



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Université de Lorraine

École Doctorale (sciences et ingénierie) Ressources, Procédés, Produits et Environnements
(RP2E)

et

Université de Monastir

Ecole doctorale Sciences et Techniques d'Ingénieurs

Thèse

Présentée par :

Faiza MNASRI

Pour obtenir le grade de Doctorat de l'Université de Lorraine

Discipline : Génie des Procédés et des Produits
et

Doctorat de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir

Discipline: Génie énergétique

Etude du transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes: application aux milieux fibreux et à l'isolation des bâtiments

Soutenance prévue le: 06/12/2016

Devant le jury composé de:

Mr. ELGANAOUI Mohammed	Professeur, Université de Lorraine	Directeur
Mr. GABSI Slimane	Professeur, Ecole Nationale d'ingénieurs de Sfax	Directeur
Mme. CHARRIER Fatima	HDR, Université de Pau et des Pays de l'Adour	Rapporteur
Mr. CHAOUACHI Bechir	Professeur, Ecole Nationale d'ingénieurs de Gabes	Rapporteur
Mr. BENNACER Rachid	Professeur, Ecole Normale Supérieure de Cachan	Examineur
Mr. MHIMID Abdallah	Professeur, Ecole Nationale d'ingénieurs de Monastir	Examineur
Mr. KHELIFA Mourad	MCF, Université de Lorraine	Co-encadrant
Mr. NUNZI Jean Michel	Professeur, Université de Queen's	Invité
Mr. DJEDJIG Rabah	MCF, Université de Lorraine	Invité

A mes parents...

A mes chers frères et sœurs....

A mes petits neveux et mes petites nièces.. je vous embrasses!

Merci pour tout!

Remerciements

Bien qu'il s'agisse d'une des premières pages de ce manuscrit de thèse, c'est aussi la dernière page que j'ai rédigée. Et c'est là que je me suis rendue compte que Oui c'est la fin! Je me suis dit que cette aventure est finie (enfin, certains diront!). J'ai repensé à tous les moments passés et, avant d'entamer une nouvelle expérience, j'ai naturellement souhaité remercier tous ceux qui ont contribué de manière directe ou indirecte, à la réussite de ce travail.

Dans un premier temps, j'adresse toute ma reconnaissance et ma gratitude à Monsieur Mohammed EL GANAOU de m'avoir fait confiance en acceptant de me confier ce sujet. Merci pour avoir toujours su m'aider, me soutenir, m'orienter, me conseiller et surtout pour avoir su me laisser une grande liberté et beaucoup d'autonomie tout en gardant un œil bienveillant sur moi.

Je tiens à remercier aussi mon co-directeur de thèse Monsieur Slimane GABSI pour sa gentillesse, son soutien et surtout de m'avoir permis de réaliser mon travail dans les meilleures conditions possibles. Tous mes remerciements également à Mourad KHELIFA, mon co-encadrant de thèse.

Je remercie vivement Monsieur Rachid BENNACER, pour sa considérable collaboration, son aide précieuse et efficace et pour m'avoir fait l'honneur d'être un des membres de jury. Je voudrais également remercier très sincèrement Madame Kamilia ABAHRI, Maître de Conférences à l'ENS Cachan, qui a contribué avec rigueur à ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Madame Fatima CHARRIER et Monsieur Bechir CHAOUACHI pour l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant de rapporter ce manuscrit. Je tiens à remercier également Monsieur Abdallah MHIMID, d'avoir accepté de faire partie du membre de jury.

J'associe à mes remerciements Monsieur Jean Michel NUNZI, pour l'honneur qu'il m'a fait en participant à ce jury. Merci pour toutes les discussions intéressantes et pertinentes, pour les conseils qui ont toujours été très utiles.

Je n'oublie pas dans ces remerciements, Monsieur Rabah DJEDJIG pour sa disponibilité, son aide et ses conseils précieux qui ont fait progresser ce travail. Je remercie également Rafael CHAVES DEPTULSKI pour sa généreuse contribution.

Je ne saurai faire ces remerciements sans associer les autorités de l'établissement d'accueil dans lequel je ne me suis jamais sentie étrangère. Au Directeur de l'IUT de Longwy, à tous les responsables et aux personnels de ce petit établissement.

J'adresse des remerciements particuliers à l'équipe informatique de l'IUT pour leurs nombreuses missions de sauvetage de mes données. Mes pensées vont aussi vers Gabriel Dauphin, technicien précédent à l'IUT, pour son aide et sa gentillesse.

Et, on ne peut pas faire de thèse sans la présence, l'aide et le travail discrets des secrétaires. Pour cela je profite de dire merci à Jocelyne, Pascale, Valérie, Laure, Corinne, Micheline pour leurs disponibilités et leurs gentillesse. Merci également à Nadine pour son accueil chaleureux et ses qualités très humaines.

Je ne peux pas finir aussi sans citer tous mes admirables amis, dont certains d'entre eux, après un certain temps, sont devenus ma deuxième famille au cours de cette aventure Longovicienne. Au nom de tous les moments de partage: d'une discussion, d'un travail, d'un café, d'un repas, d'une sortie,

d'un voyage... Je dis merci à Nadjiba, Azza, Megnya, Luana, Ahlem, Nossaiba, Asma, Yassine, Ghazi, Bassem, Lahoucine, Van diem, Sofiane...! Avec qui j'ai partagé ces années de découvertes, de joies, d'amitié, d'aventures et, des fois, d'angoisse à l'approche d'un futur incertain, mais aussi avec beaucoup d'espoir que tout cela va passer et qu'un jour tout ira pour le mieux pour nous tous. Je n'oublie pas tous les stagiaires qui sont passés par ce laboratoire, je cite en particulier Mustapha, Boqi, Laila, Nessrine et Sana qui étaient tout simplement des agréables personnes.

J'ai aussi une petite pensée pour mes compagnons d'aventure à distance. Malgré qu'on était toujours loin, mais la spécialité et la recherche nous ont toujours uni pour être encore plus proche que tout! Je cite particulièrement, Sonia, Nabil, Oussama. Merci pour les innombrables discussions et les conseils fraternels qui ont grandement contribué à l'aboutissement de cette mission.

A mon cher ami Kamel, qui était toujours là, pour m'encourager, pour me pousser, pour m'écouter et pour me réconforter! Merci énormément. Je te souhaite une vie toute heureuse avec ta petite famille.

A ma chère Samah, Merci d'être toujours là pour moi.

Enfin, comment exprimer ma reconnaissance et ma gratitude envers mes parents pour leur amour et leur soutien inconditionnels, pour leurs sacrifices, leur patience et leur tolérance. À vous qui avez su attendre patiemment et en silence, qui avez mis vos espoirs entre les mains de la foi inébranlable que ce travail sera un jour terminé. Que cette thèse puisse apporter la juste récompense à vos attentes.

Résumé

Le contexte énergétique international impose de nouvelles orientations au secteur du bâtiment neuf ou en rénovation. Toute nouvelle solution doit être techniquement efficace et respectueuse pour l'environnement. Il s'agit dans ce travail de thèse de réaliser une étude numérique et expérimentale de matériaux de construction biosourcés liés au contexte transfrontalier Lorrain (France-Belgique-Luxembourg). En effet, ce travail intègre une partie du projet européen « Ecotransfaire » mené pour le développement d'une filière durable propre aux éco-matériaux. La sélection des matériaux selon une liste de critères à la fois scientifiques, géographiques et environnementaux a permis de répondre à notre problématique en s'orientant vers l'intégration des matériaux biosourcés pour leurs aspects favorables à l'environnement et à l'efficacité énergétique du bâtiment.

Intégrés au bâtiment, ces matériaux sont sujets à plusieurs phénomènes de transfert de chaleur et de masse. Dans un premier temps et pour mieux appréhender ces phénomènes, un modèle de transfert couplé de chaleur, d'air, d'humidité (HAM transfers) est utilisé pour simuler le comportement hygrothermique d'un matériau en bois massif à structure supposée homogène. Ce modèle, mis en œuvre et résolu par la méthode des éléments finis, a été validé par des résultats analytiques retenus dans la littérature. L'étude de sensibilité du modèle au couplage, aux dimensions dans l'espace, aux conditions aux limites et aux variabilités des paramètres d'entrée est également présentée.

Une des difficultés de l'utilisation de ce modèle réside dans la prise en considération de l'aspect fortement hétérogène de certains matériaux. Ainsi, dans ce travail, nous proposons une approche de caractérisation d'un composite lignocellulosique hétérogène de structure poreuse. En effet ce matériau est composé de deux constituants bien connus dans le domaine de l'industrie de construction: Le bois et le ciment. Le bois est incorporé sous forme de granulats avec des formes et des tailles irrégulières et le ciment est utilisé comme un liant. Le travail réalisé permet de remonter aux propriétés intrinsèques équivalentes de ce matériau (conductivité thermique et perméabilité à la vapeur) à l'aide des techniques de micro-tomographie.

La méthodologie suivie consiste à la détermination de la structure d'échantillon par une prise d'images à l'échelle microscopique. Une fois la structure de l'échantillon générée, une reconstruction de la représentation bidimensionnelle précède la génération de la structure tridimensionnelle à l'aide d'un outil numérique qui permet de déterminer les propriétés équivalentes des domaines reconstruits en 3D. La perméabilité et la conductivité thermique équivalentes sont les deux propriétés évaluées dans cette configuration. Ces deux propriétés dépendent fortement de la porosité et de la distribution des pores dans la phase continue (la phase solide). De plus la composition de ce matériau et les fractions volumiques de chacun de ses constituants influent sur la formation de sa microstructure et par conséquent sur ses propriétés de transferts thermiques et hydriques.

L'ensemble des connaissances développées dans ce travail permet une piste sérieuse pour l'élaboration d'un éco-matériau à propriétés contrôlées pour des usages spécifiques dans la construction et la rénovation.

Mots-clefs : Matériaux biosourcés de construction, Transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité, Milieux poreux, Matériau bois-ciment, Caractérisation par micro-tomographie, Conductivité thermique équivalente, Perméabilité équivalente.

Abstract

International energy context requires a new orientation to the building sector as in construction or in renovation. Any new solution must be technically efficient and environmentally acceptable. In this thesis, the object is to achieve a numerical and experimental analysis of a building biobased materials. Some of these materials are included from the study of a transborder project to the Lorraine region (France, Belgium and Luxembourg). Indeed an Ecotransfaire project was included in this work. This project has been oriented to the development of a sustainable eco materials chain. A process of analysis has been established in order to select the materials candidates on the basis of scientific, geographical and environmental criteria. The answers are moving towards the integration of bio-based materials.

These materials are subject of several heat and mass transfers phenomena. So understanding these mechanisms within a building material has been achieved firstly. This resulted on a coupled model of heat transfer, air, moisture experienced by the HAM model. This model is applied to a wooden building material whose its structure is assumed homogeneous. Then, this model was implemented and solved by the finite element method. Its numerical solution is validated by analytical results available in the literature. The study of sensitivity of the model coupling, dimensions in space, the boundary conditions and the variability of input parameters is also presented.

One of the difficulties of using this model is the case of heterogeneous materials. Thus, in this work, we propose an approach of characterization of an heterogeneous lignocellulosic composite material with a porous structure. In fact, this material is composed of two components: Wood and cement. The wood is presented by a shapes aggregates with irregulars sizes and the cement is considered as the binder in the composition. The object was to predict its equivalent intrinsic properties (thermal conductivity and vapor permeability) by using the micro-tomography techniques.

The methodology consists to determine the structure of the sample by taking images at the microscopic scale. Once the structure of the sample is generated, we will conduct from a reconstruction of the two-dimensional representation to a three dimensional structure by using a numerical tool which determines the equivalent properties of the 3D reconstructed domain. The permeability as well as the equivalent thermal conductivity are the two properties evaluated in this configuration. These two properties are strongly depend to the porosity and to pore distribution in the continuous phase (the solid one). Moreover the composition of the material and the volume fractions of each components influence the formation of microstructure and consequently the thermal and hydric transfers.

Key words: Building biobased materials, coupled heat, air and moisture transfers, Porous media, Wood-cement material, Characterization by micro-tomography, equivalent thermal conductivity, equivalent permeability.

Nomenclature

Grandeurs sans dimension

Nu	nombre de Nusselt (eq. 11)
Pe	nombre de Peclet
Pr	nombre de Prandtl
Ra	nombre de Rayleigh
Re	nombre de Reynolds
Da	nombre de Darcy (eq. 4)
u, v, w	vitesses adimensionnelles
x, y, z	coordonnées adimensionnelles cartésiennes
x, r, θ	coordonnées adimensionnelles cylindriques
ε	porosité
τ	tortuosité

Grandeurs avec dimension

C_a	capacité de stockage d'air sec [s^2/m^2]
C_m	Capacité massique [$kg/kg \cdot Pa$]
C_p	Capacité thermique [$J/kg \cdot K$]
h_l	Chaleur latente [J/kg]
J_a	Densité de flux d'air [$kg/m^2 s$]
J_l	Densité de flux liquide [$kg/m^2 s$]
J_m	Densité de flux d'humidité [$J/(m^2 \cdot s)$]
J_q	Densité de flux thermique [$kg/m^2 s$]
J_v	Densité de flux de vapeur [$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$]
k_l	Perméabilité au liquide [$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$]
k_v	Perméabilité au vapeur [$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$]
k_p	Perméabilité au gaz [$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$]
k_w	Perméabilité totale [kg/mol]
M	Masse molaire [Pa]
R	Constante de gaz parfait [—]
S_l	Degré de saturation d'eau [K]
g	vecteur gravitationnel [m^2/s]
T	température [K]
a	diffusivité thermique [m^2/s]
b	effusivité thermique [$W\sqrt{s}/m^2 K$]
$S_{spé}$	surface spécifique [m^2/m^3]
k	Perméabilité [m^2]
P	Pression [Pa]
h	coefficient de transfert thermique convectif [$W/m^2 K$]

L	Longueur [m]
V	volume [m^3]
m	masse [kg]

Symboles Grec

ρ	masse volumique [kg/m^3]
μ	viscosité dynamique [$Pa.s$]
ν	viscosité cinématique [m^2/s]
λ	conductivité thermique [$W/m.K$]
ϕ	flux thermique [W]
w	teneur en eau [kg/kg]

Indices

eq	équivalent
i, j	indices des points discrétisés
r	relative $\left[\frac{grandeursolide}{grandeur fluide} \right]$
e	Epaisseur
x	Position sur l'axe
ext	extérieur
int	intérieur
ini	initiale

Table des matières

I. Introduction Générale	17
II. Chapitre 1: Etat de l'art: Matériaux pour la construction et la performance énergétique.....	22
1. Introduction	2
2. Historique et chiffres dans le secteur résidentiel.....	23
2.1. Chiffres des consommations et des dépenses énergétiques.....	23
2.1. Déperditions causées par l'enveloppe.....	27
3. Enjeux de la construction des maisons passives	28
3.1. Défi énergétique dans l'habitat	28
3.2. Réglementations thermiques et labels énergétiques en France	28
3.3. Labels européens	31
4. Matériaux de construction: usage et composition	32
4.1. Catégories de matériaux	32
4.2. Les composites biosourcés	33
4.2.1. Formulation des composites biosourcés	33
4.2.2. Composites biosourcés de construction.....	35
4.2.3. Filière chaux-chanvre	41
5. Propriétés hygroscopiques et phénomènes de transfert de chaleur et d'humidité	43
5.1. Propriétés hygroscopiques.....	43
5.1.1. Humidité relative	43
5.1.2. Teneur en eau	43
5.1.3 Pression partielle de vapeur.....	44
5.1.4. Pression de saturation.....	44
5.1.5. Isothermes de sorption.....	45
5.1.6. Phénomènes d'hystérésis	48
5.2. Analyse phénoménologique des transferts de chaleur et d'humidité dans les matériaux hygroscopiques.....	49
5.2.1. Milieu poreux	49
5.2.3. Mécanismes de diffusion d'humidité dans un milieu poreux	50
5.2.4. Mécanismes de transfert de chaleur dans un milieu poreux.....	51
6. Propriétés thermohydriques.....	51
6.1. Conductivité thermique	51
6.1.1. Milieu homogène et milieu hétérogène	51

