \text{IV. 135}$$

$$\langle \chi_\alpha \rangle = 0 \quad \text{IV. 136}$$

Après l'intégration de l'équation IV. 124 relative à la phase gazeuse dans Ω_g , on obtient :

$$\frac{\partial T_g^1}{\partial y} + \frac{\partial T^0}{\partial x} = 0 \quad \text{IV. 137}$$

En suivant les mêmes étapes présentées précédemment dans le cas de transfert d'humidité en phase vapeur en annulant le facteur de ε^2 dans les équations IV. 33 – IV. 41, puis en appliquant le théorème de divergence, tout en tenant compte de l'équation IV. 137. De plus, Par hypothèse que la masse de la phase gazeuse est négligeable, ($\rho_g \simeq 0$), l'équation homogénéisée des transferts de chaleurs dans les milieux poreux est donnée par :

$$\begin{aligned} (n_s C_s + n_l C_l) \frac{\partial T^0}{\partial t} - \text{div}_x (\lambda_s^{hom} \nabla T) - \text{div}_x (\lambda_l^{hom} \nabla T) \\ + \text{div}_x \rho_l h_l \Lambda_{ll}^{hom} \left(\left(\frac{\partial P_c}{\partial T} \right) \nabla T + \left(\frac{\partial P_c}{\partial \theta_l} \right) \nabla \theta_l - \nabla P \right) - h_{lv} m_g = 0 \quad \text{IV. 138} \end{aligned}$$

Où h_l : est l'enthalpie massique de l'eau liquide. $h_{lv} m_g$: Taux de changement de phase macroscopique, h_{lv} : La chaleur latente de changement de phase, et enfin n_s et n_l représentent les fractions volumiques de la phase solide et la phase liquide respectivement.

Alors on aura :

$$C^{hom} \frac{\partial T^0}{\partial t} - \text{div}_x (a_t \nabla T + \delta_t \nabla \theta_l + \alpha_t \nabla P) - h_{lv} m_g = 0 \quad \text{IV. 139}$$

Avec :

$$C^{hom} = (n_s C_s + n_l C_l) = (n_s \rho_s c_s + n_l \rho_l c_l) \quad \text{IV. 140}$$

$$a_t = \lambda^{hom} - h_l \rho_l \Lambda_{ll}^{hom} \left(\frac{\partial P_c}{\partial T} \right) \quad \text{IV. 141}$$

$$\delta_t = -h_l \rho_l \Lambda_{ll}^{hom} \left(\frac{\partial P_c}{\partial \theta_l} \right) \quad \text{IV. 142}$$

$$\alpha_t = h_l \rho_l \Lambda_{ll}^{hom} \quad \text{IV. 143}$$

C^{hom} : est la capacité calorifique macroscopique, a_t : Conductivité thermique corrigée, δ_t : Coefficient de transfert thermique macroscopique dû au gradient d'humidité, δ_t : Coefficient de transfert thermique macroscopique dû au gradient de pression total. Le transfert de chaleur par convection dépend de nombreux paramètres tels que les caractéristiques du fluide, ce qui explique la dépendance des paramètres macroscopiques obtenus d'un tenseur liquide.

$$\Lambda_{ll}^{hom} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_l} \Lambda_{ll} \left(\frac{\partial \chi_l}{\partial y} + I \right) d\Omega \quad \text{IV. 144}$$

$$\lambda^{hom} = \lambda_s^{hom} + \lambda_l^{hom} = \frac{1}{|\Omega|} \left(\int_{\Omega_s} \lambda_s \left(\frac{\partial \chi_s}{\partial y} + I \right) d\Omega + \int_{\Omega_l} \lambda_l \left(\frac{\partial \chi_l}{\partial y} + I \right) d\Omega \right) \quad \text{IV. 145}$$

Dans ce cas également, le tenseur de conductivité thermique homogénéisé dépend fortement de la structure poreuse à travers les variables locales χ_s et χ_l , déterminées en résolvant le problème local aux limites dans le milieu poreux. Où : χ_s est périodique, de moyenne nulle sur Ω_s ; Et χ_l est périodique, de moyenne nulle sur Ω_l . Les solutions sont obtenues en résolvant sur le VER le problème aux limites suivant :

$$\begin{aligned} \operatorname{div}_y \left(\lambda_s \left(\frac{\partial \chi_s}{\partial y} + I \right) \right) &= 0 && \text{dans } \Omega_s \\ \operatorname{div}_y \left(\lambda_l \left(\frac{\partial \chi_l}{\partial y} + I \right) \right) &= 0 && \text{dans } \Omega_l \\ \lambda_s \left(\frac{\partial \chi_s}{\partial y} + I \right) \cdot n_{gs} &= 0 && \text{sur } \Gamma_{gs} \end{aligned} \quad \text{IV. 146}$$

$$\lambda_l \left(\frac{\partial \chi_l}{\partial y} + I \right) \cdot n_{gl} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_{gl}$$

$$\lambda_l \left(\frac{\partial \chi_l}{\partial y} + I \right) \cdot n_{ls} = \lambda_s \left(\frac{\partial \chi_s}{\partial y} + I \right) \cdot n_{ls} \quad \text{sur } \Gamma_{ls}$$

$$\chi_l = \chi_s$$

$$\langle \chi_s \rangle = 0, \quad \langle \chi_l \rangle = 0$$

Les équations du bilan massique et d'équilibre thermique ont été homogénéisées. Des descriptions macroscopiques des différents phénomènes ont été obtenues. Le modèle mathématique homogénéisé pour les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de construction peut être s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} - \text{div}_x (D_\theta \text{grad}_x \theta_l + D_T \text{grad}_x T - D_P \text{grad}_x P) = 0$$

$$C^{hom} \frac{\partial T^0}{\partial t} - \text{div}_x (a_t \text{grad}_x T + \delta_t \text{grad}_x \theta_l + \alpha_t \text{grad}_x P) - h_{lv} m_g = 0 \quad \text{IV. 147}$$

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

La pertinence de ce modèle HAM à trois équations réside dans le fait qu'il nous permet de garder le couplage entre les différentes équations homogénéisées des transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de constructions. En considérant trois moteurs de transferts : température, teneur en eau et gradient de pression totale. Les principaux paramètres physiques sont non-linéaires et dépendent de la teneur en eau et de la température.

IV.5. Application numérique

Dans cette partie du chapitre, nous nous concentrons sur les principaux paramètres d'entrée du modèle HAM développé. Concernant ce modèle, les coefficients macroscopiques de diffusion, d'infiltration et de conductivité thermique obtenus dépendent de la géométrie de la microstructure du milieu poreux considéré par l'intermédiaire des tenseurs de diffusion (D_v^{hom}) et de conductivité thermique homogénéisés (λ^{hom}) calculés précédemment. Nous calculons les deux coefficients obtenus par la méthode d'homogénéisation périodique : le coefficient de diffusion homogénéisé et le coefficient de conductivité thermiques homogénéisé. Ces paramètres ont été choisis en raison de leur grande influence sur le transfert de HAM.

IV.5.1. Résolution numérique pour une cellule élémentaire de géométrie tridimensionnelle

Considérons un matériau poreux dont la microstructure est constituée d'une répétition périodique d'une cellule unitaire tridimensionnelle, représentant un béton.

La cellule étudiée est composée de deux sphères de rayon $r_{c1} = 0.3858$ et $r_{c2} = 0.4045$, situées au centre de la cellule élémentaire, de huitièmes de sphères de rayon $r_s = 0.36$, situées aux sommets (angles de la cellule), et de quarts de sphères de même rayon r_s situé aux milieux des arêtes de chaque côté de la cellule (figure IV. 3). Ces dimensions sont choisies pour obtenir une faible porosité correspondant à la porosité des matériaux cimentaires, tels que le béton.

Le domaine en couleur verte représente la phase liquide. Cette couche d'eau adsorbée sur la phase solide est d'épaisseur très faible $e_l = 0.0187$, ce qui nous donne une teneur en eau de 3.0%, qui correspond à une humidité relative constante dans la région hygroscopique.

En résolvant les problèmes aux limites (63) et (84), les tenseurs de diffusion et de conductivité thermique homogénéisés ont été calculés dans le but de déterminer les variables χ , χ_s et χ_l . Ces problèmes aux limites sont résolus par la méthode des éléments finis en utilisant COMSOL Multiphysics.