▪ Milieu homogène.....	51
▪ Milieu hétérogène.....	52
6.1.2. Modèles de prédiction de conductivité thermique:.....	53
6.2. Conductivité hydraulique	60
6.2.1. Coefficient de conductivité hydraulique.....	60
6.2.2. Modèles de prédiction de perméabilité au gaz	61
7. Conclusion.....	64
III. Chapitre 2: Formulations mathématiques des phénomènes des transferts couplés de chaleur, air et humidité au sein des matériaux hygroscopiques.	66
1. Introduction	67
2. Analyse et compréhension des phénomènes des transferts couplés.....	67
2.1. Combinaison des physiques	67
2.2. Aspects multi échelles	68
3. Modélisation des transferts hygrothermiques	70
3.1 Modèles existants	70
3.2 Cas d'étude.....	73
3.3.Équations de bilan	74
3.3.1 Equations de bilan massique	74
3.3.2. Transfert de chaleur.....	76
3.3.3. Modèle résultant	77
3.3.4. Conditions initiales et conditions aux limites.....	78
3.4. Résolution numérique.....	79
3.4.1 Méthodes des éléments finis.....	79
3.4.2 Evaluation du modèle en 1D et 2D.....	80
3.5. Etude de sensibilité du modèle	85
3.5.1. Influence des différents paramètres.....	86
3.5.2. Influence de couplage.....	88
4. Conclusion.....	89
IV. Chapitre 3: Etude de faisabilité et de développement d'une filière des éco matériaux dans un contexte transfrontalier	91
1. Introduction	92
2. Projet ECOTRANSFAIRE.....	92
2.1. Présentation et localisation du projet.....	92
2.2. Grande Région.....	93

2.3. Enjeux et objectifs:	94
2.3.1. Mobilisation.....	94
2.3.2.Construction durable	94
3. Etudes des matériaux disponibles et en cours de développement sur la Grande Région....	96
3.1. Les éco-matériaux	96
3.2.Méthodologie d'analyse.....	96
3.4. Résultats: Produits pouvant potentiellement être développés sur un marché local (Grande Région).....	98
4. Etude hygrothermique	98
4.1. Classification et catégories des matériaux d'étude	98
4.2. Valeur du tampon hydrique (MBV)	99
4.3. Protocole expérimental.....	100
4.5. Résultats et discussions	103
5.Conclusion.....	105
V. Chapitre 4 : Caractérisation et prédiction par voie numérique des propriétés équivalentes d'un matériau bois-ciment.....	106
1. Introduction:	107
2.Techniques d'imagerie.....	107
2.1.Technique de micro-tomographie.....	108
2.2.Reconstruction tridimensionnelle.....	109
4. Modélisation.....	110
4.1. Modélisation à l'échelle macroscopique.....	111
4.1.1. Théories des milieux poreux	111
4.2.2. Méthode de prise de moyenne.....	111
4.3.Présentation du modèle	114
4.4. Conditions aux limites :	117
4.5. Discrétisation par la méthode des volumes finis :	118
4.3. Schéma QUICK.....	119
4.4.Cas test de validation.....	119
5.Analyse numérique des composites hétérogènes	120
5.1. Matériau d'étude	120
5.2.Présentation des morphologies par micro-tomographie	121
5.1.1.Reconstruction en 3D	121
5.2.2.Composite bi-phasique: Air-Bois	122

5.2.3.Composite à trois phases: Air- Bois- Ciment	125
6. Analyse des champs de température	130
7. Analyse des propriétés équivalentes	132
7.1. Conductivité thermique	132
7.1.1.Méthode de fil à chaud	133
7.1.2.Méthodes numériques.....	135
7.1.3.Analyse de l'effet de ciment	136
7.2.Perméabilité au gaz	137
8. Conclusion.....	138
VI. Conclusions générales et Perspectives.....	139

Liste des Figures

Figure 1: Pollution de l'air à Paris (France).....	17
Figure 2: Utilisation considérable des systèmes de climatisation dans le secteur résidentiel.....	18
Figure I. 1: Consommation d'énergie dans le monde en Mtep (Million de tonnes équivalent pétrole)	23
Figure I. 2: Consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel et tertiaire en Mtep	24
Figure I. 3: Emissions de CO ₂ par secteur dans le monde	24
Figure I. 4: Carte de consommation d'électricité en KWH par habitant	26
Figure I. 5: Lignes de flux et isothermes au droit d'une ossature dans une paroi sandwich	27
Figure I. 6: Evolution des exigences réglementaires de consommation énergétique des bâtiments neufs en kWh _{ep} (kilowatt/heure d' énergie primaire)/(m ² an)	29
Figure I. 7: Evolution de l'épaisseur de l'isolant avec les réglementations thermiques.....	30
Figure I. 8: La source Bois	33
Figure I. 9: Principe de mise en œuvre d'un béton de chanvre par la technique de projection (Elfordy et al.).....	35
Figure I. 10: Eprouvette cellulose/grignon [Dahli et al.].....	37
Figure I. 11: Pression de vapeur saturante.....	45
Figure I. 13: Courbe comparative des isothermes pour différents matériaux.....	46
Figure I. 14: : Isothermes de sorption-désorption (DVS) de l'isolant de fibre en bois mesurées à 20°C	47
Figure I. 15: Isotherme de sorption désorption de béton cellulaire à 30°C	47
Figure I. 16: Classification des formes d'hystérésis [68].....	48
Figure I. 17: Milieu poreux et volume élémentaire représentatif (VER)	49
Figure I. 18: Mécanismes de diffusion de vapeur d'eau dans un milieu poreux.....	50
Figure I. 19: Conductivité thermique effective de différents matériaux	52
Figure I. 20: : Différents modèles de prédiction de conductivité thermique équivalents des matériaux multi constituants	53
Figure I. 21: Modèles de conductivité thermique équivalente: (a) en parallèle, (b) en série	54
Figure I. 22: Bornes de Voigt et Reuss pour le béton de chanvre [52].....	54
Figure I. 23: Evolution de la densité en fonction de la teneur en bois	56
Figure I. 24: Variation de la conductivité du composite en fonction de la fraction volumique de la phase dispersée (suivant Nielsen) [84]	58
Figure I. 25: Visualisation d'une laine de chanvre (vue en 3D) par acquisition des images tomographiques) [92]	60
Figure II. 1: Transfert de chaleur et étanchéité à l'air au sein d'une paroi	68
Figure II. 2: Structure d'un milieu poreux	73
Figure II. 3: Configuration de cas d'étude en (2D).....	73
Figure II. 4: Distributions de température à la surface du matériau pour des différents temps.....	81
Figure II. 5: Variation de teneur en eau au centre du matériau	82
Figure II. 6: Variation de température au centre du matériau	82
Figure II. 7: Variation de teneur en eau à la surface du matériau.....	82
Figure II. 8: Variation de température à la surface du matériau.....	82
Figure II. 9: Variation de teneur en eau au centre du matériau	83
Figure II. 10: Variation de température au centre du matériau	83

Dans ces conditions, les variations de température et de teneur en eau sur la position verticale (hauteur du matériau) sont présentées sur les figures (II. 13)et (II. 14), respectivement.	84
Figure II. 13: Variation des profils de température sur la verticale (y)	85
Figure II. 14: Variation des profils de teneur en eau sur la verticale (y)	85
Figure II. 15: Evolution de température en $x=0.012m$	86
Figure II. 16: Evolution de teneur en eau en $x=0.012m$	86
Figure II. 17: Evolution de température en $x=0.012m$	87
Figure II. 18: Evolution de teneur en eau en $x=0.012m$	87
Figure II. 19: Evolution de température en $x=0.012m$ pour des paramètres constantes et variables ...	87
Figure II. 20: Evolution de teneur en eau en $x=0.012m$ pour des paramètres constantes et variables .	87
Figure II. 21: Sensibilité de température au couplage du modèle	89
Figure II. 22: Sensibilité de teneur en eau au couplage du modèle	89
Figure III. 1: Carte géographique concernée par le projet ECO TRANSFAIRE	92
Figure III. 2: Cartes des partenaires universitaires transfrontalières	93
Figure III. 3: Les trois piliers du développement durable	94
Figure III. 4: Cycle de vie idéale d'un matériau de construction	95
Figure III. 5: Résultats de l'enquête	97
Figure III. 6: Classification des valeurs tampon hydrique (MBV) selon le Project Nordtest	100
Figure III. 7: . Chambre climatique contrôlée en température et en humidité relative.....	101
Figure III. 8 : Échantillons de la liste des panneaux de bois	102
Figure III. 9: : Échantillons de la liste des matériaux fibreux	102
Figure III. 10: Valeurs des tampon hydriques de différents matériaux de la liste des panneaux de bois et du composite bois-ciment.....	103
Figure III. 11: Valeurs des tampon hydriques de différents matériaux de la liste des matériaux fibreux et du composite bois-ciment.....	104
Figure IV. 1: Le tomographe NSI (X50+) et son environnement	108
Figure IV. 2: Principe de fonctionnement de l'acquisition des données en 3D	109
Figure IV. 3: Méthodologie d'étude d'une structure en 3D	110
Figure IV. 4 Composition microscopique d'un composite poreux hétérogène.....	111
Figure IV. 5: Représentation de problème physique	117
Figure IV. 6: Volume élémentaire de contrôle	118
Figure IV. 7: Comparaison des résultats du modèle présent avec des approches analytiques et numériques	119
Figure IV. 8: Matériau d'étude: composite bois-ciment	120
Figure IV. 9: Structure tridimensionnelle numérisée	121
Figure IV. 10: Structure numérisée en Imorph®.....	122
Figure IV. 11: Représentation morphologique du milieu bi phasique (Air-Bois).....	123
Figure IV. 12: Morphologies du matériau bois pour différents cas de porosité	123
Figure IV. 13: Variation de la conductivité thermique équivalente du matériau en fonction de porosité et du rapport de conductivité thermique	124
Figure IV. 14: Variation de la conductivité thermique équivalente en fonction de porosité.....	124
Figure IV. 15: Variation de la conductivité thermique équivalente en fonction de niveau du seuillage	124
Figure IV. 16: Représentation en 3D du milieu tri phasique (Air-Bois-Ciment)	125
Figure IV. 17: Evolution de la structure en fonction des pourcentages de ciment.....	127
Figure IV. 18: Distribution porosimétrique dans le matériau.....	128
Figure IV. 19: Distribution granulométrique du matériau.....	129

Figure IV. 20: Schéma illustrant la définition de la tortuosité : $\tau = L' / L$	130
Figure IV. 21: Champs de température dans la structure poreuse.....	131
Figure IV. 22: Profil de température sur la ligne médiane X pour différents cas des rapports de conductivité thermique	132
Figure IV. 23: Méthode du fil à chaud	133
Figure IV. 24: Variation de conductivité thermique équivalente en fonction des pourcentages de ciment dans le mélange et la porosité de matériau	136
Figure IV. 25: Différents valeurs pour Darcy	137
Figure IV. 26: Variation de perméabilité en fonction de la porosité et en comparaison avec le modèle de Kozney-Carman.....	138

Liste des Tableaux

Tableau I. 1: Labels HPE et THPE.....	31
Tableau I. 2: Composition et densité des échantillons ciment-liège à l'état sec (Chadi et al.)	36
Tableau I. 3: Différents modèles de prédiction de coefficient de perméabilité.....	63
Tableau II. 1: Les conditions initiales de séchage de bois.....	78
Tableau II. 2: Conditions initiales et aux limites d'ambiance climatique.....	79
Tableau III. 1: Notes d'évaluation des matériaux analysés.....	97
Tableau III. 2: Classification des matériaux d'étude	99
Tableau III. 3: Cycle MBV.....	102
Tableau IV. 1: Description des phases présentes selon les niveaux de gris dans la structure	122
Tableau IV. 2: Répartition des phases présentes selon les niveaux de gris.....	126
Tableau IV. 3: Proportion volumique de différentes phases dans la structure	126
Tableau IV. 4: Macroporosité selon l'analyse de l'Imorph.....	128
Tableau IV. 5: Classement des granulats de bois selon la norme FR EN ISO 17225-2:2004.....	129
Tableau IV. 6: Paramètres des essais : Sonde fil chaud	134
Tableau IV. 7 :Conductivité thermique équivalente par la méthode expérimentale	134

Introduction Générale

La crise énergétique récurrente connue sous le nom de "Pic Hubbert"¹ est un exemple révélateur de l'épuisement des énergies fossiles. De ce fait, la communauté internationale prend de plus en plus de conscience de cette réalité couplée à un impact non réversible sur l'environnement. Cette prise de conscience se manifeste notamment par des différents sommets mondiaux sur la question énergétique et l'empreinte de dioxyde de carbone, citant par exemple la COP21² qui a été parmi les grandes manifestations internationales sur cette problématique.



Figure 1: Pollution de l'air à Paris (France)

Dans le secteur résidentiel, les dépenses au chauffage et à la climatisation sont généralisés presque un peu partout dans le monde. En effet, l'évolution des modes de vie a entraîné une dépense énergétique croissante due à l'augmentation du nombre des pièces chauffées, de la durée de la période de chauffe et du niveau de température. Ainsi le besoin énergétique des bâtiments ne cesse d'augmenter. La réduction de gaz brûlés, de suie et de poussière par des économies d'énergie correspond à une contribution directe à la protection de l'environnement.

¹ *Le Pic de Hubbert*, traduit un état d'incertitude entre les premières découvertes de pétrole et l'épuisement complet de la ressource, qui a été prédit par le géologue américain King Hubbert en 1956.

² *Conférences des Nations unies sur les changements climatiques (Conférences des Parties)*



Figure 2: Utilisation considérable des systèmes de climatisation dans le secteur résidentiel

La recherche des solutions alternatives est plus que jamais à l'ordre du jour et fait émerger des stratégies de transition des énergies fossiles aux énergies dites renouvelables. Chaque pays puisant dans son potentiel et ses capacités géographiques à les transformer en énergie utile. L'objectif ultime étant d'assurer un confort thermique. Cette notion qui réfère à la fracture énergétique est également liée à la nature des matériaux constituant l'enveloppe des bâtiments. Ainsi la tendance d'utilisation des éco matériaux plus fidèles à l'environnement est devenue une vraie politique écologique suivie pour un gain énergétique et un confort thermique pour l'habitat.

Par conséquent, ce couplage efficacité énergétique-matériaux performants trouve de plus en plus d'importantes applications dans le secteur du bâtiment. En effet, le parc immobilier neuf ou en rénovation est demandeur de matériaux. L'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments profite de l'amélioration de l'ensemble de circuit de la matière première jusqu'à la mise en œuvre dans l'enveloppe. C'est ainsi que la problématique de prédiction des champs de température et d'humidité au sein des matériaux poreux de construction est posée. En particulier, la compréhension des phénomènes des transferts hygrothermiques par voie d'expérimentation et modélisation permet un gain substantiel dans cette chaîne.

Dans les régions froides, la nécessité de maintenir la chaleur au cœur de la maison a amené à chercher les matériaux les plus pertinents pouvant limiter le maximum de surfaces de contact

de l'enveloppe avec son climat extérieur. Dans ce cadre une méthodologie et un processus d'analyse dans le but d'identifier une filière des matériaux dans la Grande Région qui est un tri point délimitant les frontières entre la Belgique, la France et le Grand-duché de Luxembourg ont été suivis. C'est ainsi un projet INTERREG³ appelé Ecotransfaire⁴ a été intégré dans ce travail. Il s'agit d'un exemple de démarche conjointe menée dans trois pays transfrontaliers, qui fait travailler en commun des artisans, des socio économistes et des chercheurs pour proposer des solutions pratiques et respectueuses à l'environnement. Ainsi différentes catégories des matériaux ont été examinées selon divers critères pour être proposé comme solution d'efficacité énergétique du bâtiment dans le contexte transfrontalier. L'analyse de ces catégories des matériaux nous a conduit à constater la nécessité de l'écologie dans les matériaux sélectionnés qui s'adaptent et rependent à la fois aux réglementations européennes et aux conditions météorologiques.

Ainsi, dans ce travail, nous essayons de répondre à une variété de sujets d'efficacité énergétique de l'habitat par des solutions écologiques pour réaliser une enveloppe du bâtiment économe en énergie. Le gisement des composites en bois et des panneaux issus de la biomasse a été présent dans le résultat des matériaux sélectionnés pour une filière durable. Cependant la fabrication et la composition de ce type des panneaux peut varier d'un produit à un autre et d'une industrie à une autre. De ce fait, en outre, les panneaux compressés classiques de construction, une nouvelle catégorie de ces panneaux est apparue . Il s'agit des panneaux un peu plus complexes dans leurs structures et dans leurs compositions et qui font ainsi un mélange hétérogène des liants minéraux avec des particules végétales.