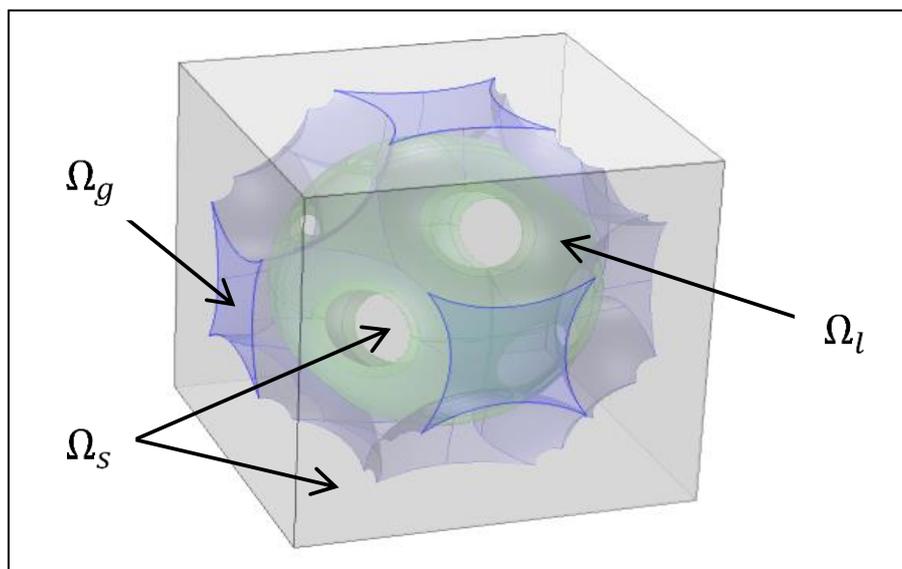


Figure IV. 3 : Cellule élémentaire du milieu périodique

IV.5.2. Tenseur de conductivité thermique homogénéisé

Le problème aux limites à résoudre dans ce cas est le suivant :

$$\Delta_y \chi_{s_i} = 0 \quad (i = 1,2,3) \quad \text{dans } \Omega_s$$

$$\frac{\partial \chi_{s_i}}{\partial y} \cdot n = n_i \quad \text{sur } \Gamma_{sg}$$

$$\frac{\partial \chi_{s_i}}{\partial y} \cdot n = \frac{\lambda_l}{\lambda_s} \left(\frac{\partial \chi_{l_i}}{\partial y} \right) n_i - \left(1 - \frac{\lambda_l}{\lambda_s} \right) n_i \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 148}$$

$$\chi_{s_i} = \chi_{l_i} \quad \text{sur } \Gamma_{ls}$$

$$\langle \chi_{s_i} \rangle_{\Omega_s} = 0$$

$$\Delta_y \chi_{l_i} = 0 \quad (i = 1,2,3) \quad \text{dans } \Omega_l$$

$$\frac{\partial \chi_{l_i}}{\partial y} \cdot n = n_i \quad \text{sur } \Gamma_{lg}$$

$$\frac{\partial \chi_{l_i}}{\partial y} \cdot n = \frac{\lambda_s}{\lambda_l} \left(\frac{\partial \chi_{s_i}}{\partial y} \right) n_i - \left(1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_l} \right) n_i \quad \text{sur } \Gamma_{ls} \quad \text{IV. 149}$$

$$\chi_{l_i} = \chi_{s_i} \quad \text{sur } \Gamma_{ls}$$

$$\langle \chi_{l_i} \rangle_{\Omega_l} = 0$$

Rappelons que sur les interfaces solide-solide et liquide-liquide, on applique les conditions de périodicité pour chaque composante de χ_s et χ_l .

Les premières composantes des solutions χ_s et χ_l de chaque vecteur sont illustrées sur la figure IV .4 suivante :

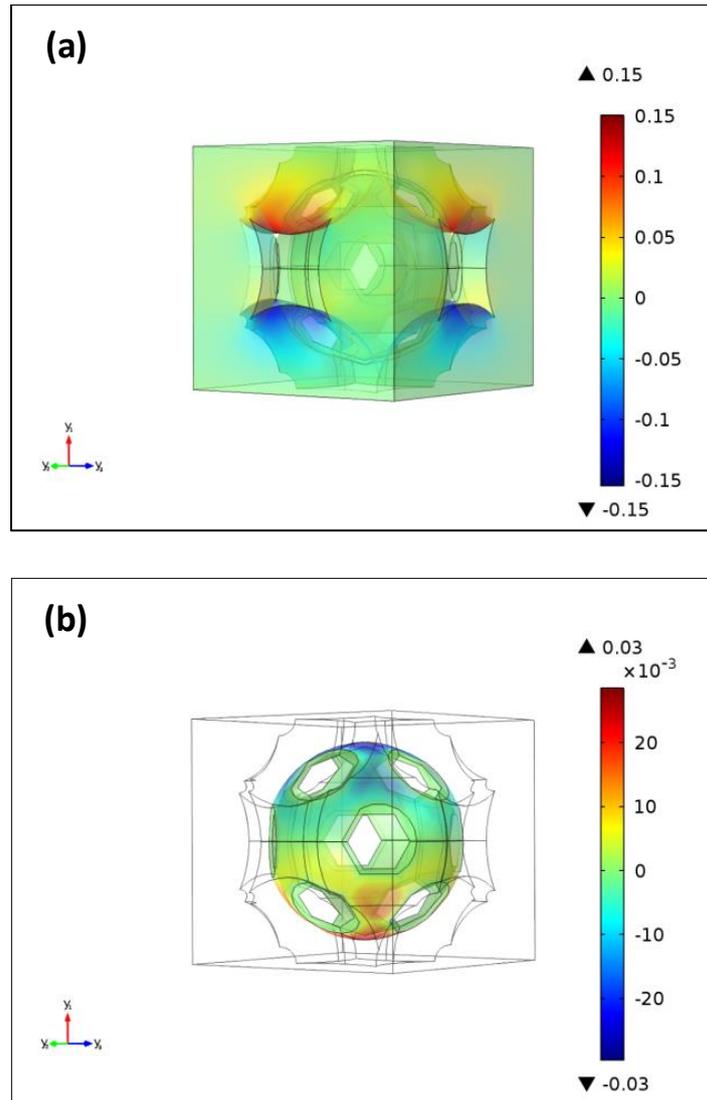


Figure IV. 4 : Distribution des fonctions χ_{s1} et χ_{l1} dans la période, (a) χ_{s1} , et (b) χ_{l1}

Après la résolution numérique, le tenseur de conductivité homogénéisé obtenu est le suivant :

$$\lambda^{hom} = \lambda_s \begin{bmatrix} 0.78217 & 0 & 0 \\ 0 & 0.78217 & 0 \\ 0 & 0 & 0.78217 \end{bmatrix} + \lambda_l \begin{bmatrix} 0.02188 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02188 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02188 \end{bmatrix}$$

IV.5.2.1. Détermination de la conductivité thermique de la matrice solide

La conductivité thermique d'un milieu poreux dépend de la conductivité thermique de ces constituant. L'objectif de cette partie du chapitre est de calculer cette conductivité thermique de la matrice solide du béton à travers les résultats des simulations numériques sur la cellule élémentaire représentative.

La conductivité thermique du béton est obtenue à partir des travaux de la littérature. La valeur de la conductivité thermique du béton à 20% de saturation qui correspond dans notre cas à une

teneur en eau volumétrique de 3%, est : $\lambda^{exp} = 1.51 \text{ W/m.K}$, et la conductivité thermique de la phase liquide est : $\lambda_l = 0.6051 \text{ W/m.K}$

A partir du tenseur de conductivité thermique homogénéisé issu des simulations numériques, la conductivité thermique de la phase solide calculé est :

$$\lambda_s = 1.9135 \text{ W/m.K}$$

A l'échelle microscopique, la phase solide est plus conductrice de chaleur que les phases fluides, donc la conductivité thermique globale du matériau est nettement plus inférieure à celle de la matrice solide.

IV.5.3. Tenseur de diffusion homogénéisé

Le vecteur χ contient trois composantes (χ_1, χ_2 et χ_3), alors le problème aux limites à résoudre dans ce cas est le suivant :

$$\begin{aligned} \Delta_y \chi_i &= 0 \quad (i = 1,2,3) && \text{in } \Omega_g \\ \frac{\partial \chi_i}{\partial y} \cdot n &= n_i && \text{on } \Gamma_{gs} \\ \frac{\partial \chi_i}{\partial y} \cdot n &= n_i && \text{on } \Gamma_{gl} \\ \langle \chi_i \rangle_{\Omega_g} &= 0 \end{aligned} \quad \text{IV. 150}$$

Sur les interfaces gaz-gaz, on applique les conditions de périodicité. Ainsi, les résultats numériques sont donnés donc par :

$$D_v^{hom} = D_v \begin{bmatrix} 0.04127 & 0 & 0 \\ 0 & 0.04127 & 0 \\ 0 & 0 & 0.04127 \end{bmatrix}$$

Dans ce cas également, la première composante du vecteur χ est représentée sur la figure IV. 5 ci-dessous :

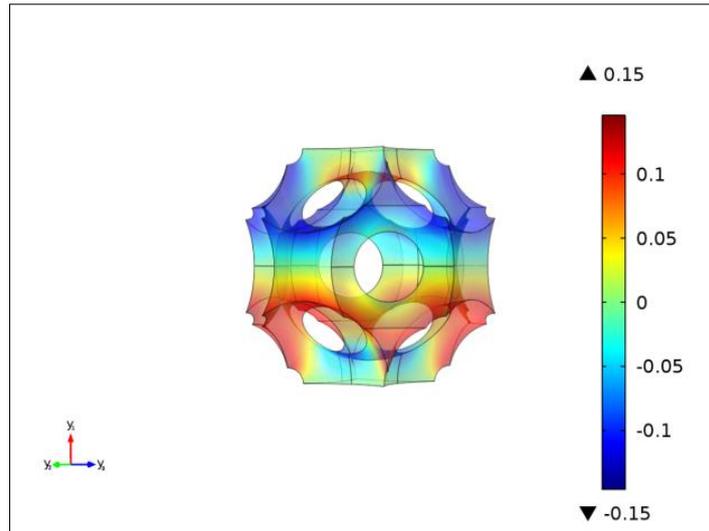


Figure IV. 5 : Distribution de la fonction χ_1 dans la période

Cette cellule élémentaire considérée est une représentation approximative du matériau réel (béton), elle permet également d'obtenir une faible porosité correspondant à ces milieux poreux. Il est clair que les tenseurs de diffusion et de conductivité thermique homogénéisés sont caractérisés par la même valeur dans les trois directions principales, et ceci est dû à l'isotropie et à la symétrie du matériau considéré. Les plans de symétrie de cette microstructure impliquent que les premières composantes des solutions des problèmes aux limites sont symétriques par rapport à l'axe y_1 Et antisymétriques par rapport aux axes y_2 et y_3 .

IV.5.3.1. Comparaison avec des résultats expérimentaux

Le tenseur de diffusion homogénéisé est calculé sur une cellule tridimensionnelle à une teneur en eau volumétrique de 3%. Considérant l'équilibre thermodynamique de l'eau et de sa vapeur dans les milieux poreux insaturés, le coefficient de diffusion d'humidité macroscopique est la somme des coefficients de diffusion macroscopiques à la fois dans la phase liquide ($D_{\theta,l}$) et dans la phase gazeuse ($D_{\theta,v}$), Précédemment déterminé dans la section IV.4.1 :

$$D_{\theta} = \frac{1}{\rho_l} D_v^{hom} \frac{\partial \rho_v}{\partial \theta_l} - \frac{K_{rl} K_l}{\mu_l} \frac{\partial P_c}{\partial \theta_l} \quad \text{IV. 151}$$

Où :

μ_l : Désigne la viscosité du liquide ($\mu_l = 1.002 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m.s}$), θ_l [%]: teneur en eau volumique, P_c [Pa]: la pression capillaire, ρ_l [Kg/m^3]: la densité de l'eau, ρ_v [Kg/m^3]: densité de la vapeur d'eau, K_l [m^2]: Perméabilité intrinsèque du liquide, et enfin K_{rl} [m^2]: Perméabilité relative du liquide.

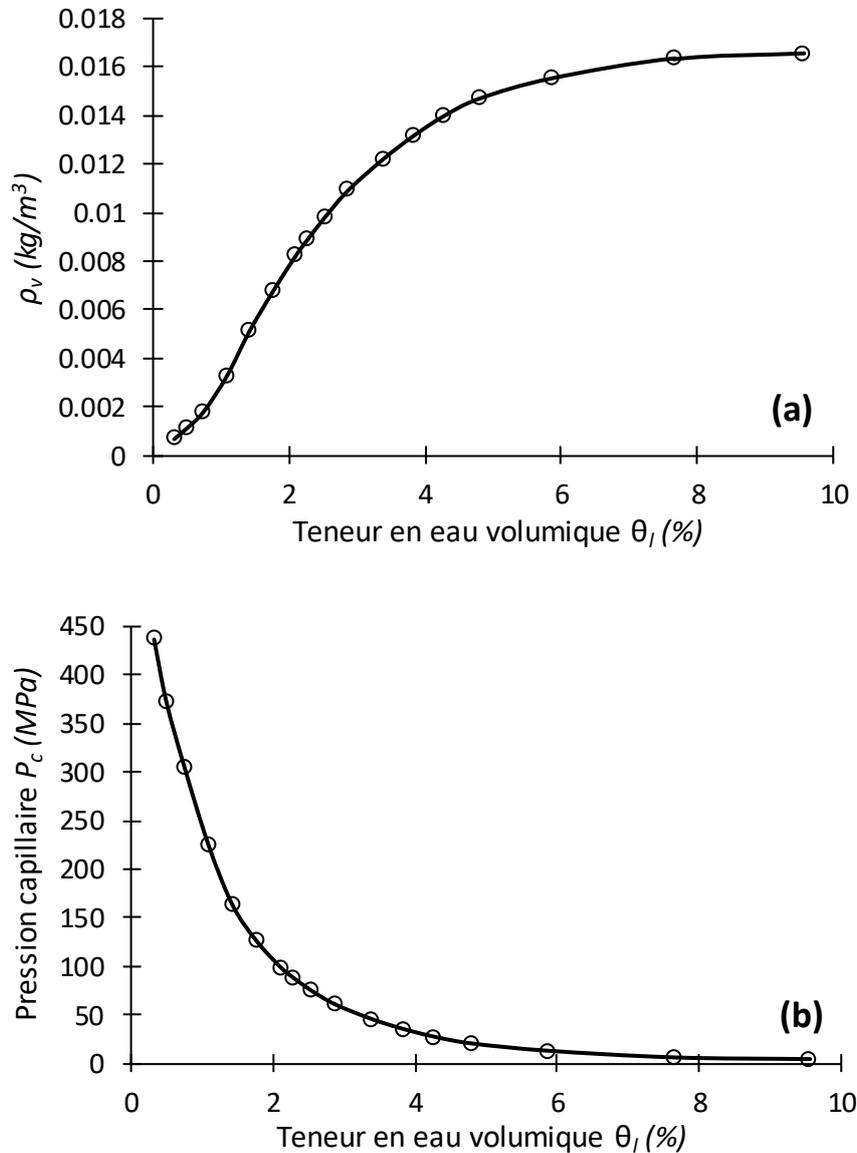


Figure IV. 6 : Courbes expérimentales du béton : (a) isotherme de sorption, (b) courbe de rétention

Dans un premier temps, le coefficient de diffusion d'humidité macroscopique D_θ a été calculé analytiquement, par la suite les valeurs obtenues ont été comparées aux valeurs expérimentales de Trabelsi [149] réalisées sur le béton. En outre les deux rapports $\frac{\partial \rho_v}{\partial \theta_l}$ et $\frac{\partial P_c}{\partial \theta_l}$ de la formation de D_θ (équation IV. 151) ont été évalués en utilisant l'isotherme de sorption du béton, déterminé expérimentalement au laboratoire LaSIE.

La figure IV. 6 (a) montre l'évolution de la densité de vapeur d'eau ρ_v en fonction de la teneur en eau volumique θ_l , ce qui nous permet d'estimer le rapport $\frac{\partial \rho_v}{\partial \theta_l}$, et la figure III. 6 (b) présente l'évolution de la pression capillaire P_c fonction de la teneur en eau volumique θ_l .

L'expression de D_θ fait intervenir les perméabilités intrinsèque et relative du matériau, donc il est nécessaire de connaître ces deux paramètres pour pouvoir calculer le coefficient de diffusion macroscopique (équation IV. 151). La valeur considérée de la perméabilité intrinsèque liquide K_l est obtenue à partir des travaux de la littérature et elle est de l'ordre de : $4.95 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ [193]. En ce qui concerne la perméabilité relative, elle dépend du degré de saturation en eau du matériau. Cette propriété est généralement décrite par l'expression suivante [194] :

$$K_{rl} = \sqrt{\frac{\theta_l}{\varepsilon_p}} \left(1 - \left(1 - \left(\frac{\theta_l}{\varepsilon_p} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \quad \text{IV. 152}$$

Il y a lieu de mentionner que dans notre cas, la porosité de la cellule élémentaire considérée est $\varepsilon_p = 14.42\%$, et la teneur en eau volumétrique est $\theta_l = 3\%$. Pour le béton, la valeur du coefficient m considérée est de 0.439.

Tableau IV. 1 : Comparaison entre la valeur calculée et la valeur expérimentale du coefficient de diffusion

$D_v \text{ (m}^2/\text{s)}$	$K_{rl} \text{ (m}^2)$	$D_\theta \text{ (m}^2/\text{s)}$	$D_\theta^{exp} \text{ (m}^2/\text{s)}$	$\frac{D_\theta}{D_\theta^{exp}}$
$2.56 \cdot 10^{-5}$	$6.86 \cdot 10^{-5}$	$2.507 \cdot 10^{-10}$	$1.01 \cdot 10^{-10}$	2.47

La comparaison entre la valeur calculée et expérimentale du coefficient de diffusion est présentée dans le tableau IV. 1. On note que la valeur calculée du coefficient de diffusion d'humidité macroscopique est légèrement supérieure à la valeur mesurée expérimentalement, et le rapport maximal entre les valeurs calculées et expérimentales est de 2,47. La cellule élémentaire considérée est une représentation approximative du matériau réel (béton), et certains phénomènes physiques intervenant à l'échelle microscopique dans les matériaux cimentaires ont été négligés, tels que les bulles d'air non connectées qui constituent une partie de la porosité du béton. Ceci explique les différences entre les valeurs numériques et expérimentales.

En outre, les phénomènes de transfert dans les milieux poreux sont également influencés par la taille des pores et leur connexion, qui peut être décrite par la théorie de la percolation. D'autre part, la détermination expérimentale du coefficient de diffusion de vapeur d'eau D_{θ}^{exp} peut également être discutée, ce sont des valeurs globales. Avec la même méthode d'homogénéisation périodique, des différences assez importantes ont également été trouvées entre les valeurs théoriques et expérimentales dans les travaux de Bourbatache et al. [97] pour des transferts ioniques dans les matériaux cimentaires.