Dans notre cas, nous nous intéressons à l'un de ces types des panneaux. Il s'agit d'un panneau composite, constitué d'un mélange de copeaux de bois, du ciment, du verre soluble et de l'eau. Ce matériau se présente comme un bio-composite poreux dont plusieurs mécanismes hygrothermiques se manifestent. L'objectif étant de déterminer les propriétés thermiques et hydriques équivalentes (conductivité, diffusivité, perméabilité à la vapeur) dans une structure poreuse multi constituants.

Ainsi, le travail de ce manuscrit peut être décrit autour de quatre chapitres:

³ *Un programme européen qui favorise les coopérations entre les régions européennes transfrontalières dans le but de développement de solutions communes dans les domaines du urbain, rural et côtier, du développement économique et de la gestion de l'environnement.*

⁴ *Un projet européen qui fait la coopération transfrontalier en Éco-rénovation et Éco-construction.*

Le premier chapitre décrit un état de l'art sur les éco matériaux et les phénomènes des transferts hygrothermiques au sein des composites biosourcés. Il met en évidence, leurs propriétés thermo physiques ainsi la complexité de leurs structures hétérogènes. Dans ce chapitre, nous abordons également les différents modèles dédiés à la prédiction des propriétés thermo physiques équivalentes pour le cas des matériaux composites ayant une composition hétérogène.

Le deuxième chapitre décrit une méthodologie de modélisation et de simulation numérique des phénomènes des transferts couplés de chaleur et de masse au sein d'un matériau de bois massif. Une synthèse bibliographique sur les différentes familles de modèles de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux existants est détaillée, en premier lieu. Ensuite, un modèle des transferts de chaleur, d'air et de masse (HAM), à l'échelle du matériau, appliqué sur un matériau en bois massif est proposé. La résolution numérique de ce modèle est validée par des résultats analytiques proposés dans la littérature. L'étude de sensibilité du modèle au couplage, aux dimensions dans l'espace, aux conditions aux limites et aux variabilités des paramètres d'entrée est également présentée.

Le troisième chapitre traite un exemple d'analyse de mise en œuvre d'un couplage entre la science pour l'ingénieur et les sciences socio-économiques. En effet, ce travail a eu la chance d'interagir avec un projet transfrontalier de type Interreg. Le projet a démarré sur la base d'un constat simple de nature socio-économique car d'une part, une importante demande d'éco-rénovation sur un territoire transfrontalier (Be, Fr, Lu) et motivée par une facture énergétique de plus en plus pesante dans un contexte de crise. D'autre part, un gisement important de biomasse et de matériaux locaux est identifié. Le projet opère dans un circuit court (d'un rayon de 30Km en moyenne) abritant trois campus universitaires (ULG, LIST, IUT)⁵. En particulier, les universitaires ont été sollicités pour deux types d'étude: l'harmonisation de la réglementation thermiques sur le paysage transfrontalier considéré et la définition des critères scientifiques pour la sélection d'éco matériaux. L'analyse de ces types de matériaux nous a conduit à identifier huit matériaux candidats, dans cette filière. Ainsi une évaluation de leurs réponses thermohydrauliques par le test expérimental MBV a été effectuée. Le présent chapitre, présente le résultat de cette analyse et conclut vers une méthodologie applicable à d'autres contextes transfrontaliers.

⁵ Université de Liège (Campus Arlon), Luxembourg Institute of Science and Technology, Institut universitaire de technologie de Longwy

Le quatrième chapitre a pour objectif principal de contribuer à la caractérisation des matériaux de construction bio composites. Il s'agit en particulier d'étudier la microstructure d'un composite cimentaire qui fait le mélange des copeaux de bois avec le liant ciment. Ainsi la composition de sa structure hétérogène a été traitée. En effet cette composition hétérogène bi constituants influe sur la formulation de sa microstructure et par conséquent sur ses propriétés de transfert qui déterminent sa résistance thermique et sa durabilité. Plus précisément, cette partie consiste à déterminer les propriétés de diffusion thermique et hydrique équivalentes de ce type de matériau à travers la combinaison de l'expérience par l'outil de micro-tomographie et de la modélisation en 3D.

Le manuscrit finit, par des conclusions générales qui résument toute l'étude et sa performance vis à vis à la recherche, ainsi quelques perspectives sont envisagées pour des prochains futurs travaux.

Chapitre 1

Etat de L'art :

***Matériaux pour la Construction et la
Performance Energétique***

1. Introduction

Ce chapitre constitue une synthèse bibliographique sur les matériaux de construction de nature hygroscopique et sur les différents phénomènes des transferts hygrothermiques qui peuvent se produire au sein de ces matériaux. Il met en évidence leurs propriétés thermophysiques et la complexité de leurs structures hétérogènes et composites. Nous abordons également, dans ce chapitre, les défis et les enjeux énergétiques dans le secteur du bâtiment ainsi que les différentes réglementations thermiques...

2. Historique et chiffres dans le secteur résidentiel

2.1. Chiffres des consommations et des dépenses énergétiques

L'événement politique et industriel que l'on désigne usuellement sous le nom "choc pétrolier" des années 1973 et 1974 a conduit plusieurs pays dans le monde à développer, dès les années 1980, des moyens et des techniques pour créer des alternatives aux énergies fossiles. Ces dépenses en énergie varient d'un pays à un autre (**Figure I. 1**)

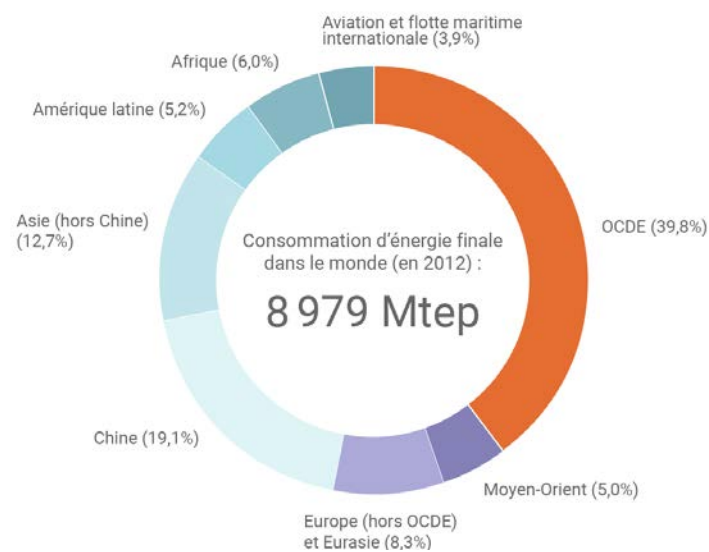
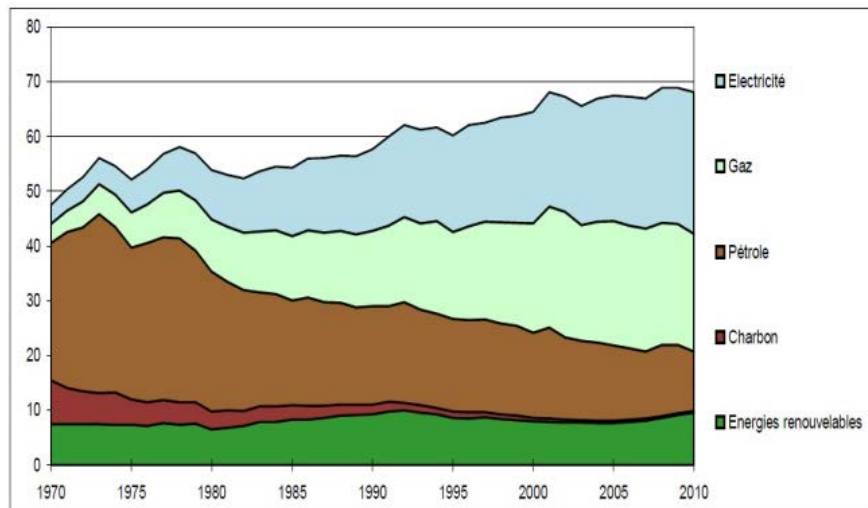


Figure I. 2: Consommation d'énergie dans le monde en Mtep (Million de tonnes équivalent pétrole)

Cette révolution a touché en premier lieu les secteurs les plus énergivores, dont le secteur du bâtiment. En effet, ce secteur est aujourd'hui responsable de 30% des émissions de gaz à effet de serre (GES) avec un usage de plus de 40% de l'énergie de et plus de 50% des matières premières produites au monde.



Source : SOeS, bilan de l'énergie 2010

Figure I. 3: Consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel et tertiaire en Mtep

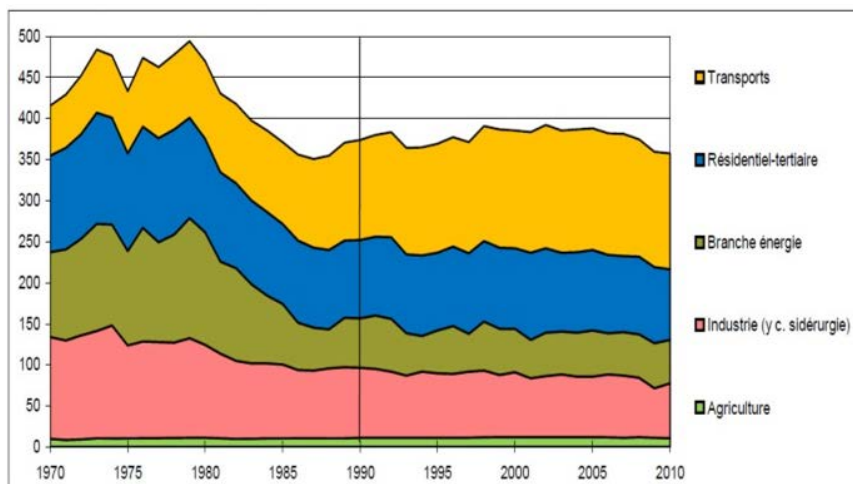


Figure I. 4: Emissions de CO2 par secteur dans le monde

De plus, dans le secteur résidentiel, les besoins de chauffage et/ou de climatisation sont de plus en plus importants dans le monde. Néanmoins ces besoins varient d'un pays à un autre en fonction du climat, de l'emplacement géographique ainsi que des gisements énergétiques disponibles. Selon une étude approfondie sur la consommation d'énergie dans le monde réalisée par Marcel Lacroix [1], plus de trois milliards de personnes provenant de près de 60 pays consomment moins de 50kWh d'énergie primaire par personne et par jour. Parmi celles-ci, plus de deux milliards, provenant entre autres de l'Inde et du Pakistan, consomment moins de 20kWh par Personne et par jour, une quantité d'énergie à peine suffisante pour alimenter quotidiennement les appareils ménagers et électroniques d'un citoyen Canadien. En effet, le

Canada représente environ 0,5 % de la population mondiale, mais il est à l'origine d'au moins 2,5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES). Sa proportion d'émissions de dioxyde de carbone par habitant est la troisième au monde après les États-Unis et l'Australie [2]. Les principales sources de ces émissions sont le secteur industriel, le transport routier et le chauffage des locaux. Ce dernier représente près de 29 % des émissions de CO₂ par habitant. Concernant les sources d'énergie utilisées pour le chauffage, elles sont à la base de l'électricité et du mazout. En second lieu, viennent les sources plus modestes comme le bois, la bioénergie et les systèmes solaires.

Par ailleurs, le développement des systèmes à cycles combinés chauffage et production d'électricité est un atout significatif du savoir-faire et de la culture industrielle des pays connus par un climat froid. En effet, dans ces climats, le chauffage domine la consommation d'énergie résidentielle. Pour cette cause, les pays scandinaves, riches en ressources forestières, et exposés aux grands froids énergivores restent des vrais consommateurs d'énergie. Par exemple au Suède la consommation d'énergie primaire est de 159.31 kWh par habitant en 2012, dont une grande proportion est dédiée au secteur résidentiel. Cette consommation le met en deuxième rang des secteurs les plus consommateurs d'électricité. Ceci est lié à l'élévation des consommations des bâtiments en termes d'éclairage, de ventilation, des équipements électroniques et aussi en grande partie à la croissance du chauffage électrique dans les logements individuels. Cette augmentation s'est ralentie ces dernières années, grâce à l'usage des applications de l'intelligence technique qui font partie de ce que l'on appelle bioénergies. Cependant, au niveau des émissions de gaz à effet de serre, la Suède, tout comme le Danemark, affichent un bilan assez réduit par rapport à la moyenne européenne. En effet, ces pays font figure de modèles pour les pays européens dans les domaines tenant à la gestion de la biomasse, et à la mise en valeur par le biais de la valorisation énergétique des déchets et des rejets produits par les industries, par l'utilisation rationnelle de nouvelles technologies comme les lits fluidisés, la gazéification, prolongements des pratiques ancestrales de chauffage domestique.

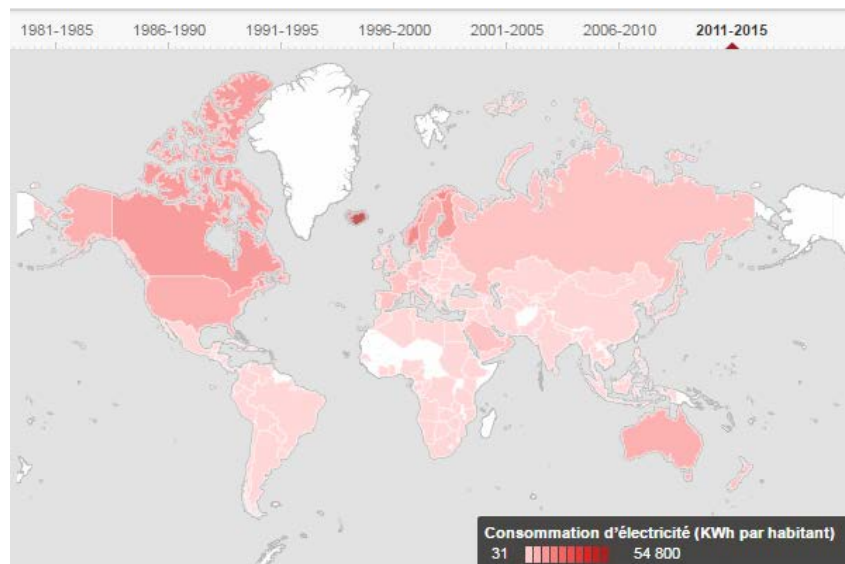


Figure I. 5: Carte de consommation d'électricité en KWh par habitant

Le pourtour méditerranéen couvrant les pays de Sud et de l'Est ne fait pas exception. Ces pays ayant un climat chaud et qui possèdent des réserves d'énergies renouvelables assez importantes, en particulier venant du soleil, le secteur du bâtiment demeure aussi parmi les secteurs les plus énergivores. Cela est dû au développement démographique et à l'urbanisation. En effet, le rythme de croissance démographique, dans ces pays, est cinq fois plus élevé que dans les pays du Nord. Ce qui implique une augmentation considérable au niveau des demandes de logements et ce qu'il succède de consommation des énergies dans ce domaine. Néanmoins, malgré l'importance du gisement des énergies renouvelables disponibles dans ce territoire, les énergies fossiles couvriraient encore 87 % des consommations énergétiques, avec 40 % pour le pétrole. Les pays exportateurs d'énergie tels que l'Algérie voient leur capacité d'exportation réduite pour faire face à leur demande interne. Quant aux pays importateurs d'énergie comme la Tunisie ou le Maroc leur dépendance énergétique ne cesse d'augmenter [3]. Ces pays se trouvant en face à ce défi énergétique prennent de plus en plus conscience en cherchant à développer des outils d'optimisation et d'adaptation de leur consommation énergétique. face à ces préoccupations, de nouvelles réglementations ont été imposées dans le but de réduire la facture énergétique. Bien que les résultats restent modestes dans certains pays, la situation s'est un peu améliorée dans d'autres pays. La Tunisie est ainsi le seul pays de la zone Sud/Est de la Méditerranée à avoir enregistré une baisse moyenne de sa consommation énergétique de 1 % [4].

Contrairement au pays précités, la consommation des bâtiments en Chine est nettement moins importante devant la consommation du secteur industriel. En effet, l'énergie

consommée dans les secteurs bâtiment, transports et services représente seulement la moitié de l'énergie consommée par l'industrie chinoise. Cependant, depuis quelques années, les consommations finales urbaines ont marqué une croissance de plus en plus élevée au côté du secteur secondaire.