IV.5.4. Sensibilité des tenseurs de conductivité thermique et de diffusion homogénéisés

Généralement la teneur en eau et la porosité affectent l'ensemble des paramètres des transferts hygrothermiques [149]. Parmi ces paramètres, on peut citer la conductivité thermique et le coefficient de diffusion. Ces deux paramètres nous renseignent directement sur la cinétique des transferts de chaleur et d'humidité au sein du milieu poreux, ils jouent donc un rôle majeur dans la prédiction des échanges hygrothermiques.

Cette étude de sensibilité permet de montrer l'impact de la variation de la teneur en eau et de la porosité sur les tenseurs de conductivité thermique et de diffusion homogénéisés calculés dans la partie précédente (section IV.4.1).

Dans cette partie, les tenseurs de conductivité thermique et de diffusion homogénéisés ont été calculés numériquement en faisant varier d'abord la teneur en eau de l'état sec à 4,0% de teneur en eau volumique, puis la porosité de 11% à 16%.

IV.5.4.1. Sensibilité du tenseur de conductivité thermique homogénéisé

La table IV. 2 représente les valeurs du tenseur de conductivité thermique homogénéisé déduit des simulations numériques en fonction de l'état hydrique et de la porosité de la cellule élémentaire représentative considérée.

Tableau IV. 2 : Evolution du tenseur de conductivité thermique homogénéisé en fonction de la teneur en eau, et de la porosité

θ_l (%)	$\lambda_{11}^{hom} = f(\theta_l)$ (W/m K)	ε_p (%)	$\lambda_{11}^{hom} = f(\varepsilon_p)$ (W/m K)
0.0	1.3954	11.05	1.6325
0.5	1.4250	12.03	1.5978
1.0	1.4451	13.08	1.5567
1.5	1.4661	13.56	1.5374
2.0	1.4818	14.09	1.5214
2.5	1.4946	14.42	1.5099
3.0	1.5099	15.022	1.4845
3.5	1.5266	15.51	1.4651
4.0	1.5370	16.014	1.4464

Il est montré que lorsque le matériau est exposé à une humidité relative élevée, la teneur en eau augmente et l'eau remplace l'air, ce qui augmente la conductivité thermique du milieu. En ce qui concerne la porosité, elle affecte significativement la conductivité thermique du milieu, en effet, avec l'augmentation du volume des vides, la conductivité thermique diminue. Il y a lieu de noter que ces deux paramètres (humidité et porosité) sont des paramètres clés dans le calcul du tenseur de conductivité thermique homogénéisé.

IV.5.4.2. Sensibilité du tenseur de diffusion homogénéisé

Le tableau IV. 3 présente les valeurs du coefficient de diffusion homogénéisé calculé à partir des simulations numériques en fonction de la teneur en eau, et de la porosité de la cellule élémentaire représentative.

Tableau IV. 3 : Variation du coefficient de diffusion homogénéisé en fonction de la teneur en eau, et de la porosité

θ_l (%)	$\frac{D_{11}^{hom}}{D_v} = f(\theta_l)$	ε_p (%)	$\frac{D_{11}^{hom}}{D_v} = f(\varepsilon_p)$
0.0	0.05967	11.05	0.02437
0.5	0.05652	12.03	0.02890
1.0	0.05385	13.08	0.03397
1.5	0.05019	13.56	0.03616
2.0	0.04738	14.09	0.03917
2.5	0.04501	14.42	0.04127
3.0	0.04127	15.022	0.04546
3.5	0.03834	15.51	0.04843
4.0	0.03559	16.014	0.05112

Ce tableau montre que le coefficient de diffusion homogénéisé est sensible aux variations de la teneur en eau et de la porosité de la cellule élémentaire représentative. En effet, lorsque l'humidité relative augmente, la teneur en eau augmente. La phase gazeuse occupe un volume moins important et la valeur du coefficient de diffusion homogénéisé diminue progressivement. De même pour la porosité, le coefficient de diffusion homogénéisé augmente avec l'augmentation des proportions de la phase gazeuse dans la cellule considérée. Cela permet d'avoir une surface spécifique plus importante pour la migration de l'eau à l'intérieur du matériau.

IV.6. Conclusion

La mise en œuvre de la technique d'homogénéisation multi-échelles nous a permis d'élaborer à partir des équations écrites à l'échelle des pores dans les différentes phases du milieu poreux un modèle macroscopique pertinent couplant les transferts de chaleur, d'air et d'humidité. En considérant trois moteurs de transfert : température, teneur en eau et gradient de pression totale.

La méthode d'homogénéisation périodique utilisée est basée sur l'analyse dimensionnelle des équations de conservation de masse et d'énergie à l'échelle microscopique.

Le développement asymptotique de ces équations microscopiques conduit à un modèle macroscopique fortement non-linéaire avec trois équations couplées. Les paramètres macroscopiques du modèle sont ainsi définis. La méthode d'homogénéisation périodique utilisée suppose que la microstructure du milieu poreux constituée d'une répétition périodique d'une certaine cellule élémentaire, appelée cellule de base.

Une cellule élémentaire représentative du milieu poreux a été choisie dans le but de déterminer numériquement les tenseurs de diffusion et de conductivité thermique homogénéisés constituant les principaux paramètres d'entrée du modèle développé. Les résultats ont montré que ces paramètres choisis dépendent fortement des propriétés géométriques de la cellule. La conductivité thermique de la matrice solide a été déterminée. De plus la valeur numérique du coefficient de diffusion est comparée à la valeur expérimentale existant dans la littérature, cette dernière est directement liée à la structure poreuse du milieu.

Enfin, une étude de sensibilité nous a permis de mettre en évidence l'influence de la teneur en eau et de la porosité du matériau sur l'évolution des tenseurs de conductivité thermique et de diffusion homogénéisés. Il a été montré que les deux tenseurs homogénéisés étudiés sont sensibles aux variations de ces deux derniers paramètres.

Conclusions générales et perspectives

Les travaux menés au sein de cette thèse ont permis de décrire et d'analyser le comportement hygrothermique multi-échelle du béton de chanvre utilisé comme élément de remplissage dans la construction des bâtiments, et d'étendre l'étude pour tenir compte des hétérogénéités des matériaux de construction et de la complexité de leurs microstructures, en utilisant une approche de changement d'échelle.

Dans un premier temps, nous avons présenté un état de l'art au sujet du réel enjeu du secteur du bâtiment pour préserver l'environnement dans les années futures. Les caractéristiques principales d'un matériau poreux, les mécanismes de fixation d'humidité, la notion d'isotherme de sorption et les différents modèles associés (Langmuir, BET, GAB, et GDW) sont ainsi définis. Nous avons mis l'accent sur les différents phénomènes qui interviennent lors du transfert d'humidité et les modèles de référence couplant les transferts de chaleur et d'humidité. L'étude a montré également des différents résultats des travaux de recherche au sujet de béton de chanvre, qui apparaît comme solution pertinente pour la réduction de la consommation énergétique, limiter l'impact du bâtiment sur l'environnement, et pour une meilleure ambiance habitable.

Dans un second temps, une campagne expérimentale de caractérisation des propriétés physiques et hygrothermiques du béton de chanvre a été effectuée. Ce matériau présente une porosité élevée. De plus, il a été montré que l'âge du matériau réduit les propriétés hydriques (isothermes de sorption et perméabilité à vapeur) et augmente les propriétés thermiques (conductivité thermique et surface spécifique), cette influence du vieillissement du matériau est principalement due à l'évolution de la microstructure avec l'hydratation du liant dans le temps. Nous avons ainsi souligné la qualité respirante (respectivement isolante) du béton de chanvre qui se justifie par la faible valeur de coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (respectivement de conductivité thermique). Cette campagne expérimentale du matériau étudié a pour objectif d'alimenter les modèles de transferts hygrothermiques avec des paramètres d'entrée fiables pour une meilleure prédiction du comportement des enveloppes. Toutefois, il est important de noter que les propriétés thermiques sont fortement dépendantes de l'état

hydrique du matériau, de plus la capacité de stockage d'humidité augmente de manière significative pour des humidités relatives élevées, d'où la nécessité de considérer leurs évolutions en fonction de l'humidité relative et de la température lors de la modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité.

Par la suite, les techniques d'imageries nous ont permis d'étudier le comportement hygro-morphique du béton de chanvre. Les scans du matériau au tomographe à rayons X à plusieurs résolutions montrent que le béton de chanvre possède plusieurs échelles de porosité, il s'agit de la porosité du liant et de la chènevotte, et de la macroporosité située entre les particules végétales et le liant (porosité inter particulaire). Cela, favorise la capacité du matériau à réguler l'hygrométrie. Les observations sous MEB de la chènevotte montrent la géométrie des pores assez différentes, et une très forte porosité. Cette dernière est organisée en capillaires parallèles au sens de croissance de la plante, ce qui explique ses fortes capacités d'absorption d'eau.