2.1. Déperditions causées par l'enveloppe

L'augmentation de l'efficacité énergétique d'une construction et la réduction de ses émissions polluantes s'appuient non seulement sur la performance des systèmes de chauffage, de climatisation ou de ventilation et l'intégration des ressources renouvelables à travers ces systèmes mais également sur le type et les propriétés des matériaux de construction. En effet, la protection de l'enveloppe des fatales déperditions énergétiques par le maintien d'une construction étanche et isolée a un retour non négligeable sur la consommation et sur la facture finale. En effet, les performances thermiques dépendent de l'isolation de l'enveloppe, des pertes causées par des ponts thermiques, de la résistance et de la durabilité des matériaux mises en construction.

Par définition un pont thermique est une partie de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique est sensiblement réduite par une absence ou une dégradation locale de l'isolation et donne lieu ainsi à d'importantes fuites de chaleur vers l'extérieur. En effet, au sein d'une paroi isolée comportant des liaisons moins isolantes, les lignes de flux ne sont plus perpendiculaires aux surfaces extérieures. Ces surfaces ne sont pas des isothermes au droit des ossatures ou des liaisons (Figure I.5)[6].

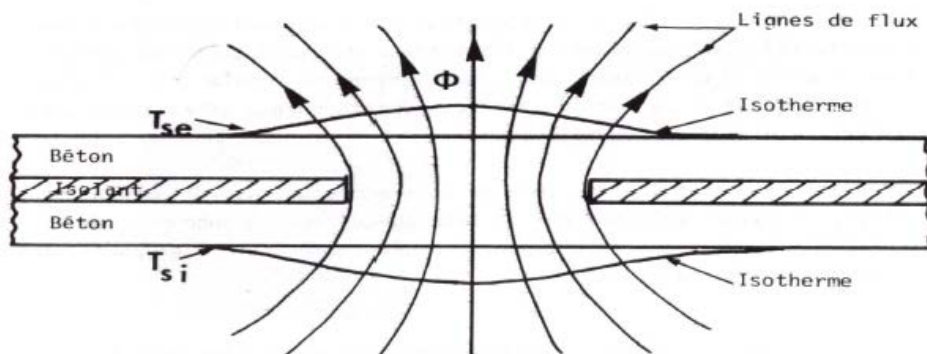


Figure I. 6: Lignes de flux et isothermes au droit d'une ossature dans une paroi sandwich

Le flux de chaleur ayant toujours tendance à emprunter le chemin de moindre résistance thermique. On trouve donc les ponts thermiques en général, là où l'enveloppe n'est pas

unidirectionnelle (coins de mur, abouts de dalles ou de refends, encadrements de baies, éléments d'accrochage et de fixation...)

Ils sont considérés comme des véritables « trous » à travers l'isolation de l'enveloppe et sont souvent responsables de 10 à 40% de fuite de chaleur supplémentaire vers l'extérieur [5].

Cet impact dépend de la géométrie du bâtiment (forme, volume) du système constructif (béton, parpaing, ossature légère...) ainsi que du niveau et du type d'isolation pratiqué (par l'intérieur, par l'extérieur, répartie...).

3. Enjeux de la construction des maisons passives

3.1. Défi énergétique dans l'habitat

En France, le secteur du bâtiment est responsable d'une émission annuelle de 123 millions de tonnes de CO₂, soit 23% des émissions françaises. Il représente par ailleurs 43% de la consommation énergétique totale [7]. Devant ces énormes chiffres, le Grenelle de l'environnement (fondé en France en 2007) a fixé trois objectifs majeurs d'ici 2020:

- Améliorer de 20% l'efficacité énergétique et réduire la consommation à 38%,
- Réduire d'au moins 20% les émissions de gaz à effet de serre,
- Porter à 23% la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale.

Afin d'atteindre ces objectifs, il était recommandé de diminuer les demandes et les besoins en consommation, en favorisant l'utilisation des techniques plus performantes vis à vis au terme d'efficacité énergétique (isolation, ventilation, matériaux de constructions, intégration des matériaux à changement de phase (MCP)...) tout en encourageant les citoyens de favoriser au plus possible des comportements et des solutions économes en énergie (ne faire fonctionner les appareils électriques que pour un besoin, utiliser des appareils électriques économes en énergie, limiter le chauffage...). Ainsi des labels et des réglementations ont été imposés dans ce sens afin de traduire les encouragements en des obligations à lesquelles les citoyens et les utilisateurs doivent les intégrer dans leurs logements.

3.2. Réglementations thermiques et labels énergétiques en France

3.2.1. Réglementations thermiques

La première réglementation thermique (RT) en France, date de 1974. Elle a été adoptée à la suite du premier choc pétrolier. Puis elle a peu évolué pendant près de 30 ans (**Figure I. 7**). Elle constitue le référentiel qui fixe une limite supérieure à la consommation énergétique des

bâtiments neufs pour le chauffage, la ventilation, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage.

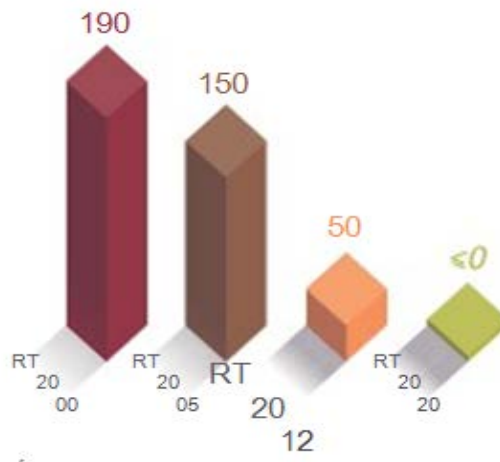


Figure I. 8: Evolution des exigences réglementaires de consommation énergétique des bâtiments neufs en kWh_{ep} (kilowatt/heure d' énergie primaire)/(m².an)

Ainsi la RT et ses éditions font à chaque fois le label représentatif au niveau de consommation conventionnelle en énergie. La plus récente est celle de 2012. Ainsi, depuis le 1er janvier 2013, tous les bâtiments neufs doivent répondre aux exigences de la RT 2012. Elle impose de limiter la consommation d'énergie primaire des logements à 50 kWh/m².an en moyenne grâce à une conception bioclimatique avec des équipements énergétiquement performants.

La réglementation thermique RT2012 qui transpose la directive de la Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) en droit national exige principalement le respect de trois conditions fondamentales :

- o Conception performante ;
- o Consommation énergétique maîtrisée ;
- o Confort d'été.

Ces conditions sont contrôlées par trois indicateurs qui doivent être respectés afin d'être conforme à la RT2012 :

1. **Bbiomax** : le besoin bioclimatique qui indique si la conception climatique du bâtiment est adaptée.
2. **Cep max** : coefficient de consommation, c'est l'indicateur de la consommation d'énergie primaire qui varie, entre autres, selon les régions.

3. **TIC** : il indique la température interne de confort à ne pas dépasser à l'intérieur d'un bâtiment en période estivale.

En plus de ces trois exigences, la réglementation fixe des exigences de moyens qui sont plutôt liés à la qualité et l'étanchéité de l'air intérieure et au confort thermique dans l'habitat qui dépendent fortement de nature et des propriétés thermo physiques des matériaux de construction. En effet, les différentes réglementations thermiques obligent les constructeurs à poser une isolation avec des matériaux plus performants. Afin de répondre aux différentes contraintes en utilisant les isolants classiques, la seule solution est d'augmenter leur épaisseur afin d'atteindre les performances exigées (**Figure I.7**) [8]. Néanmoins, cette solution n'est pas durable car l'augmentation de l'épaisseur entraîne une réduction de l'espace habitable, d'où un surcoût pour l'utilisateur final.

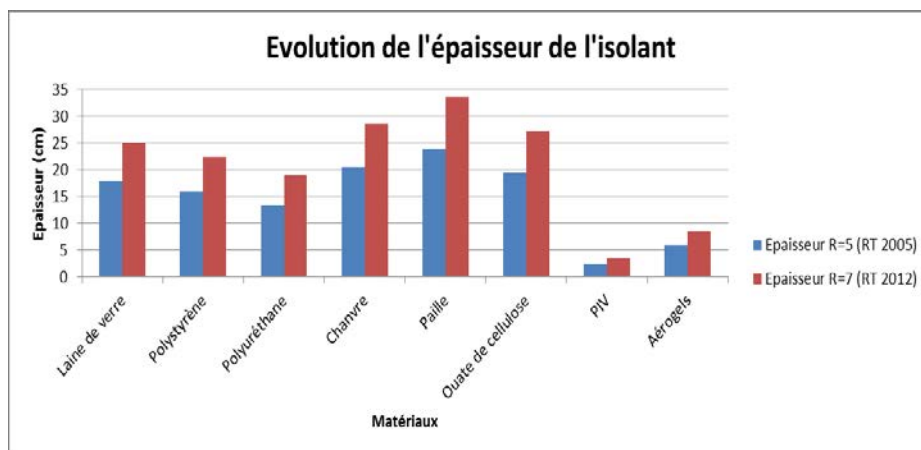


Figure I. 9: Evolution de l'épaisseur de l'isolant avec les réglementations thermiques

Par conséquent, de nouveaux matériaux sont apparus comme une alternative de plus en plus compétitive par rapport aux isolants classiques.

3.2.2.Labels énergétiques

3.2.2.1.Label BBC Effinergie+

Le label BBC Effinergie+ a pour objectif de dépasser les exigences réglementaires en fixant des niveaux d'exigences de 20% plus performantes que celles de la RT 2012. D'une manière générale, les niveaux d'exigences des labels BBC préfigurent des prochaines évolutions de la réglementation thermique française. Ainsi, répondre aux exigences de ce label permet d'anticiper la réglementation future (RT 2020).

3.2.2.2.Labels HPE et THPE

Les principes du label « haute performance énergétique » et du label « très haute performance énergétique » sont reconduits dans le cadre de l'application de la RT2012. Leurs utilisations permettent le développement des systèmes et des techniques de construction performants, dans la perspective des futurs renforcements de la réglementation à l'horizon 2020. Les exigences du label sont présentées dans le tableau suivant :

Indicateur	HPE	THPE
Bbio max	Bbio max RT – 10%	Bbio max RT – 20%
Cep max	Cep max RT – 10%	Cep max RT – 20%

Tableau I. 1: Labels HPE et THPE

3.3.Labels européens

La sensibilisation à l'économie dans le secteur habitat, par des labels et des réglementations est un défi international pour lutter contre la consommation énergétique accrue et les rejets de gaz polluants.

A l'échelle européenne, l'Allemagne et la Suisse figurent parmi les pays leaders dans le contexte d'efficacité énergétique.

En effet, en Allemagne, les premières préoccupations en vue des performances énergétiques datent des années 1980. Ainsi, des labels et des exigences imposés sont respectés et appliqués pour tout type de logement.

La notion des bâtiments à très basse consommation énergétique a aussi existé dans ce pays sous un label nommé " Passivhaus" (Maison passive) [10]. Ces maisons doivent avoir des consommations du chauffage inférieures à 15 kWh/m²/an. Au niveau de l'enveloppe, ces maisons doivent associer des épaisseurs d'isolants allant de 30 à 40 cm avec des exigences de triple vitrage et d'une ventilation à double flux.

Quant à la Suisse, elle a vécu le même développement à la même époque que l'Allemagne, en 1990 par la mise en place du label "Minergie" qui traduit certaines exigences et réglementations pour les constructions neuves ou rénovées [11]. En effet, il exige une consommation inférieure ou égale à 38 kWh/m²/an pour le cas des bâtiments neufs et une consommation inférieure ou égale à 60 kWh/m²/an pour le cas des rénovations. Les exigences de renforcement d'isolation sont aussi imposées par ce label. Jusqu'à présent la Suisse a réussi de réaliser plus de 16000 bâtiments obéissant au label "Minergie". Cependant, ce label a été

encore renforcé par un deuxième nommé "Minergie-P" avec des exigences de performances de 30 kWh/m²/an pour les logements neufs ou rénovés.

4. Matériaux de construction: usage et composition

4.1.Catégories de matériaux

Au-delà de la classification classique utilisée par les architectes au vue des origines et sources (minérales, animales, végétales), les matériaux de construction peuvent être classés en deux grandes catégories: matériaux traditionnels à utilisation ancienne tels que les pierres, terre crue, bois et ses dérivées...etc. et matériaux modernes de type composites dont la structure peut être complexes (bétons ...etc.).

En effet, le béton est fait en général d'une combinaison de granulats de différents types. La formulation classique et la plus utilisée est celle faite de mélange entre granulats minéraux (ciment+sable+eau). Cette formulation est connue sous le nom béton seul. Ce type de composite a dominé le secteur de génie civil depuis plus de deux siècles en raison de sa bonne résistance, sa durabilité, son faible coût ainsi que sa variété d'applications dans la construction. Néanmoins, malgré ses qualités indéniables, son bilan en énergie grise et en ressource auxiliaire comme l'eau ont un impact non négligeable sur l'environnement. En outre, son efficacité énergétique d'usage (chauffage-climatisation) et ses performances thermomécaniques restent limitées.

Ainsi, dans certains cas, afin d'améliorer ses performances souvent mécaniques ou acoustiques, ce matériau est renforcé par de renforts métalliques. On le nomme souvent par le béton armé (par l'acier par exemple), qui permet d'augmenter les performances mécaniques et structurelles. Ce renforcement influe sur les propriétés thermiques notamment la conductivité thermique [12].

Récemment, une nouvelle génération de béton est réapparue, elle concerne les composites biosourcés, où des adjuvants de nature végétale sont rajoutés au mélange. Selon l'histoire, ces composites existaient dans la construction depuis plusieurs siècles. Ils ont vécu une quasi absence, durant le 20^{ème} siècle dans les pays industrialisés, période marquée par l'utilisation de produits minéraux et synthétiques issus de la chimie. Depuis, ils sont revenus en vogue. Ce retour est lié à une prise de conscience de la dégradation des ressources de notre planète, ainsi qu'à l'épuisement fatal de la ressource pétrolière. Et depuis cette réalisation, ces « matériaux biosourcés » connaissent des développements industriels intéressants autant dans le contexte énergétique que celui du confort thermique. Ces produits sont justement choisis au vu leur

renouvelabilité et leur faible impact en énergie grise. En effet, la substitution des granulats minéraux par des particules végétales permet d'améliorer les propriétés thermiques et hydriques pour maintenir une bonne isolation thermique et une régulation hydrique[13].

Plusieurs études ont été effectuées afin d'étudier les propriétés des bétons incluant des particules végétales. Pacheco-Torgal et Jalali [14,15] dans leurs études ont démontré que la substitutions des armatures en acier ou des fibres synthétiques par des fibres végétales dans la construction permet d'améliorer son bilan environnemental. Cependant, Ramakrishna et Sundararajan [16], ont montré que les performances des bétons renforcés par des fibres végétales dépendent de la nature des fibres et de leurs dimensions.

4.2. Les composites biosourcés

4.2.1. Formulation des composites biosourcés

4.2.1.1. Fibres et copeaux de bois

4.2.1.1.1. Matériau de la source à l'ouvrage

Dans la démarche de développement durable, le bois est devenu de plus en plus le matériau préféré pour plusieurs applications, vu sa dimension environnementale et sa disponibilité sur une grande partie de la planète. L'exploitation de cette biomasse peut aller de l'échelle de la molécule (applications en chimie et en cosmétique)[17] à l'échelle des plaques (applications aux ouvrages de construction).