D'autre part, les résultats de corrélation d'images numériques 2D et de tomographie aux rayons X couplés à la corrélation d'images volumiques ont permis d'étudier le comportement du béton de chanvre soumis à des sollicitations hydriques. L'humidification du matériau provoque le gonflement des granulats végétaux et par conséquent le rétrécissement de la macroporosité située entre le liant et la chènevotte. Le liant est peu influencé par les sollicitations hydriques comparé à la chènevotte. De plus, le séchage hydrique affecte la morphologie interne du béton de chanvre. En effet, la chènevotte a tendance à subir un changement dimensionnel beaucoup plus important que le liant, la déformation des granulats végétaux dans ce cas est traduite par le rétrécissement.

Enfin, la dernière partie est consacrée à l'élaboration d'un modèle macroscopique des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de construction à partir des équations de conservation de masse et d'énergie écrites à l'échelle microscopique. La technique de changement d'échelle utilisée est la méthode d'homogénéisation périodique basée sur les développements asymptotiques à deux échelles. Le transfert d'infiltration d'air a été ajouté au modèle, et les expressions des tenseurs homogénéisés constituant les paramètres d'entrée du modèle ont été identifiées. Ensuite, une cellule élémentaire représentative du milieu poreux a été choisie dans le but de déterminer numériquement les tenseurs de diffusion et de conductivité thermique homogénéisés constituant les principaux paramètres d'entrée du modèle. Les résultats ont montré que ces paramètres choisis dépendent fortement de la géométrie de la cellule. En outre, la validation expérimentale du coefficient de diffusion

macroscopique a été réalisée par rapport à la littérature, et la conductivité thermique de la phase solide est ainsi déduite. Cette dernière est nettement plus importante que la conductivité thermique globale du matériau. La sensibilité des deux tenseurs homogénéisés aux variations de la teneur en eau et à la porosité a été effectuée sur la cellule élémentaire représentative. Les résultats révèlent que les coefficients de diffusion et de conductivité thermique homogénéisés varient en fonction de l'état hydrique, et dépendent également de la morphologie du matériau.

Les travaux effectués dans cette thèse ouvrent de nombreuses perspectives :

- Génération des maillages à partir des reconstruction 3D du matériau obtenues par la tomographie aux rayons X en utilisant les logiciels Avizo FEI et Simpleware Scan IP.
- Modélisation des transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans le béton de chanvre en travaillant sur les géométries réelles générées.
- Modélisation du comportement thermo-hygro mécanique du béton de chanvre en considérant les déformations mécaniques causées par les sollicitations hydriques.
- Calcul des paramètres d'entrée du modèle homogénéisé développé sur des géométries réelles de différents matériaux poreux de construction.
- Modélisation des transferts de chaleur, d'air et d'humidité en utilisant le modèle macroscopique homogénéisé, puis valider les résultats en les comparant aux résultats expérimentaux et d'autres résultats des modèles développés au laboratoire LaSIE.

Références bibliographiques

- [1] International Energy Agency, Key Word Energy Trends. Excerpt from: World energy balances, (2016).
- [2] GEIC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2014 Rapport de synthèse, (2015).
- [3] Nations Unies, Convention-cadre sur les changements climatique. Conférence des Parties Vingt et unième session Paris, (2015).
- [4] Ministère de l'énergie - Algérie, Bilan énergétique national de l'année 2013, (2014).
- [5] 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.
- [6] N. El Hajj, Contribution à la conception et à l'élaboration d'une âme multicouche multifonctionnelle agrosourcée pour panneau sandwich : étude expérimentale et modélisation., Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne et Université de Technologie de Compiègne, 2010.
- [7] A. Akkaoui, Bétons de granulats de bois : Étude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles., Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2014.
- [8] T.T. Nguyen, Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, Thèse de doctorat, Université de Bretagne sud, 2010.
- [9] 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. doi:10.1016/j.buildenv.2005.11.001.
- [10] M.J. González, J. García Navarro, Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact, Building and Environment. 41 (2006) 902–909. doi:10.1016/j.buildenv.2005.04.006.
- [11] J. Berger, Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : Application des méthodes de réduction de modèle, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2014.
- [12] CSTB, Impact de l'humidité dans le bâtiment : diagnostics et retours d'expériences. Partie I -Bâtiments : typologies et pathologies, (2016).
- [13] R. Collombet, L'humidité des bâtiments anciens : causes et effets ; diagnostic et remèdes, Éd. du Moniteur, Paris, 1989.
- [14] T. Weiss, S. Siegesmund, D. Kirchner, J. Sippel, Insolation weathering and hygric dilatation : two competitive factors in stone degradation, Environmental Geology. 46 (2004). doi:10.1007/s00254-004-1041-0.
- [15] J. Coignet, Les maisons anciennes, Nouvelle Edition, Paris Eyrolles, France, n.d.

- [16] S.D. Platt, C.J. Martin, S.M. Hunt, C.W. Lewis, Damp housing, mould growth, and symptomatic health state., *BMJ.* 298 (1989) 1673–1678. doi:10.1136/bmj.298.6689.1673.
- [17] M.L. Burr, I.P. Matthews, R.A. Arthur, H.L. Watson, C.J. Gregory, F.D.J. Dunstan, S.R. Palmer, Effects on patients with asthma of eradicating visible indoor mould: a randomised controlled trial, *Thorax.* 62 (2007) 767–772. doi:10.1136/thx.2006.070847.
- [18] J. Toftum, A.S. Jørgensen, P.O. Fanger, Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin, *Energy and Buildings.* 28 (1998) 1–13. doi:10.1016/S0378-7788(97)00017-0.
- [19] J. BERGER, S. Tasca-Guernouti, M. Woloszyn, B. Catherine, L'humidité dans les bâtiments : Pathologies et paramètres gouvernants, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry 6 Au 8 Juin. (2012).
- [20] V.I. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska, Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations of moisture transfer in building materials., *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 56 (2013) 30–34.
- [21] E. Sevostianova, B. Leinauer, I. Sevostianov, Quantitative characterization of the microstructure of a porous material in the context of tortuosity., *International Journal of Engineering Science* 48. (2010) 1693–1701.
- [22] E. Mauret, M. Renaud, Transport phenomena in multi-particle systems—I. Limits of applicability of capillary model in high voidage beds-application to fixed beds of fibers and fluidized beds of spheres, *Chemical Engineering Science.* 52 (1997) 1807–1817.
- [23] M. Barrande, R. Bouchet, R. Denoyel, Tortuosity of Porous Particles, *Analytical Chemistry.* 79 (2007) 9115–9121.
- [24] L. Pisani, Simple Expression for the Tortuosity of Porous Media, *Transport in Porous Media.* 88 (2011) 193–203. doi:10.1007/s11242-011-9734-9.
- [25] J.-F. Daïan, Equilibre et transferts en milieux poreux I- Etats d'équilibre, (2013).
- [26] F. JAMES, Développement d'un système de Préconcentration miniaturisé pour la détection de gaz à l'état de trace / application à la détection de COV et d'explosifs, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2015.
- [27] F. Collet, Caractérisations hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux., Thèse de doctorat, Université de Rennes, 2004.
- [28] G. MONTES-HERNANDEZ, Etude expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par microscopie électronique à balayage environnementale (ESEM) et l'analyse digitale d'images, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 2002.
- [29] K. AZOS DIAZ, Étude multi-échelle des transferts de chaleur et de masse appliquée à un bâtiment parisien rénové, en condition météorologique normale et en période de vague de chaleur, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, 2016.
- [30] K.S.W. Sing, Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984), *Pure and Applied Chemistry.* 57 (1985) 603–619. doi:10.1351/pac198557040603.
- [31] J. Bear, A.H.-D. Cheng, *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2010. <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-6682-5> (accessed February 2, 2017).

- [32] G. MALVAULT, Détermination expérimentale de la distribution de taille de pores d'un milieu poreux par l'injection d'un fluide à seuil ou analyse harmonique, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech, 2013.
- [33] C. Laroussi, Analyse de l'interaction espace poreux fluide dans les problèmes de l'écoulement en milieu poreux non saturés, Thèse de doctorat, ENSAT, Toulouse, 1972.
- [34] T. Berit, Hygroscopic moisture transport in wood, Thèse de doctorat, Université norvégienne des sciences et de la technologie, 1998.
- [35] D.J. 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.
- [36] Y. Ait Oumeziane, Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre, Thèse de doctorat, INSA DE Rennes, 2013.
- [37] B. Zdravkov, J. Čermák, M. Šefara, J. Janků, Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective, *Open Chemistry*. 5 (2007). doi:10.2478/s11532-007-0017-9.
- [38] ISO 12571, Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment -- Détermination des propriétés de sorption hygroscopique, (2000).
- [39] K. Kruis, J. Madera, Numerical analysis of coupled heat and moisture transfer based on kunzel model, *18 Th Int Conf Eng Mech 2012*. (2012) 763–774.
- [40] 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, 2012.
- [41] 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, 2015.
- [42] F. ROUQUEROL, L. LUCIANI, P. LLEWELLYN, R. DENOYEL, J. ROUQUEROL, Texture des matériaux pulvérulents ou poreux, *Techniques de l'Ingénieur*. (2003).
- [43] S. Brunauer, P.H. Emmett, E. Teller, Adsorption of Gases in Multimolecular Layers, *Journal of the American Chemical Society*. 60 (1938) 309–319. doi:10.1021/ja01269a023.
- [44] S. Furmaniak, A.P. Terzyk, P.A. Gauden, the general mechanism of water sorption on foodstuffs – Importance of the multitemperature fitting of data and the hierarchy of models, *Journal of Food Engineering*. 82 (2007) 528–535. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.03.012.
- [45] J. Charpin, B. Rasneur, *Mesure des surfaces spécifiques*, (1982).
- [46] Anh dung tran le, Etude des transferts hygrothermiques Dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2010.
- [47] CSTB, Transfert d'humidité à travers les parois - évaluer les risques de condensation, (2009).
- [48] J.R. Philip, D.A. De Vries, Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Transactions, American Geophysical Union*. 38 (1957) 222. doi:10.1029/TR038i002p00222.
- [49] R. Peuhkuri, Moisture dynamics in building envelopes, Thèse de doctorat, Université Technique du Danemark, 2003.