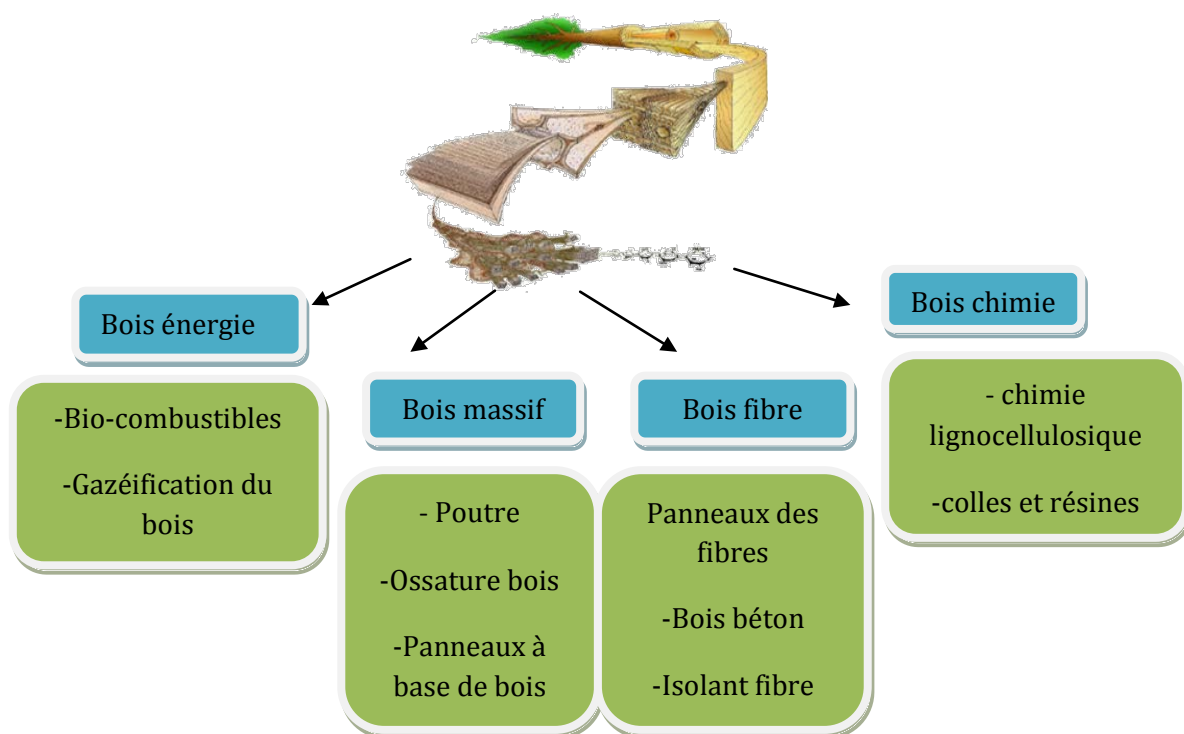


Figure I. 10: La source Bois

De plus, cette matière renouvelable peut être utilisée en énergie comme source de chauffage ou de carburant. Pour la construction, le bois trouve des applications diverses après son traitement par différentes voies de transformations. En effet, que ce soit en copeaux ou en fibres, de nouveaux produits peuvent être générés pour l'isolation ou pour la construction (panneaux de fibres de bois, panneaux OSB, panneaux ciment-bois...).

Ainsi les matériaux de construction issus de la biomasse, sont de plus en plus développés et commercialisés sur le marché des matériaux de génie civil. Ces agro-matériaux, grâce à leur caractère écologique, permettent d'améliorer le bilan environnemental de l'habitat et assurer le confort thermique intérieur.

4.2.1.1.2. Fibres végétales et leurs tendances

L'utilisation de fibres végétales comme éléments de renfort dans les matériaux composites (polymères, thermoplastiques, matériaux de construction...) en remplacement des fibres synthétiques est devenue un concept fréquemment utilisé pour plusieurs applications et dans plusieurs industries.

A l'heure actuelle, les fibres végétales représentent des dizaines de milliers de tonnes par rapport à deux millions de tonnes pour les fibres synthétiques, notamment les fibres de verre, qui renforcent les composites traditionnels[18].

Ainsi la filière des composites bois-polymères a été développée au départ en Amérique du Nord dont le marché a atteint environ un million de tonnes par an. En Europe, les ventes de ces composites représentent quelques dizaines de milliers de tonnes, notamment en France. Ce dernier qui a vécu un développement dans la production de ces bio composites. Parmi les diverses sources fibreuses cultivées dans les pays développés, le chanvre et le lin qui sont particulièrement caractérisées par d'excellentes propriétés mécaniques dues au caractère des fibres longues [19].

Certains pays comme le Brésil, le Mexique, la Tanzanie ou les Philippines ont lancé de vastes programmes de recherche sur les fibres naturelles telles que le coton, le chanvre, le kapok, le lin, la feuille d'ananas, le bambou, la canne à sucre et les fibres de noix de coco[19].

4.2.1.2. Granulats minéraux

Les composites à liant minéral regroupent l'ensemble des composites constitués par des particules végétales liées par une matrice à base des granulats minéraux dites granulats hydrauliques qui peuvent avoir diverses origines [20] et qui peuvent être catégorisés en deux types de granulats [21] :

- *Granulats naturels*: issus de l'exploitation de gisements naturels (sable, gravier, cailloux..). Ils sont disponibles abondamment dans la nature et ne nécessitent aucun traitement spécifique avant usage tel que le sable. D'autres sont extraits de roches après quelques petites transformations de structures et taille par un traitement mécanique.
- *Granulats artificiels*: souvent appelés granulats recyclés, issus de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la destruction des composants en béton.

4.2.2. Composites biosourcés de construction

4.2.2.1. Les bétons végétaux

La filière de bétons végétaux a connu ces dernières années une évolution pertinente dans le domaine de construction et pour plusieurs applications dans le bâtiment (bardages, bardeaux, revêtements de sol, parterres, conduites et colonnes architecturales...). Ces composites font en général une combinaison entre des particules végétales et des liants minéraux (ciment, chaux, argile...), ce qui leurs offre des structures assez éloignées des matériaux de construction classiques.

Les techniques de mises en œuvre restent simples. En effet les bétons végétaux peuvent être montés manuellement sur le chantier. Toutefois, cette technique reste lente et son application est conditionnée par une teneur en eau importante dans le béton. Par conséquent le temps de séchage reste assez important et assez lent et peut atteindre plusieurs mois, Hustache et Arnaud [22]. Ainsi afin de minimiser ce temps et optimiser la durée de mise en œuvre, Elfordy et al. [23] ont proposé une technique de projection à distance (**Figure I.9**).

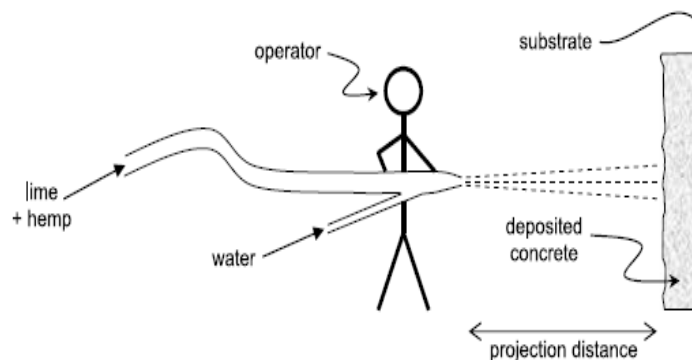


Figure I. 11: Principe de mise en œuvre d'un béton de chanvre par la technique de projection (Elfordy et al.)

Par ailleurs, la spécificité d'une composante végétale immergée dans un élément minéral nécessite des études particulières que ce soit au niveau des procédés de fabrication ou au niveau des méthodes de caractérisation. Selon la nature des renforts végétaux, on distingue deux types de bétons: le premier est le béton de granulats végétaux dans lequel les granulats minéraux sont remplacés, partiellement ou totalement, par des particules végétales de dimensions équivalentes ou inférieures à celles des granulats initiaux dont les produits bois-ciment [24]. Le deuxième est un béton renforcé par des fibres d'origine végétale [25].

Pour les bétons bois-ciment, plusieurs essences de bois peuvent être concernées (le sapin, le hêtre, le pin maritime, l'épicéa, le bambou...). Ces compositions ont été l'intérêt de plusieurs recherches scientifiques[26-31]. Cependant, certaines essences sont plus compatibles avec le ciment que d'autres.

La filière liège a aussi figuré récemment dans la tendance des bétons végétaux. Cette ressource renouvelable qui recouvre le territoire méditerranéen occidental est caractérisée par une faible densité. Plusieurs recherches ont été menée dans le contexte de cette matière en la mélangeant avec un liant cimentaire. El bakkouri *et al.* [32], Moreira *et al.* [33] ont démontré une faible conductivité thermique des composites en liège. En effet, sa valeur est de 0,194 à 0,318 W.m⁻¹.K⁻¹, selon le pourcentage du liège incorporé dans le mélange.

Chadi et al. [34] ont proposé également une étude sur un composite liège-ciment afin de déterminer ses propriétés hygrothermiques. Les constituants faisant le mélange du composite sont du sable écrasé, des granulats de liège, du ciment Portland (CEM II / BL 32.5 N) et de l'eau. Deux types des échantillons ont été préparés en substituant une proportion de mélange minéral par des granulats de liège selon le tableau suivant:

Échantillon	Sable (Kg/m ³)	Granulats liège(Kg/m ³)	Ciment (Kg/m ³)
L50	557.9	36.8	186
L75	323.3	64	107.8

Tableau I. 2: Composition et densité des échantillons ciment-liège à l'état sec (Chadi et al.)

Les mesures des valeurs tampons hydriques (MBV) ont montré que la composition contenant une fraction volumique importante de granulats de liège a une bonne régulation hydrique par

rapport à l'autre composition [34]. De plus, les matériaux combinés ciment-liège, testés sur une paroi, peuvent réduire la consommation énergétique de 29 % en les comparant avec une construction classique fabriquée par la brique creuse.

Outre les bétons végétaux à base de liants très fréquents dans la construction tels que la chaux et le ciment et qui ont été le sujet de plusieurs études [35, 36], d'autres liants peuvent être rencontrés dans les compositions des bétons végétaux-minéraux. Boustingorry [37] a proposé dans son étude un mélange de fibres végétales avec le gypse afin de traiter la résistance à la fissuration de ce matériau.

Outtara.S et al. [38] se sont intéressés à un autre type de composite qui fait le mélange argile-sciure de bois avec un rajout d'un pourcentage varié de ciment. Plusieurs tests ont été effectués avec différents dosages. Ainsi les résultats ont montré que les comportements des composites varient en fonction des différentes teneurs de sciure de bois d'une part et de ciment Portland d'autre part, dans le mélange. Une légère augmentation de la résistance à la flexion entre 0 et 20 % de sciure de bois a été notée. Quant à la résistance à la compression, elle varie fortement entre 0 et 25 % de sciure de bois avec une valeur maximale de 4,47 à 15 MPa.

Dahliet *al.*[39] ont étudié un autre type de mélange, dans le cadre de valorisation des déchets, qui est totalement différent aux compositions citées précédemment. En effet, le mélange traité est à base des déchets ménagers et les oléicoles comme élément d'adhésion. L'élaboration de ce matériau isolant a été effectuée à l'aide des déchets de papiers (cellulose) avec des différents dosages de grignon d'olives. Trois éprouvettes à dosage cellulose/grignon égal à 1/4, 2/4 et 3/4 ont été testées..



Figure I. 12: Eprouvette cellulose/grignon [Dahli et al.]

La mesure de la conductivité thermique des trois échantillons a montré que plus le grignon est présent, plus la conductivité thermique du mélange diminue. En effet, pour les rapport de mélange cellulose/grignon suivants 1/4, 2/4 et 3/4, les conductivités thermiques mesurées étaient respectivement 0.126, 0.095 et 0.08..

4.2.2.2. Panneaux Bois-ciment

La composition bois ciment regroupe l'ensemble des produits constitués par des particules de bois avec le liant ciment qui est souvent renforcé par des adhésifs fins afin de renforcer l'adhésion de mélange. Il existe trois principaux types des composites bois-ciment: les panneaux ciment en laine de bois WWCB (Wood-Wool Cement Board); les panneaux des particules liées par le ciment CBP (Cement-Bonded Particle board) et les composites en ciment renforcés par des fibres de bois (Wood-Fibre Reinforced Cement Composites) [40].

4.2.2.2.2. Procédés de fabrication

La fabrication de ces produits est répandue notamment dans les régions pacifiques connues par un climat tropical. En effet la substitution réussie des fibres d'amiante avec des fibres de bois dans des matrices de ciment a conduit à l'expansion rapide de l'industrie des composites cimentaires en fibres de bois dans certaines régions et dans certains pays, notamment en Australasie et en Amérique du Nord [41].

Néanmoins, la complexité technologique des procédés de fabrication de ce type des matériaux diffère d'un produit à un autre. Par exemple, la technique de réalisation du composite de ciment renforcé par des fibres de bois est plus complexe que celle de fabrication des panneaux ciment en laine de bois (WWCB) qui sont les produits les plus anciens. La complexité des procédés de fabrication constitue un frein au développement des industries de fabrications dans les pays sous-développés. Ainsi, des sociétés multinationales ont choisi de développer leurs activités avec les pays producteurs pour des raisons d'accès au marché ou pour réduire les coûts de fabrication [40].

De plus en plus, des usines de fabrication de panneaux de ciment en laine de bois sont installées dans des pays moins développés. Actuellement en Philippines la filière des composites de ciment en laine de bois basée sur l'utilisation des espèces d'arbres (ou déchets agricoles) et des plantes produites localement est florissante.

Les composites WWCB ont été d'abord développés en Europe dans les années 1920 [42] puis ils ont été fabriqués dans de nombreux pays du monde. Ce composite est fabriqué à partir des

écorces de bois résineux ou des grumes des feuilles stockés longuement afin de réduire l'amidon et la teneur en sucre du bois.

Les brins de laine de bois utilisés dans la fabrication de WWCB sont d'environ 3 mm de largeur et 0,5 mm d'épaisseur avec des longueurs allant jusqu'à 40-50 cm. La laine de bois peut être traitée avec des produits inorganiques tels que le calcium de chlorure afin de réduire les effets inhibiteurs des éléments de bois solubles avec le ciment. Ainsi la laine de bois est séché à l'air et mélangé avec du ciment en utilisant un rapport ciment à bois de (2/ 1) à (1/ 1). Le mélange est transporté et déposé en format matelas. Les planches sont ensuite empilées, puis pressées dans une presse hydraulique à une température ambiante en lots de 8 à 10. La pression utilisée pour comprimer varie en fonction du degré de densification nécessaire dans la dernière planche, mais peut être aussi bas que 80 kPa pour les panneaux isolants à faible densité. La presse est serrée sous pression pendant 24 h pour permettre le durcissement initial du ciment. Les panneaux sont alors serrés et rendurcis pendant 2-3 semaines avant le rognage et la finition.

Les panneaux des particules liées par le ciment (CBP) ont été développés dans les années 1960. La technologie utilisée pour les produire montre de nombreuses similitudes à celle utilisée pour la fabrication des panneaux de particules liées par une résine [40]. Cependant, il existe quelques différences, notamment dans le stockage du bois avant la fabrication ainsi que dans la formation et le pressage des panneaux. En effet, les grumes de bois qui sont généralement des espèces de conifères, sont stockées pendant au moins 2-3 mois avant le traitement afin de réduire leurs teneur en eau et en sucre. Les particules de bois sont préparées, par la suite, de la même manière que les panneaux des agglomérés classiques. Les grumes sont traitées pour produire des copeaux d'environ 10 à 30 mm de longueur et de 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur qui sont ensuite recoupés à l'aide des broyeur à marteaux. Les lamelles résultantes sont distinguées en trois catégories: fines, standards et grosses. Les fines particules sont utilisées pour la surface du panneau et les lamelles de taille standard sont utilisés pour le cœur des plaques. Alors que les grosses lamelles sont renvoyées de nouveau pour réduire encore leurs tailles.

Les copeaux de bois sont mélangés avec du ciment et de l'eau dans les proportions massiques suivantes: 20% de bois, 60% de ciment et 20% d'eau. La teneur en humidité des flocons est contrôlée en continu et le volume d'eau ajoutée au mélange est ajusté en conséquence. Ainsi un pourcentage de 2 à 3% de chlorure de calcium peut être ajouté au mélange afin d'accélérer les réactions du ciment. Après le malaxage, les flacons de ciment-bois revêtus sont amenés à

une étape de moulage où un matelas continu d'épaisseur uniforme est déposé sur une série des plaques de chargement sur un convoyeur.

Par la suite, le matelas est coupé en longueurs correspondantes à la taille de la plaque de chargement puis maintenu à une étape de pressage. Durant cette étape, les plaques sont transférées dans une chambre chauffée entre 70 et 80 °C pendant 6 à 8 h pour faciliter le durcissement de ciment. À la fin de cette étape, les planches sont séchées à l'air, puis empilées pendant 12 à 18 jours afin de durcir le ciment. Les panneaux sont ensuite séchés et peuvent être sablés sur une ou deux faces puis conditionnés avant l'expédition. En général, les plaques ont des épaisseurs de 12 à 18 mm, mais on peut trouver aussi des planches minces de 8 mm d'épaisseur. Par ailleurs d'autres plaques plus épaisses de 40 mm, peuvent être produites.