- [50] 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. doi:10.1007/s12273-012-0063-x.
- [51] Z. Zhang, Modelling of sorption hysteresis and its effect on moisture transport within cementitious materials, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2013.
- [52] A.V. Luikov, Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies, in: *Advances in Heat Transfer*, Elsevier, 1964: pp. 123–184. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065271708700984> (accessed February 27, 2017).
- [53] H.M. Künzel, Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters, IRB-Verl, Stuttgart, 1995.
- [54] B. Remki, K. Abahri, M. Tahlalti, R. Belarbi, Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient, *International Journal of Thermal Sciences*. 57 (2012) 135–141. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.005.
- [55] 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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.05.015.
- [56] 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*. 52 (2016) 2257–2269. doi:10.1007/s00231-015-1740-y.
- [57] H.M. Künzel, A. Holm, Simulation des transferts de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe de bâtiment, Fraunhofer Institut Bauphysik, Holzkirchen. (n.d.:10).
- [58] S.H. Ryu, H.J. Moon, J.T. Kim, Evaluation of the influence of hygric properties of wallpapers on mould growth rates using hygrothermal simulation, *Energy and Buildings*. 98 (2015) 113–118. doi:10.1016/j.enbuild.2014.09.058.
- [59] M. Barclay, N. Holcroft, A.D. Shea, Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp–lime buildings, *Building and Environment*. 80 (2014) 204–212. doi:10.1016/j.buildenv.2014.06.003.
- [60] 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. doi:10.1016/j.buildenv.2010.12.020.
- [61] 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. doi:10.1007/s10853-008-2584-3.
- [62] 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. doi:10.1007/s11242-007-9148-x.
- [63] 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. doi:10.1016/j.autcon.2008.12.006.
- [64] T. Duforestel, Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherches sur l'efficacité énergétique des bâtiments, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Claude Bernard Lyon, 2015.
- [65] 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. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.293.
- [66] 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. doi:10.1007/s12273-016-0292-5.
- [67] 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*. (2016). doi:10.1007/s00231-016-1944-9.
- [68] 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, 2015.
- [69] S. Whitaker, ADVANCES IN THEORY OF FLUID MOTION IN POROUS MEDIA, *Industrial & Engineering Chemistry*. 61 (1969) 14–28. doi:10.1021/ie50720a004.
- [70] Y. Bachmat, J. Bear, Macroscopic modelling of transport phenomena in porous media. 1: The continuum approach, *Transport in Porous Media*. 1 (1986) 213–240. doi:10.1007/BF00238181.
- [71] F. DUVAL, MODELISATION DU RENOYAGE D’UN LIT DE PARTICULES : CONTRIBUTION A L’ESTIMATION DES PROPRIETES DE TRANSPORT MACROSCOPIQUES, Thèse de doctorat, INPT, Toulouse, 2002.
- [72] W.G. Gray, A derivation of the equations for multi-phase transport, *Chemical Engineering Science*. 30 (1975) 229–233. doi:10.1016/0009-2509(75)80010-8.
- [73] S. Whitaker, Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying, in: *Advances in Heat Transfer*, Elsevier, 1977: pp. 119–203. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065271708702235> (accessed June 13, 2015).
- [74] C. Moyne, J.-C. Batsale, A. Degiovanni, Approche expérimentale et théorique de la conductivité thermique des milieux poreux humides—II. Théorie, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 31 (1988) 2319–2330. doi:10.1016/0017-9310(88)90163-9.
- [75] B. Goyeau, Macroscopic Conduction Models by Volume Averaging for Two-Phase Systems, in: S. Volz (Ed.), *Thermal Nanosystems and Nanomaterials*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009: pp. 95–105. http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-04258-4_4 (accessed February 16, 2016).
- [76] M. Quintard, S. Whitaker, One- and Two-Equation Models for Transient Diffusion Processes in Two-Phase Systems, in: *Advances in Heat Transfer*, Elsevier, 1993: pp. 369–464. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065271708700091> (accessed February 16, 2016).
- [77] J. Lux, Comportement thermique macroscopique de milieux fibreux réels anisotropes : étude basée sur l’analyse d’images tridimensionnelles, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2005.
- [78] E. Samson, J. Marchand, K.A. Snyder, J.J. Beaudoin, Modeling ion and fluid transport in unsaturated cement systems in isothermal conditions, *Cement and Concrete Research*. 35 (2005) 141–153. doi:10.1016/j.cemconres.2004.07.016.
- [79] H. Sleiman, Etude du transport des chlorures dans les matériaux cimentaires non saturés : Validation expérimentale sur bétons en situation de marnage, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2008.

- [80] K. Bourbatache, Modélisation du transfert des ions chlorures dans les matériaux cimentaires par homogénéisation périodique., Thèse de doctorat, La Rochelle, 2009.
- [81] A. Bensoussan, J.-L. Lions, G. Papanicolaou, Asymptotic analysis for periodic structures, North-Holland Pub. Co.; sole distributors for the U.S.A. and Canada, Elsevier North-Holland, Amsterdam; New York: New York, 1978.
- [82] E. Sanchez-Palencia, Non-homogeneous media and vibration theory, Springer-Verlag, Berlin; New York, 1980. <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=issue&issn=1616-6361&volume=127> (accessed June 13, 2015).
- [83] J.B. Keller, Effective Behavior of Heterogeneous Media, in: U. Landman (Ed.), Statistical Mechanics and Statistical Methods in Theory and Application, Springer US, Boston, MA, 1977: pp. 631–644. http://link.springer.com/10.1007/978-1-4613-4166-6_27 (accessed June 13, 2015).
- [84] J.L. Auriault, P.M. Adler, Taylor dispersion in porous media: Analysis by multiple scale expansions, *Advances in Water Resources*. 18 (1995) 217–226. doi:10.1016/0309-1708(95)00011-7.
- [85] J.-L. Auriault, C. Boutin, C. Geindreau, Homogenization of coupled phenomena in heterogenous media, ISTE; J. Wiley, London, UK: Hoboken, N.J., 2009.
- [86] J.-L. Auriault, H.I. Ene, Macroscopic modelling of heat transfer in composites with interfacial thermal barrier, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 37 (1994) 2885–2892. doi:10.1016/0017-9310(94)90342-5.
- [87] J.L. Auriault, Effective macroscopic description for heat conduction in periodic composites, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 26 (1983) 861–869. doi:10.1016/S0017-9310(83)80110-0.
- [88] C. Moyne, H.P. Amaral Souto, Multi-scale approach for conduction heat transfer: one- and two-equation models: Part 1: theory, *Computational and Applied Mathematics*. 33 (2014) 257–274. doi:10.1007/s40314-013-0059-x.
- [89] J. Lewandowska, J.-P. Laurent, Humidity transfer in unsaturated heterogeneous porous media by homogenization, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*. 25 (2000) 175–181. doi:10.1016/S1464-1895(00)00028-4.
- [90] W. MCHIRGUI, Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique - Application aux matériaux cimentaires, PhD, La Rochelle, 2012.
- [91] J. Lewandowska, A. Szymkiewicz, J.-L. Auriault, Upscaling of Richards' equation for soils containing highly conductive inclusions, *Advances in Water Resources*. 28 (2005) 1159–1170. doi:10.1016/j.advwatres.2005.03.006.
- [92] Y. Pachepsky, D. Timlin, W. Rawls, Generalized Richards' equation to simulate water transport in unsaturated soils, *Journal of Hydrology*. 272 (2003) 3–13. doi:10.1016/S0022-1694(02)00251-2.
- [93] J. Lewandowska, J.-L. Auriault, Modelling of unsaturated water flow in soils with highly permeable inclusions, *Comptes Rendus Mécanique*. 332 (2004) 91–96. doi:10.1016/j.crme.2003.10.012.
- [94] J.-L. Auriault, C. Geindreau, L. Orgéas, Upscaling Forchheimer law, *Transport in Porous Media*. 70 (2007) 213–229. doi:10.1007/s11242-006-9096-x.
- [95] G. Allaire, R. Brizzi, A. Mikelić, A. Piatnitski, Two-scale expansion with drift approach to the Taylor dispersion for reactive transport through porous media, *Chemical Engineering Science*. 65 (2010) 2292–2300. doi:10.1016/j.ces.2009.09.010.
- [96] S. Attinger, J. Dimitrova, W. Kinzelbach, Homogenization of the transport behavior of nonlinearly adsorbing pollutants in physically and chemically heterogeneous