Les composites en ciment renforcés par des fibres de bois (Wood-Fibre Reinforced Cement Composites) sont fabriqués à partir des fibres de bois (7-8,5%), de sable (60%), de ciment (30%) et d'un pourcentage de (3-4%) de tri-hydrate d'aluminium. Les fibres de bois, qui sont généralement obtenues à partir des résineux (pâte kraft) par voie chimique, agissent comme un élément de renforcement dans les planches. C'est presque le même rôle réalisé par les fibres d'amiante dans les anciennes productions de matériaux de construction.

La fabrication de ces composites consiste à laver le sable et à le broyer en de fines poudres à l'aide d'un broyeur à boulets. Des balles de la pâte kraft sont ajoutées à une teneur d'eau dans une cuve puis sont agitées pour redisperser les fibres. Les fibres sont ensuite affinées pour augmenter leur capacité d'interagir avec le sable et le ciment [43]. Ces derniers mélangés avec les fibres et les additifs sont combinés dans les proportions décrites précédemment et dilués pour former une pâte avec une teneur en solides de 10%.

La bouillie est introduite dans une cuve contenant trois cylindres d'écran qui captent le mélange et le déposent sur une bande de feutre se déplaçant à 80 m.min⁻¹. Ainsi le matelas de fibres-ciment, est paré à ses bords par des jets d'eau en utilisant des caisses d'aspiration. Puis, le matelas passe sous un grand tambour en créant un vent qui permet les couches de fibre-ciment de tourner sur eux-mêmes. Le matelas est ensuite déposé sur une bande transporteuse puis elle passe au autoclavage pendant 6-8 h à des températures et des pressions d'environ 200 °C et 900 kPa, respectivement. En l'absence de l'autoclavage, le durcissement des planches prend environ 28 h. Après l'autoclave, les plaques sont transférées à une usine de finition où leurs bords sont rognés et leurs surfaces seront sablées.

4.2.2.2.3. Compatibilité bois-ciment

Le mélange de bois et ciment peut engendrer un problème de compatibilité. Pour l'évaluer, Hachmi et al. [44] ont proposé de mesurer le flux de chaleur libéré au cours de l'hydratation du composite afin de classer les bois par ordre de compatibilité. Ils ont constaté que la compatibilité diminue à mesure que le contenu d'extraction augmente. Plus tard, d'autres travaux ont montré que la matière lignocellulosique peut inhiber l'hydratation de la pâte de ciment. Al Rim et al. [45] ont analysé l'influence de la proportion de granulats de bois sur la performance thermique et mécanique d'un composite bois-ciment.

Cette compatibilité est souvent liée à la procédure de malaxage du bois, du ciment et de l'eau constituant le mélange. Mougel et al. [46] a étudié l'effet d'un pré-mouillage des particules de bois sur les performances de béton. Il a constaté que la méthode la plus efficace consiste à mélanger le ciment avec la totalité de l'eau puis ajouter les particules de bois dont l'humidité est stabilisée dans les conditions ambiantes. Ledhem et al. et Bouguerra et al. [47, 48] ont choisi d'introduire d'abord le ciment et ses additions et d'ajouter progressivement les granulats saturés en eau et enfin d'ajouter l'eau progressivement.

4.2.3. Filière chaux-chanvre

La filière chaux-chanvre est devenue de plus en plus courante dans les ouvrages de construction. En effet la source de chanvre est présente sur plusieurs territoires avec une production mondiale de 105.756 ha. En Europe, il représente 20.000 ha dont environ 15.000 ha en France. C'est ainsi en 2003, la France était le leader à l'échelle européenne avec 61% de la production totale de la culture chanvrière. En Amérique du nord (Canada) la production est de 5500 ha, et 78.944 ha en Asie. Par ailleurs, ce produit reste absent dans le paysage africain avec zéro production.

Ainsi la filière des matériaux chaux- chanvre est apparue et a marqué un grand développement sur le marché de la construction. Ce matériau combine à la fois un liant en chaux, avec un granulat principalement constitué de chènevotte, sans ou avec peu de fibres résiduelles. La chènevotte provient du cœur boisé de la tige de chanvre déchiquetée lors du processus de défibrage de la paille de chanvre. Elle est ensuite tamisée en particules de 5 à 40 mm de longueur [48].

L'analyse de la morphologie structurelle du béton de chanvre, induite par l'association de fibres végétales poreuses en chanvre à une matrice minérale grenue généralement à base de

chaux, indique une forte porosité et une densité limitée. Ce matériau composite présente ainsi des propriétés hygrothermiques très intéressantes: sa faible conductivité thermique lui confère de bonnes capacités d'isolation et sa forte perméabilité au transport d'eau favorise le transfert d'humidité [49].

Dans ce contexte, plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude de cette filière que se soit par des analyses expérimentales ou par des modélisations numériques notamment pour l'évaluation de son comportement thermo hydrique. Les travaux au début des années 2000 par Arnaud [50], Collet en 2004[51], Cerezoen 2005 [52], Evrard et Arnaud en 2006[53], Gourlay en 2011 [54],et récemment Chamoin en 2013[55] s'inscrivent dans une démarche de caractérisation du matériau d'un point de vue mécanique, thermique, hydrique et dans une moindre mesure acoustique.

Selon l'étude de Youssef et al.[48], la plupart des mélanges chaux/chanvre étudiés montrent un comportement fragile et une très faible résistance mécanique. En effet, ce matériau est caractérisé par une résistance inférieure à 2 MPa. Ces faibles caractéristiques à la compression rendent ce matériau inapte à la reprise des charges d'un bâtiment. La majorité des formulations proposées sont généralement riches en liant et légèrement compactées. De ce fait et jusqu'à présent, ce matériau n'est pas considéré comme un matériau porteur. Il est plutôt utilisé comme isolant de remplissage, combiné avec des composants de structure en bois.

Samri D. [56] s'est intéressé dans son étude à la caractérisation hygrothermique dans deux régimes, statique et dynamique, de trois types de matériaux de construction dont le béton de chanvre. Il souligne l'insuffisance de son approche notamment en régime dynamique par l'utilisation de propriétés hygrothermiques constantes indépendantes de la teneur en eau et par la non prise en compte du phénomène d'hystérésis.

Anh Dung T. [57] de son côté, s'est orienté sur une approche exclusivement numérique dans l'étude de la réponse hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre sous sollicitations climatiques. Il a comparé ainsi les réponses en température et humidité relative des parois en béton de chanvre avec celles d'autres matériaux (béton cellulaire, brique en terre cuite, laine minérale...). En termes de sollicitations climatiques, Evrard a analysé séparément l'effet de gradients de température et d'humidité relative sur le comportement des matériaux étudiés tout d'abord à l'échelle de la journée puis à l'échelle de l'année. Ainsi, il a favorisé une approche d'analyse de performance au détriment d'une étude du comportement hygrothermique réel du béton de chanvre.

Au niveau de la modélisation, plusieurs modèles mésoscopique sont été développés pour étudier l'influence de la composition des matériaux sur le comportement global de ces bétons. Bazant et al. [58] ont développé un modèle fermé pour simuler de façon réaliste la propagation de la fissuration et sa localisation.

Schorn et Rode [59] ont étudié les processus d'endommagement de béton à l'aide d'un modèle de cadre. Un modèle avec la méthode de Lattice Boltzmann a été présenté par Schlangen et Van Mier [60], permettant la simulation du mécanisme de rupture typique et de fissuration du béton. Une autre approche pour simuler la structure du béton de chanvre par un maillage d'éléments finis a été développée par Whitman et al.[61].

5. Propriétés hygroscopiques et phénomènes de transfert de chaleur et d'humidité

5.1. Propriétés hygroscopiques

On appelle matériau hygroscopique tout matériau capable de stocker et déstocker de l'eau sous forme liquide dans ses pores. Ainsi, selon le taux d'humidité, une quantité de vapeur d'eau s'y condense ou une quantité d'eau liquide s'y évapore.

5.1.1. Humidité relative

L'humidité relative (HR) est définie par le rapport entre la quantité d'eau contenue dans l'air (humidité absolue) et la quantité d'eau maximale que cet air peut contenir (valeur de saturation) pour la même température. Elle s'exprime par la formule :

$$\text{Humidité relative} = \frac{\text{Humidité absolue}}{\text{Valeur de saturation}} \times 100$$

Où l'humidité absolue traduit la quantité d'eau, en grammes, contenue sous forme de vapeur dans un volume d'un mètre cube d'air et la valeur de saturation (V_s en g/m^3) correspond à la quantité d'eau maximale que peut contenir l'air avant l'apparition d'eau liquide.

5.1.2. Teneur en eau

La teneur en eau caractérise l'état hydrique d'un matériau. Elle désigne la quantité d'eau liquide qui peut être contenue dans un matériau poreux. Cette quantité peut être exprimée par un rapport massique ou volumique.

La teneur en eau massique représente le rapport de la masse d'eau contenue dans le matériau (m_i) à la masse du matériau sec (m_0). Elle est exprimée en $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{sec}}$ par la relation suivante:

$$\omega_i = \frac{m_i}{m_0}$$

La teneur en eau volumique traduit le rapport de volume d'eau sur le volume total du matériau:

$$\theta_i = \frac{V_i}{V_t}$$

Une autre grandeur physique peut aussi définir la quantité d'eau contenue dans un matériau et qui relie sa quantité massique par unité de volume. Elle s'exprime par la relation suivante:

$$u_i = \frac{m_i}{V_t} = \theta_i \cdot \rho_0$$

Chaque matériau peut atteindre un degré de saturation en fonction de sa teneur en eau. Cette grandeur peut prendre toute valeur entre 0 (matériau sec) et 1 (matériau saturé). En réalité, les deux valeurs extrêmes ne peuvent jamais être atteintes, car aucun matériau ne peut être à 100% sec ni à 100% saturé. Cette saturation est formulée par l'expression suivante:

$$S_l = \frac{V_e}{V_t - V_0}$$

5.1.3 Pression partielle de vapeur

La pression partielle de vapeur d'eau définit la pression qu'aurait la vapeur d'eau si elle occupait à elle seule le volume total du mélange gazeux, à la même température. Cette grandeur est couramment prise comme le potentiel de diffusion d'humidité dans certains modèles des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux hygroscopiques[62].

5.1.4. Pression de saturation

Lorsque la pression partielle de vapeur d'eau atteint une valeur maximale, l'air humide est dit saturé. Il s'agit ici d'une pression de saturation. Cette pression implique la pression de vapeur dans un état d'équilibre indifférent avec une surface plane d'eau liquide ou de glace à la même température et à la même pression [63].

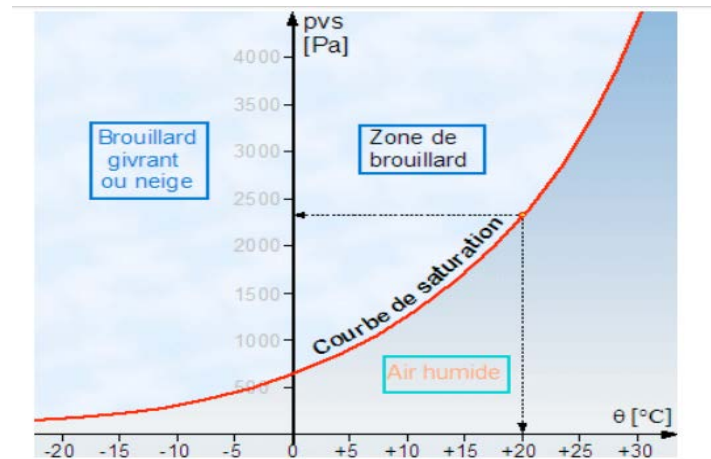


Figure I. 13: Pression de vapeur saturante

La condensation de la vapeur d'eau se produit au-delà de l'état de saturation. Ce phénomène peut s'engendrer notamment au contact d'une surface dont la température est inférieure à la température de rosée.

5.1.5. Isothermes de sorption

La courbe représentant pour une température T donnée la teneur en eau d'un produit en fonction de l'humidité relative HR est appelée courbe de sorption ou isotherme d'adsorption:

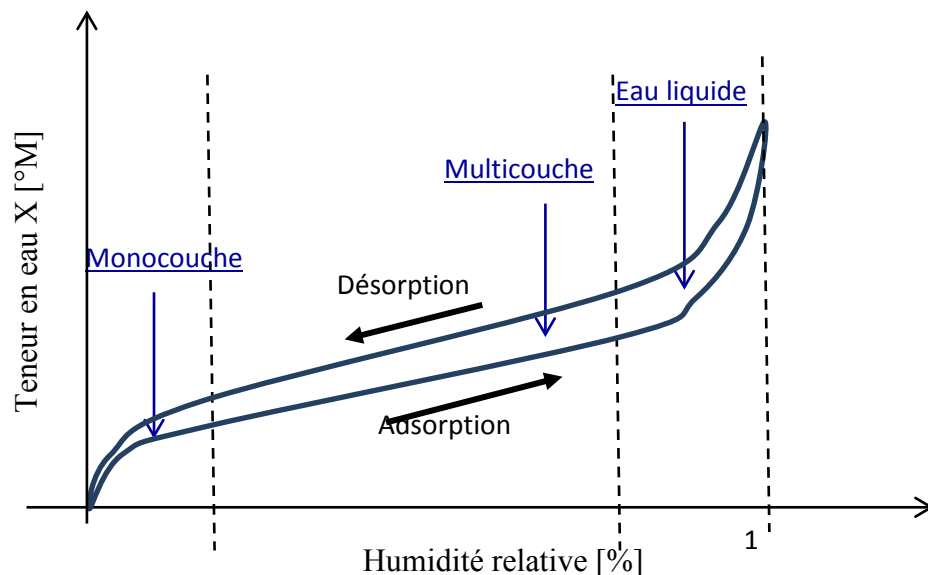


Figure I. 1: Courbe théorique de sorption et de désorption d'un matériau

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent trois zones, chacune correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le panneau.

- Zone 1: constitution monocouche moléculaire à la surface du produit. Elle est caractéristique des forces de Van der Waals entre groupements hydrophiles et les molécules d'eau ;
- Zone 2: adsorption des molécules sur la couche initiale. L'isotherme est linéaire dans cette partie et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide;
- Zone 3: eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'épaisseur de la pellicule est suffisamment petite pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro-capillaire constitue une phase continue.

La technique la plus utilisée pour la détermination des isothermes de sorption est appelée méthode gravimétrique. Le principe est d'obtenir un point isotherme du produit mise dans une enceinte maintenue à température T et à l'humidité relative HR de l'air constante. L'échantillon est pesé dans un intervalle régulier jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, il est alors en équilibre avec l'air à (T, HR) . Connaissant sa masse humide, il suffit alors de déterminer sa masse sèche pour en déduire sa teneur en eau X , le couple (HR, X) fournit un point de l'isotherme de sorption ou de désorption.

Ainsi, chaque matériau a sa propre capacité à absorber une teneur en eau. La figure suivante permet de réaliser un comparatif entre des matériaux peu absorbants comme le ciment, le plâtre ou la brique et des matériaux absorbants comme le béton cellulaire ou le béton de bois DURISOL (mélange ciment et particules de bois issues du recyclage des charpentes) [52].

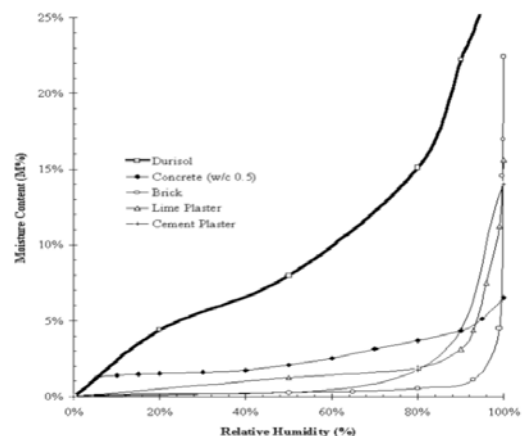


Figure I. 14: Courbe comparative des isothermes pour différents matériaux

Plusieurs matériaux ont été évalués expérimentalement par cette technique afin d'analyser leurs isothermes de sorption. Kamilia A. [64] dans ses travaux de thèse, a étudié les

isothermes de sorption pour quatre matériaux hygroscopiques différents (l'OSB, l'isolant de fibre en bois, le bois massif et béton cellulaire) en utilisant deux méthodes de caractérisation différentes. Les isothermes de sorption-désorption obtenues ont montré que le bois absorbe plus d'eau comparé à l'OSB et l'isolant de fibre en bois. En effet les trois matériaux sont pratiquement de même nature végétale, mais c'est la distribution porale qui peut expliquer la différence de sorption. Quand au béton cellulaire, il était marqué comme le matériau le moins hygroscopique parmi les matériaux étudiés.

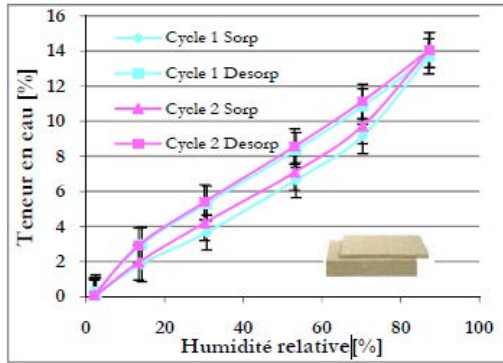


Figure I. 15: : Isothermes de sorption-désorption (DVS) de l'isolant de fibre en bois mesurées à 20°C

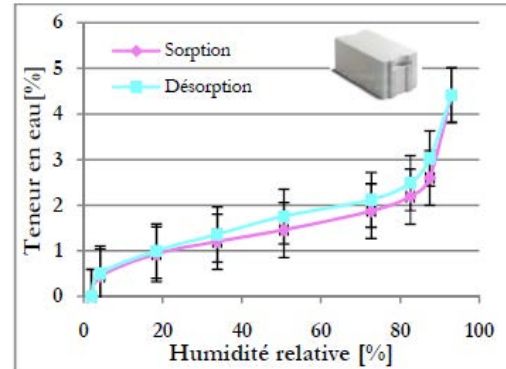


Figure I. 16: Isotherme de sorption désorption de béton cellulaire à 30°C

Au niveau de modélisation, plusieurs auteurs ont proposé des modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques afin de déterminer les isothermes d'adsorption/désorption. On trouve par exemple, le modèle de Guggenheim, Anderson et Boer (GAB) [65] le plus utilisé dans la littérature et qui est défini par l'expression :

$$X = \frac{X_{12} \times HR \times C \times K}{(1 - HR \times K)(1 + HR \times C \times K - HR \times K)}$$

X_{12} représente la teneur en eau de transition entre zones 1 et 2 (saturation de la monocouche) ; HR étant l'humidité relative ;

$$C = C_0 \times e^{\frac{H_1 - H_m}{RT}} ; \quad K = K_0 \times e^{\frac{H_1 - H_q}{RT}}$$

H_1 étant la chaleur de condensation de l'eau pure ; H_m étant la chaleur de sorption totale de la première couche et H_q représente la chaleur de sorption totale des multicouches.

En outre, le modèle Brunauer, Emmett et Teller (BET) en 1938 [66], est aussi considéré parmi les modèles couramment utilisés. Ce modèle est basé sur la théorie de Langmuir en

supposant que plusieurs couches peuvent venir se superposer sur la première couche adsorbée. Il est modélisé par l'équation suivante:

$$X = \frac{m \times HR \times C}{(1 - HR)(1 + (C - 1)HR)}$$

Où C est la constante cinétique reliée à l'adsorption de la première couche.

5.1.6. Phénomènes d'hystérésis

Selon les courbes d'isothermes de sorption d'un matériau hygroscopique, la relation humidité relative et teneur en eau n'est pas unique. A une humidité relative donnée, le matériau prend des valeurs différentes de teneur en eau pour les deux phases de désorption et d'adsorption. En effet, pour une même succion, la teneur en eau peut varier entre deux limites extérieures définies par l'intersection de l'horizontale avec les deux courbes de sorption. Ce comportement est expliqué par un phénomène d'hystérésis[67]. La représentation de ce phénomène peut être figurée en quatre différents formes selon la nature du matériau et sa structure poreuse.

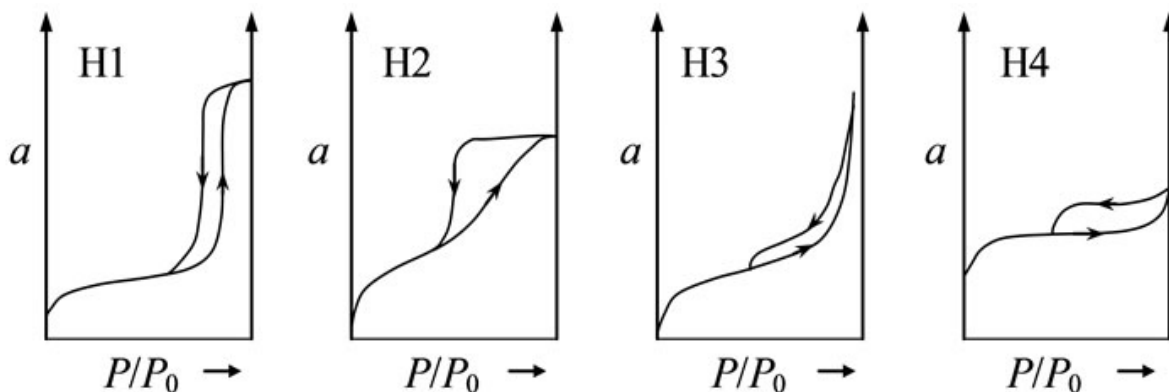


Figure I. 17: Classification des formes d'hystérésis [68]

Cette classification a été proposée par l'International Union of Pure and Applied Chemistry (UPAC) [68]. Chaque boucle représente un cas du matériau:

- H1 et H2: correspondent aux matériaux possédant des structures poreuses de forme sphérique ayant une distribution très étroite.
- H3 et H4: correspondent au cas des matériaux ayant la forme des agrégats dont les particules sont séparées par des pores inter feuillet.

5.2. Analyse phénoménologique des transferts de chaleur et d'humidité dans les matériaux hygroscopiques

5.2.1. Milieu poreux

Les composites de construction biosourcés constitués des particules végétales et d'un liant à base des granulats minéraux appelés souvent sous le nom bétons végétaux sont des milieux hétérogènes de nature poreuse. En effet la matrice compactée et formée des particules de bois et des grains minéraux constitue la phase solide du milieu. Les pores constituant la phase fluide du milieu peuvent être remplis d'une ou plusieurs phases fluides (liquide, vapeur, gaz) qui sont susceptibles d'échanger entre elles et avec la matrice solide de la matière et de l'énergie.

5.2.1.1. Volume apparent

Un milieu poreux, présente ainsi un volume total appelé volume apparent qui inclut le volume de solide et le volume de vide connu par la notion porosité. Cette porosité peut être classée en deux catégories:

- La porosité intra-phase (microscopique ou mésoscopique) qui représente l'ensemble des vides dans la phase solide (mélange des particules végétales et le liant).
- La porosité macroscopique qui représente les vides entre les agglomérations, créés par un arrangement imparfait entre les particules solides dans le volume total du milieu. Ce vide est lié au pourcentage de liant dans le milieu qui est responsable du compactage du matériau [69].

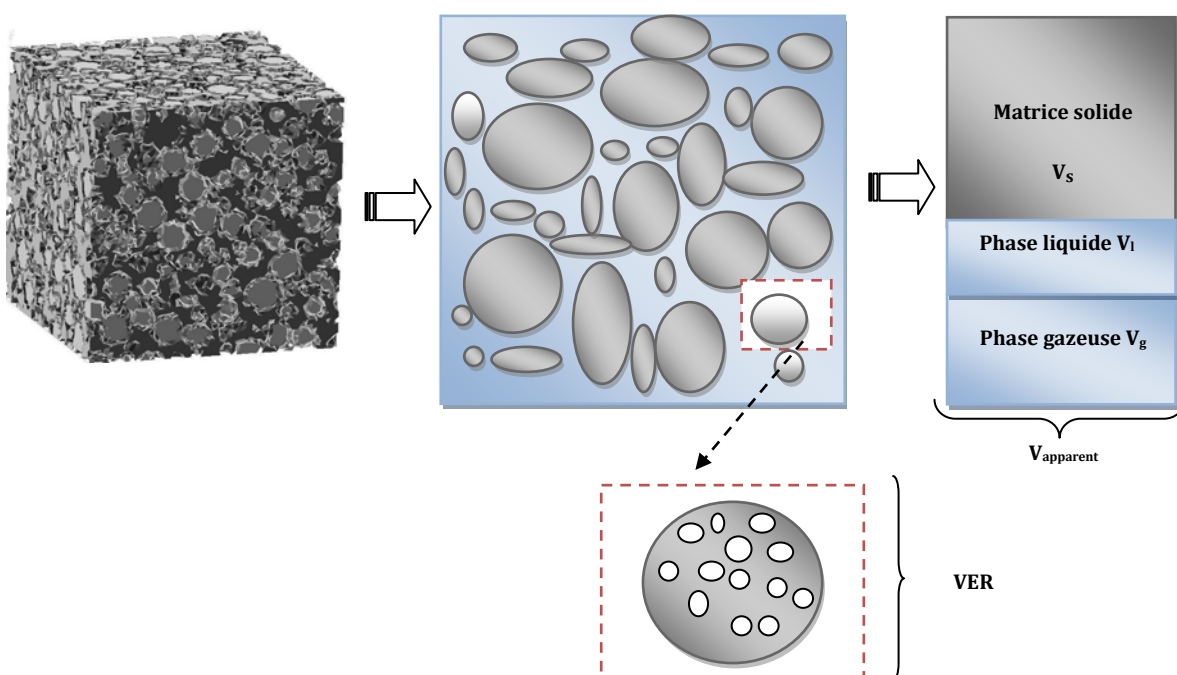


Figure I. 18: Milieu poreux et volume élémentaire représentatif (VER)

5.2.1.2. volume élémentaire représentatif (VER)

Le volume élémentaire représentatif (VER) réfère à l'ensemble de volumes élémentaires du matériau qui produisent, en moyenne, les propriétés effectives du composite. En effet, les grandeurs macroscopiques caractérisant un milieu poreux peuvent être assimilés à des moyennes des grandeurs microscopiques correspondantes, prises sur un domaine dont la taille est grande devant l'échelle de leurs fluctuations microscopiques, mais petite devant celle des variations à l'échelle macroscopique. Plusieurs définitions quantitatives du VER, détaillant les méthodes de sa détermination, ont été proposées dans la littérature dont la méthode de prise de moyenne Whitaker [70] et la méthode d'homogénéisation périodique Keller, [71], Millet et al [72].

5.2.3. Mécanismes de diffusion d'humidité dans un milieu poreux

Dans les matériaux de construction, l'humidité peut exister au sein des pores sous forme de deux états thermodynamiques: liquide ou vapeur d'eau. Ainsi on distingue deux types de diffusions de cette quantité de matière: diffusion de vapeur d'eau et diffusion d'eau liquide.

5.2.3.1. Diffusion de vapeur d'eau

Le mouvement de transport de vapeur d'eau, dans un milieu poreux, dépend généralement de la taille des pores. En effet plus les pores ont une taille grande, plus la circulation est facile. Généralement, on distingue trois types de diffusion moléculaire des particules de vapeur d'eau suivant la taille des pores [73]. Ces trois modes de diffusion sont schématisés sur la figure suivante.

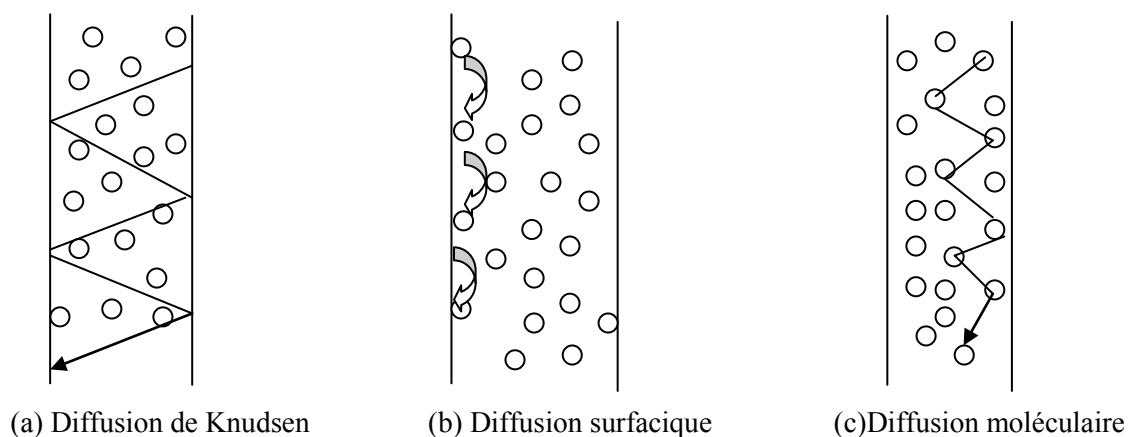


Figure I. 19: Mécanismes de diffusion de vapeur d'eau dans un milieu poreux

- Diffusion de Knudsen: Les interactions entre les molécules sont négligeables. Ainsi le mouvement de chaque molécule est gouverné par sa propre vitesse moléculaire et ses collisions avec les autres molécules.
- Diffusion surfacique: Le mouvement de molécules est favorisé sous la présence du gradient de concentration. Ainsi la migration de la diffusion des molécules se produit en faisant des sauts d'une surface à l'autre.
- Diffusion moléculaire: Le mouvement de vapeur d'eau se produit à travers la collision entre les molécules. Ainsi l'interaction entre les molécules et la matrice du matériau n'existe pas.

5.2.3.2. Diffusion d'eau liquide

Le mouvement de diffusion d'eau liquide est traduit par le gradient de pression liquide au sein de la phase d'eau. Ainsi, la densité de flux liquide est décrite par la loi de Darcy;

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \nabla \vec{P}$$

5.2.4. Mécanismes de transfert de chaleur dans un milieu poreux

Dans les milieux poreux, le transfert de chaleur dominant est celui par conduction qui est souvent couplé à un état de changement de phases du à la quantité d'eau continue dans le milieu. Ainsi le transfert de flux thermique se traduit par une variation d'enthalpie du matériau considéré. Cette variation est gouvernée principalement, par la loi de Fourier et le gradient du flux de chaleur transporté par le flux d'humidité qui peut être pris en compte en ajoutant un terme source.

6. Propriétés thermohydrauliques

6.1. Conductivité thermique

6.1.1. Milieu homogène et milieu hétérogène

▪ Milieu homogène

La conductivité thermique est l'une des propriétés thermo-physiques les plus évaluées pour les matériaux de construction. Elle indique la quantité de chaleur qui peut se propager par conduction au sein d'un milieu. Ainsi, plus cette valeur est élevée, plus le matériau est conducteur et inversement, plus elle est faible, plus le matériau est isolant. La mesure de cette

propriété dans les milieux supposés homogènes et isotropes demeure admissible en utilisant certaines méthodes et techniques de mesure. Ces dernières peuvent être classées en deux catégories:

- Méthodes en régime permanent: telles que la méthode du plaque chaude gardée qui consiste à appliquer sur un échantillon un gradient de température en régime permanent. Ces techniques nécessitent un long temps de manipulation et la variation de l'humidité au cours du temps entraîne souvent des résultats peu fiables.

- Méthodes en régime transitoire: telles que la méthode "flash", la méthode "sonde à chocs" et la méthode impulsionnelle qui sont de plus en plus utilisées dans le domaine de caractérisation thermique en régime transitoire.

Souvent, cette propriété est prise comme constante dans toutes les directions et en chaque point du matériau. Ce qui n'est pas le cas pour les matériaux multi constituants de composition hétérogène.

▪ Milieu hétérogène

Pour le cas des milieux hétérogènes, l'évaluation de l'expression du conductivité thermique n'est pas aussi simple. Il s'agit plutôt d'une conductivité thermique équivalente ou effective de tout le milieu avec ses différents constituants. Cette propriété dépend de plusieurs paramètres. En effet, ces matériaux sont souvent constitués d'une phase fluide s'écoulant dans les pores et une phase solide faisant la matrice de toute la structure. Ainsi, la conductivité thermique de chaque phase influe sur la conductivité thermique de toute la composition. Elle se diffère d'un matériau à un autre comme décrit sur la figure suivante.