- aquifers, *Advances in Water Resources*. 32 (2009) 767–777. doi:10.1016/j.advwatres.2009.01.011.
- [97] K. Bourbatache, O. Millet, A. Aït-Mokhtar, O. Amiri, Modeling the Chlorides Transport in Cementitious Materials By Periodic Homogenization, *Transport in Porous Media*. 94 (2012) 437–459. doi:10.1007/s11242-012-0013-1.
- [98] J. AURIAULT, J. LEWANDOWSKA, Diffusion non linéaire en milieux poreux., (n.d.).
- [99] P. Renard, G. de Marsily, Calculating equivalent permeability: a review, *Advances in Water Resources*. 20 (1997) 253–278. doi:10.1016/S0309-1708(96)00050-4.
- [100] C&B, Etat des lieux des connaissances actuelles sur le Fonctionnement Hygrothermique des matériaux biosourcés, (2012).
- [101] L. Conteville, C. den Hartigh, Les écomatériaux en France - État des lieux et enjeux dans la rénovation thermique des logements, France, 2009.
- [102] S. Amziane, L. Arnaud, eds., Bio-aggregate-based building materials: applications to hemp concretes, ISTE, London, 2013.
- [103] 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. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002.
- [104] Z. Li, X. Wang, L. Wang, Properties of hemp fibre reinforced concrete composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 37 (2006) 497–505. doi:10.1016/j.compositesa.2005.01.032.
- [105] S. Pretot, F. Collet, C. Garnier, Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating, *Building and Environment*. 72 (2014) 223–231. doi:10.1016/j.buildenv.2013.11.010.
- [106] P. Bouloc, ed., Hemp: industrial production and uses, CABI, Wallingford, 2013.
- [107] A. Evrard, Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Louvain Unité d'Architecture, 2008.
- [108] 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 (2012) 372–380. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.030.
- [109] M.-P. Boutin, C. Flamin, S. Quinton, G. Gosse, Analyse du cycle de vie de : Compounds thermoplastiques chargés fibres de chanvre et Mur en béton de chanvre banché sur ossature en bois, INRA Lille, 2005.
- [110] L. Arnaud, E. Gourlay, Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Construction and Building Materials*. 28 (2012) 50–56. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.
- [111] P. Tronet, T. Lecompte, V. Picandet, C. Baley, Study of lime hemp concrete (LHC) – Mix design, casting process and mechanical behaviour, *Cement and Concrete Composites*. 67 (2016) 60–72. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.12.004.
- [112] P. Glé, E. Gourdon, L. Arnaud, Modelling of the acoustical properties of hemp particles, *Construction and Building Materials*. 37 (2012) 801–811. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.008.
- [113] P. Glé, E. Gourdon, L. Arnaud, Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity, *Applied Acoustics*. 72 (2011) 249–259. doi:10.1016/j.apacoust.2010.11.003.
- [114] S. Benfratello, C. Capitano, G. Peri, G. Rizzo, G. Scaccianoce, G. Sorrentino, Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite, *Construction and Building Materials*. 48 (2013) 745–754. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096.
- [115] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller, L. Goudet, Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection

- process, *Construction and Building Materials*. 22 (2008) 2116–2123. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016.
- [116] B. Mazhoud, F. Collet, S. Pretot, J. Chamoin, Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters, *Building and Environment*. 96 (2016) 206–216. doi:10.1016/j.buildenv.2015.11.013.
- [117] A. Shea, M. Lawrence, P. Walker, Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building, *Construction and Building Materials*. 36 (2012) 270–275. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123.
- [118] R. Walker, S. Pavía, Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes, *Construction and Building Materials*. 64 (2014) 270–276. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081.
- [119] F. Collet, S. Pretot, Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, *Construction and Building Materials*. 65 (2014) 612–619. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.
- [120] F. Collet, S. Pretot, Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete, *Construction and Building Materials*. 36 (2012) 58–65. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.139.
- [121] R. Walker, S. Pavia, R. Mitchell, Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes, *Construction and Building Materials*. 61 (2014) 340–348. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065.
- [122] P. de Bruijn, P. Johansson, Moisture fixation and thermal properties of lime-hemp concrete, *Construction and Building Materials*. 47 (2013) 1235–1242. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.006.
- [123] 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 and Buildings*. 88 (2015) 91–99. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.043.
- [124] A.D. Tran Le, C. Maalouf, T.H. Mai, E. Wurtz, F. Collet, Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope, *Energy and Buildings*. 42 (2010) 1797–1806. doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.016.
- [125] P. Bouloc, *Le chanvre industriel : production et utilisations*, Éd. France agricole, Paris, 2006.
- [126] P.-Y. Bütschi, *Utiliation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction*, Thèse de doctorat, Université de Moncton, 2004.
- [127] R.M.H. Lawrence, T.J. Mays, P. Walker, D. D'Ayala, Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis, *Thermochimica Acta*. 444 (2006) 179–189. doi:10.1016/j.tca.2006.03.002.
- [128] P.B. de Bruijn, K.-H. Jeppsson, K. Sandin, C. Nilsson, Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres, *Biosystems Engineering*. 103 (2009) 474–479. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005.
- [129] M. Fourmentin, *Impact de la répartition et des transferts d'eau sur les propriétés des matériaux de construction à base de chaux formulées*, Thèse de doctorat, Université de Paris-Est, 2015.
- [130] J. Chamoin, *Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation*, Thèse de doctorat, INSA Rennes, 2013.
- [131] D. Samri, *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2008.

- [132] F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot, C. Lanos, Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes, *Energy and Buildings*. 62 (2013) 294–303. doi:10.1016/j.enbuild.2013.03.010.
- [133] V. Cerezo, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2005.
- [134] 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.
- [135] M. Vignon, Le chanvre et ses applications, CERMAV Grenoble, France. (n.d.).
- [136] B.S. Umurigirwa-Vasseur, Elaboration et caractérisation d'un agromatériau chanvre-amidon pour le Bâtiment, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2014.
- [137] C. Garcia-Jaldon, Caractérisation morphologie et chimique du chanvre (*cannabis sativa*), prétraitement à la vapeur et valorisation, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 1995.
- [138] M. Chabannes, Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agro bétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction, Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2015.
- [139] M. Fourmentin, P. Faure, P. Pelupessy, V. Sarou-Kanian, U. Peter, D. Lesueur, S. Rodts, D. Daviller, P. Coussot, NMR and MRI observation of water absorption/uptake in hemp shives used for hemp concrete, *Construction and Building Materials*. 124 (2016) 405–413. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.100.
- [140] C. Rode, Moisture buffering of Building Materials, Technical University of Denmark, 2005.
- [141] EN 1925:1999, Natural stone test methods – determination of water absorption coefficient by capillarity, 1999.
- [142] J. Page, M. Sonebi, S. Amziane, Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material, *Construction and Building Materials*. (2016). doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.037.
- [143] P. Strandberg-de Bruijn, P. Johansson, Moisture transport properties of lime–hemp concrete determined over the complete moisture range, *Biosystems Engineering*. 122 (2014) 31–41. doi:10.1016/j.biosystemseng.2014.03.001.
- [144] ISO 9277, Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption — BET method, (2010).
- [145] AFPC-AFREM, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, *Compte Rendu Des Journées Techniques AFPC-AFREM*. (1997).
- [146] J.-F. Daian, rocessus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau meso et macroporeux : étude expérimentale du mortier de ciment, Thèse de doctorat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1986.
- [147] K. Beck, Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité., Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2006.
- [148] A. Piot, Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique, Thèse de doctorat, 2009.
- [149] A. TRABELSI, Etudes numérique et expérimentale des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2010.

- [150] N. Issaadi, A. Nouviaire, R. Belarbi, A. Ait-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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.030.
- [151] IUPAC, Reporting Physisorption data for Gas/solid Systems, *Compte Rendu Des Journées Techniques AFPC-AFREM*. 57 (1985) 603–619.
- [152] F. Collet, S. Prétot, J. Chamoin, C. Lanos, Hydric characterization of sprayed hempcrete, 4th International Building Physics Conference. (2009).
- [153] Y. Ait Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, C. Lanos, Influence of temperature on sorption process in hemp concrete, *Construction and Building Materials*. 106 (2016) 600–607. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.117.
- [154] H.R. Trechsel, *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*, ASTM International. (2001).
- [155] P. Talukdar, S.O. Olutmayin, O.F. Osanyintola, C.J. Simonson, An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. Part I: Experimental facility and material property data, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 50 (2007) 4527–4539. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.026.
- [156] G.H. Galbraith, R.C. Mclean, J.S. Guo, Moisture permeability data presented as a mathematical relationship, *Building Research & Information*. 26 (1998) 157–168. doi:10.1080/096132198369931.
- [157] G.H. Galbraith, J.S. Guo, R.C. McLean, the effect of temperature on the moisture permeability of building materials, *Building Research & Information*. 28 (2000) 245–259. doi:10.1080/09613210050073706.
- [158] European Standard ISO 12572 Building materials, Determination of water vapor transmission properties (ISO/DIS 12572:1997) PrEN ISO 12572., (1997).
- [159] M.K. Kumaran, A thermal and moisture transport property database for common building and insulating materials., Final Reports, RP 1018, ASHRAE, Research Projects. (2002).
- [160] 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).
- [161] 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).
- [162] 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. doi:10.1617/s11527-014-0467-4.
- [163] B. Kari, B. Perrin, J.C. Foures, Modélisation macroscopique des transferts de chaleur et d'humidité dans des matériaux du bâtiment. Les données nécessaires, *Materials and Structures*. 25 (1992) 482–489. doi:10.1007/BF02472638.
- [164] S. Amziane, F. Collet, eds., *Bio-aggregates Based Building Materials*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2017. <http://link.springer.com/10.1007/978-94-024-1031-0> (accessed April 13, 2017).
- [165] A. Bouterf, Comportement mécanique de la plaque de plâtre étudié par tomographie et essais mécaniques in-situ, Thèse de doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, 2014.

- [166] J.-Y. Buffiere, E. Maire, J. Adrien, J.-P. Masse, E. Boller, In Situ Experiments with X ray Tomography: an Attractive Tool for Experimental Mechanics, *Experimental Mechanics*. 50 (2010) 289–305. doi:10.1007/s11340-010-9333-7.
- [167] C. Thiery, Tomographie à rayons X, *Technique de L'ingénieur*. (2013).
- [168] T. Zhang, Imagerie multi-résolution par tomographie aux rayons X : application à la tomographie locale en science des matériaux., Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [169] C. EL Hachem, K. Abahri, R. Bennacer, Microscopic Swelling analysis of spruce wood in sorption cycle, *International Conference On Materials and Energy ICOME'16*, La Rochelle. (2016).
- [170] C. EL Hachem, K. Abahri, R. Bennacer, 3D X-ray Tomography for the Hygrothermal Characterisation of Spruce wood, *First International Conference on Bio-Based Building Materials, ICBBM*, Clermont-Ferrand. (2015).
- [171] C. EL Hachem, K. Abahri, R. Bennacer, Localized analysis of cellulosic fibrous insulation materials, *ICCBM 2016: 18th International Conference on Construction and Building Materials*, Copenhagen, Denmark. (2016).
- [172] C.A. Schneider, W.S. Rasband, K.W. Eliceiri, NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nature Methods*. 9 (2012) 671–675. doi:10.1038/nmeth.2089.
- [173] O. Coindreau, Etude 3D de preforme fibreuses : interaction entre phénomènes physicochimiques et geometrie, Thèse de doctorat, Université de bordeaux, 2003.
- [174] D. Legland, I. Arganda-Carreras, P. Andrey, MorphoLibJ: integrated library and plugins for mathematical morphology with ImageJ, *Bioinformatics*. (2016) 3532–3534. doi:10.1093/bioinformatics/btw413.
- [175] E. Maire, P. Colombo, J. Adrien, L. Babout, L. Biasetto, Characterization of the morphology of cellular ceramics by 3D image processing of X-ray tomography, *Journal of the European Ceramic Society*. 27 (2007) 1973–1981. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.097.
- [176] P. Clerc, Mesure de champs de déplacements et de déformations par stéréovision et corrélation d'images numériques, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2001.
- [177] G. Besnard, F. Hild, S. Roux, "Finite-Element" Displacement Fields Analysis from Digital Images: Application to Portevin–Le Châtelier Bands, *Experimental Mechanics*. 46 (2006) 789–803. doi:10.1007/s11340-006-9824-8.
- [178] H. Leclerc, J.N. Périé, F. Hild, S. Roux, Corrélation d'images numériques intégrée pour l'identification de propriétés mécaniques., *19eme Congres Francais de Mecanique*. Marseille. (2009).
- [179] F. Hild, S. Roux, Comparison of Local and Global Approaches to Digital Image Correlation, *Experimental Mechanics*. 52 (2012) 1503–1519. doi:10.1007/s11340-012-9603-7.
- [180] G. Broggiato, Adaptive image correlation technique for full-field strain measurement, In *Proceedings of ICEM12 - 12th International Conference on Experimental Mechanics*. (2004).
- [181] T. Taillandier-Thomas, S. Roux, T.F. Morgeneyer, F. Hild, Localized strain field measurement on laminography data with mechanical regularization, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 324 (2014) 70–79. doi:10.1016/j.nimb.2013.09.033.
- [182] A. Darquennes, Y. Wang, F. Benboudjema, G. Nahas, monitoring internal sulphate reactions by X-ray tomography, *15th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*., Delft, the Netherlands. (2015).

- [183] S. Whitaker, Coupled Transport in Multiphase Systems: A Theory of Drying, in: *Advances in Heat Transfer*, Elsevier, 1998: pp. 1–104. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065271708702405> (accessed June 13, 2015).
- [184] S. Chemkhi, Séchage d'un milieu déformable non saturé : modélisation du couplage hygromécanique, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1 en cotutelle avec Ecole nationale d'ingénieurs de Monastir, 2008.
- [185] J.-F. Daian, Condensation and isothermal water transfer in cement mortar Part I? Pore size distribution, equilibrium water condensation and imbibition, *Transport in Porous Media*. 3 (1988) 563–589. doi:10.1007/BF00959103.
- [186] W. Mchirgui, O. Millet, O. Amiri, Modelling moisture transport for a predominant water vapour diffusion in a partially saturated porous media, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 17 (2013) 202–218. doi:10.1080/19648189.2013.769787.
- [187] B.R. Munson, D.F. Young, T.H. Okiishi, *Fundamentals of fluid mechanics*, 4th ed, Wiley, New York, 2002.
- [188] A. Bouddour, J.L. Auriault, M. Mhamdi-Alaoui, J.F. Bloch, Heat and mass transfer in wet porous media in presence of evaporation—condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 41 (1998) 2263–2277.
- [189] J.F. Bloch, J.L. Auriault, Heat Transfer in Nonsaturated Porous Media. Modelling by Homogenisation, *Transport in Porous Media*. 30 (1998) 301–321. doi:10.1023/A:1006540912415.
- [190] J.-L. Auriault, C. Boutin, C. Geindreau, eds., *Heterogenous Medium: Is an Equivalent Macroscopic Description Possible?*, in: *Homogenization of Coupled Phenomena in Heterogenous Media*, ISTE, London, UK, 2009: pp. 55–74. <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470612033.ch2> (accessed December 22, 2015).
- [191] J.-L. Auriault, Nonsaturated deformable porous media: Quasistatics, *Transport in Porous Media*. 2 (1987) 45–65. doi:10.1007/BF00208536.
- [192] P. Crausse, J. Laurent, B. Perrin, Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux, *Revue Générale de Thermique*. 35 (1996) 95–106. doi:10.1016/S0035-3159(96)80002-X.
- [193] L. Liu, Etude expérimentale de la perméabilité relative des matériaux cimentaires et simulation numérique du Transfert d'eau dans le béton, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [194] S. Dal Pont, Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2004.

Etude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé

Résumé :

Le présent travail a pour objectif de comprendre l'influence des paramètres géométriques des éco-matériaux d'enveloppe, tels que le béton de chanvre, sur les mécanismes de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité afin de prédire le comportement du bâtiment dans le but de le piloter et de l'améliorer dans sa durabilité. Pour cela, une approche multi-échelle est mise en place. Elle consiste à maîtriser les phénomènes physiques dominants et leurs interactions à l'échelle microscopique. S'ensuit, une modélisation à double échelle, microscopique –macroscopique, des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité qui prend en compte les propriétés intrinsèques et la topologie microstructurale du matériau moyennant le recours à la tomographie rayon X conjuguée à la corrélation d'images 2D et 3D. Pour cela, une campagne de caractérisation fine des propriétés physiques et hygrothermiques du béton de chanvre confectionné au laboratoire a été réalisée. Elle s'est focalisée sur l'étude de l'impact du vieillissement, l'état thermique et hydrique du matériau sur ses propriétés intrinsèques. Les résultats montrent une excellente capacité d'isolation thermique et de régulation naturelle d'humidité du béton de chanvre. Puis, une caractérisation microscopique par différentes techniques d'imagerie a été effectuée. Les reconstructions 3D du matériau réel obtenues par la tomographie aux rayons X à différentes résolutions montrent que le béton de chanvre possède plusieurs échelles de porosité, allant de la microporosité au sein du liant et des chènevottes à la macroporosité inter-particulaire. Le comportement hygro-morphique sous sollicitations hydriques a été ensuite étudié. Les résultats de la corrélation d'images numériques 2D et de la tomographie aux rayons X couplés à la corrélation d'images volumiques, montrent la nature du comportement du béton de chanvre soumis à des hygrométries différentes. En effet, la chènevotte subit des déformations plus importantes que le liant, causant ainsi des modifications de la microstructure du matériau.

Sur le volet de la modélisation, moyennant la technique d'homogénéisation périodique un modèle des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de construction a été développé. Les tenseurs de diffusion et de conductivité thermique homogénéisés ont été calculés numériquement. Ensuite, une confrontation entre les résultats du calcul des coefficients de diffusion macroscopique et ceux expérimentaux obtenus au LaSIE a été réalisée. Elle met en évidence la qualité de la prédiction. De plus, la conductivité thermique de la phase solide a été ainsi déduite.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de thèse ont mis en exergue l'influence de l'état hydrique et thermique du béton de chanvre sur ses propriétés intrinsèques, et sa microstructure très hétérogène. Ils ont révélé aussi les limites des approches phénoménologiques basées sur l'établissement des bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