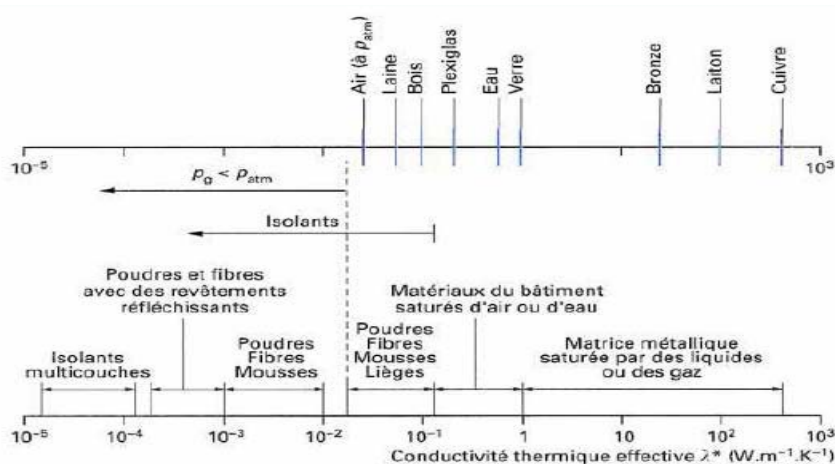


Figure I. 20: Conductivité thermique effective de différents matériaux

Les bétons végétaux font une partie de ce type des milieux hétérogènes dont la prédiction de la valeur de conductivité thermique peut être déduite à partir des modèles théoriques, analytiques et numériques qui sont assez développés dans la littérature.

6.1.2. Modèles de prédiction de conductivité thermique:

La prédiction de la valeur de conductivité thermique effective d'un milieu hétérogène nécessite une vraie connaissance de sa morphologie d'une part et dispose d'outils d'analyses théoriques et numériques qui permettent d'accéder aux informations particulières de sa microstructure d'autre part. Quelques simplifications géométriques peuvent être considérées au cours de certaines recherches.

Dans ce paragraphe, nous essayons de présenter quelques modèles, de la littérature, qui ont été développés pour la prédiction de conductivité thermique équivalente des matériaux composites. Cependant, ces modèles peuvent être répartis selon différentes catégories. Par exemple certains modèles analytiques ont traité que des géométries prises en deux dimensions [74]. D'autres sont dédiées pour des géométries en trois dimensions [75]. Ces dernières sont de plus en plus envisageables de nos jours, suite aux développements de certains outils informatiques [76].

D'autres auteurs ont classé les modèles de prédiction de conductivité thermique équivalente des composites en des modèles de premier, de second, de troisième et de quatrième ordre [77]. Certains d'autres, les ont classés en des modèles périodiques, statistiques et semi-empiriques [78]. Quelques modèles sont présentés sur la figure suivante et sont un peu détaillés dans la partie qui suit.

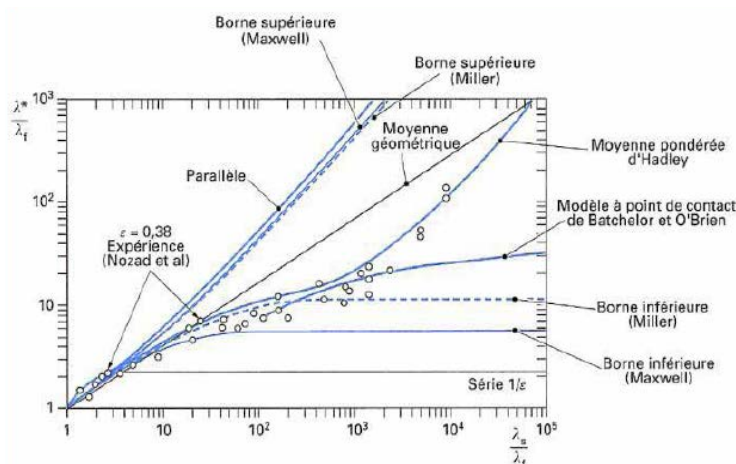


Figure I. 21: : Différents modèles de prédiction de conductivité thermique équivalents des matériaux multi-constituants

6.1.2.1. Modèles de bornes de Voight et Reuss

Ces modèles incluent les modèles qui se basent sur le fait que la conductivité thermique équivalente d'un milieu hétérogène est comprise entre celle d'un modèle en série et un modèle en parallèle comme présentée dans la figure ci-après:

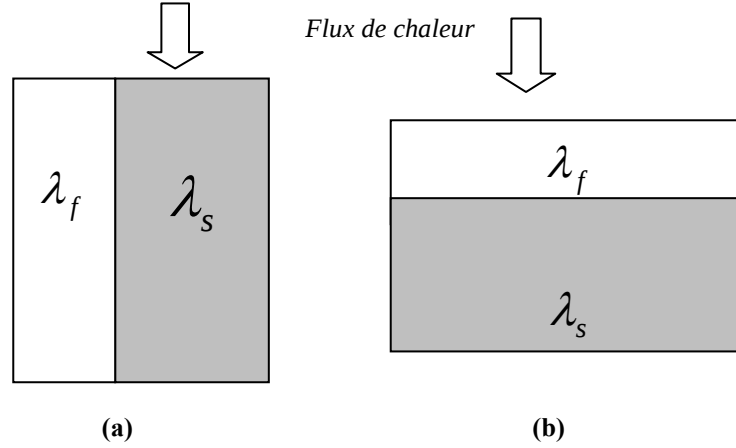


Figure I. 22: Modèles de conductivité thermique équivalente: (a) en parallèle, (b) en série

La conductivité thermique réelle est bornée par ces deux modèles [79]. Les deux bornes permettent ainsi d'identifier la zone dans laquelle la conductivité thermique équivalente se situe.

$$\frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_f} + \frac{1-\varepsilon}{\lambda_s}} < \lambda_{eq} < \varepsilon \lambda_f + (1-\varepsilon) \lambda_s$$

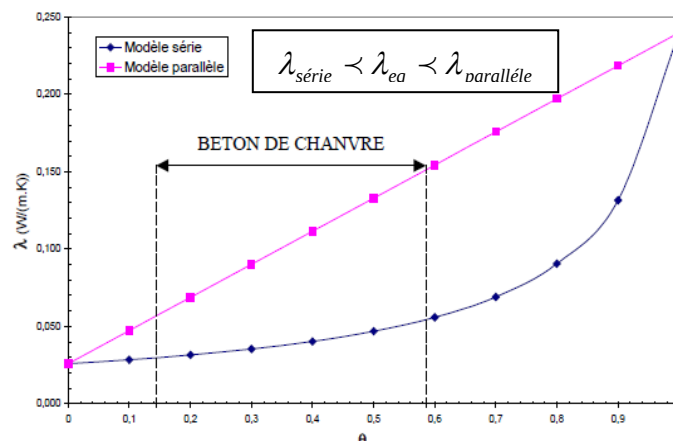


Figure I. 23: Bornes de Voigt et Reuss pour le béton de chanvre [52]

6.1.2.2. Modèles par homogénéisation autocohérente (HAC)

Ces modèles font partie des modèles de calcul théorique qui permettent d'identifier les propriétés d'un milieu hétérogène réel en l'assimilant à un milieu homogène fictif. Ainsi les

éléments constituant le mélange ou le composite sont présentés par des inclusions sphériques et le milieu hétérogène est assimilé à des structures sphériques avec des tailles différentes. Cette modélisation peut être étendue à des inclusions à plusieurs phases (jusqu'à n phases en fonction de nombre de constituants de mélange)

Par exemple, pour un matériau composite à deux phases, le milieu est modélisé par deux sphères dont chacune présente une phase ou un constituant. Ainsi une première sphère de rayon R_a et de conductivité thermique λ_a est entourée par une deuxième sphère qui présente le deuxième constituant de rayon R_b et de λ_b . La conductivité thermique équivalente de milieu est modélisée par la relation suivante:

$$\lambda_{eq} = \lambda_b \left(1 + \frac{\left(\frac{R_a}{R_b} \right)^3}{\left(\frac{1 - \left(\frac{R_a}{R_b} \right)^3}{3} + \frac{1}{\frac{\lambda_a}{\lambda_b} - 1} \right)} \right)$$

Ce modèle est souvent utilisé pour le cas des matériaux secs dont l'air et la matière solide sont les deux seules phases présentes.

Pour le cas d'un composite à trois phases, une phase C est alors rajoutée à la composition, et par la suite une sphère de rayon R_c peut être représentée avec l'ensemble cité précédemment. Ainsi le modèle de conductivité thermique peut être donné comme suit:

$$\lambda_{eq} = \lambda_c \left(1 + \frac{(\Re)}{\left(\frac{1 - \Re}{3} \right) + \frac{3 + \delta \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_b} - 1 \right)}{3 \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_c} - 1 \right) - \delta \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_b} - 1 \right) \left(2 \frac{\lambda_b}{\lambda_c} + 1 \right)}} \right)$$

$$\Re = \left(\frac{R_b}{R_c} \right)^3 \quad \delta = 1 - \left(\frac{R_a}{R_b} \right)^3$$

Cette méthode a été utilisée par Florence et al. [80] afin d'étudier l'effet de la formulation d'un composite chaux-chanvre sur la densité et la conductivité thermique. De même dans le cadre de valorisation des produits locaux, M. Bederina et al. [81] ont proposé d'étudier l'effet de l'ajout des copeaux de bois dans le béton en sable en se basant sur cette méthode. Le mélange étudié était formé, des copeaux provenant de déchets des menuiserie de bois incorporés dans deux types de bétons de sable.

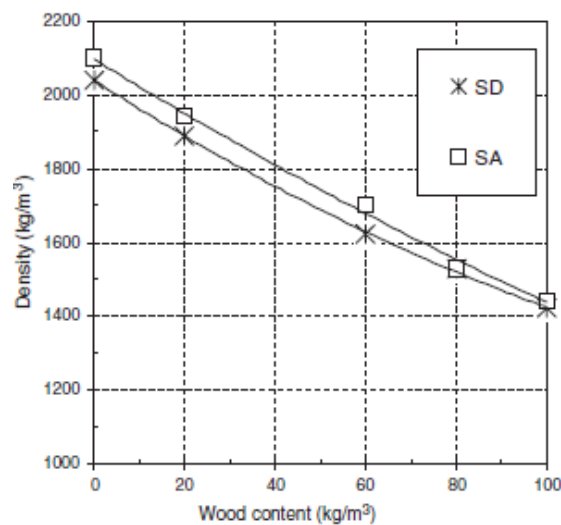


Figure I. 24: Evolution de la densité en fonction de la teneur en bois

Les résultats ont montré que l'augmentation de la teneur en copeaux réduit le poids du matériau final et diminue sa conductivité thermique équivalente et par conséquent fait augmenter sa capacité d'isolation. Cependant, concernant l'aspect mécanique, il était marqué que l'augmentation de la teneur en copeaux réduit le comportement mécanique des bétons de sable. Toutefois, avec de faibles proportions, il est possible d'obtenir des valeurs intéressantes. Ces résultats en appliquant le modèle auto-cohérent ont été bien en correspondance aux valeurs dérivées par expérience [81].

6.1.2.3. Modèles semi-empiriques

6.1.2.3.1. Modèles de Maxwell

Ce type des modèles concernent les milieux où l'empilement des particules est considéré régulier. La phase solide du milieu supposée discontinue est dispersée dans une phase fluide continue. A la base, le modèle de Maxwell [82] a été développé pour le cas des milieux

granulaires dont les particules sont assimilées à des sphères uniformes de même diamètre. Le contact entre les particules n'est pas pris en considération. Ainsi chaque particule est supposée éloignée de ses voisines:

$$\lambda_{eq} = \frac{\varepsilon\lambda_f(2\lambda_f + \lambda_s) + 3\alpha\lambda_s\lambda_f}{\varepsilon(2\lambda_f + \lambda_s) + 3\alpha\lambda_f}$$

Plusieurs autres modèles ont été implantés par la suite en partant de même principe que celui de Maxwell et en considérant quelques hypothèses qui peuvent être rajoutées au modèle. Hamilton et al [83] ont supposé que les particules ont une forme aléatoire. Ainsi un coefficient ψ a été introduit, dans le modèle de conductivité thermique effective:

$$\lambda_{eff} = \lambda_f \left[\frac{\lambda_s + \psi\lambda_f - \psi\varepsilon(\lambda_f - \lambda_s)}{\lambda_s + \psi\lambda_f + \alpha(\lambda_f - \lambda_s)} \right]$$

Ces modèles restent limités car ils ne prennent pas en compte la forme et l'orientation des particules ou des fibres dans le mélange.

6.1.2.3.2. Modèle de Lewis et Nielson

Ce modèle a été développé en 1970 par ces deux auteurs. La forme et la distribution des particules sont prises en compte dans cette théorie [84]. De plus, l'effet des rajouts des fractions maximales des fibres dans le composite est aussi pris en compte dans l'équation de conductivité thermique qui est donnée comme suit:

$$\lambda_{eq} = \lambda_1 \left(\frac{1 + (A-1)U\varepsilon_2}{1 + \Phi U\varepsilon_2} \right)$$

$$\text{Avec: } U = \frac{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - A - 1}$$

$$\Phi = 1 + \left(\frac{(1 - \varepsilon_{\max})}{\varepsilon_{\max}^2} \right) \varepsilon_2$$

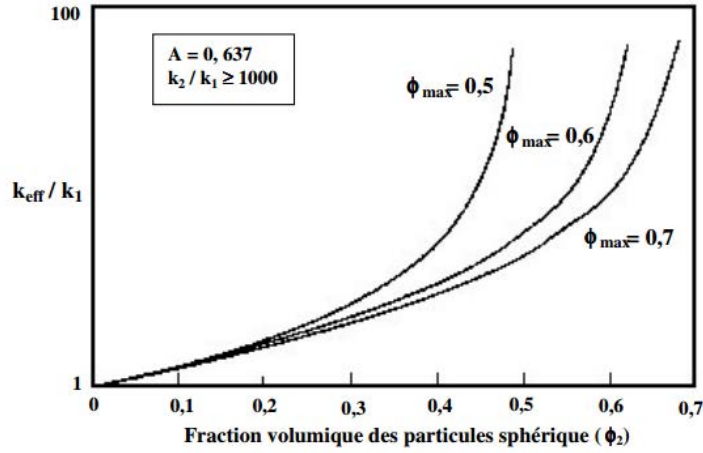


Figure I. 25: Variation de la conductivité du composite en fonction de la fraction volumique de la phase dispersée (suivant Nielsen) [84]

6.1.2.4. Modèles des milieux périodiques

6.1.2.4.1. Modèle de Willy et Southwick

Ces modèles se basent sur la théorie d'analogie électrique et prennent en compte l'orientation des fibres et leur fractions dans la composition [85]. Ainsi, le milieu est supposé périodique et la conductivité thermique équivalente est calculée à partir des lois des résistances électriques (en série ou en parallèle):

$$\lambda_{eq} = \frac{n_w \lambda_s}{\varepsilon \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + \alpha} + (1 - n_w)(\alpha \lambda_s + \varepsilon \lambda_f)$$

6.1.2.4.2. Modèle de Krisher

Ce modèle est à la base de même principe des modèles de strates en série ou en parallèle qui prend en considération les deux phases solide et fluide et une troisième phase constituée de mélange solide et gaz [86].

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_{série} \lambda_{parallèle}}{0.2 \lambda_{série} + (1 - 0.2) \lambda_{parallèle}}$$

6.1.2.5. Outils d'imagerie et modèles par méthodes numériques

La littérature a fourni des modèles analytiques et semi empiriques qui permettent de prédire la conductivité thermique équivalente d'un milieu en fonction de sa constitution. Ces modèles sont peu adaptés pour les structures fibreuses présentant souvent une géométrie anisotrope. En effet, la plupart de ces modèles ne prennent pas en considération cette anisotropie dont la tenseur de conductivité thermique est orthotrope [87]. Afin d'estimer ces deux grandeurs, il était nécessaire de développer des méthodes d'imageries en coupe (Microscopie optique,

Microscopie électronique à balayage). Néanmoins, ces deux techniques sont limitées à donner des visualisations en 2D, ce qui ne permet pas l'accès aux structures plus au moins complexes. D'où l'intérêt des méthodes qui permettent des visualisations en 3D dont la technique de micro-tomographie.

Walther, E et al. [88] ont proposé dans leur étude de calculer les propriétés de diffusion thermique effective des pâtes de ciment en cours d'hydratation à partir des reconstructions en 3D par la technique micro-tomographie et en utilisant la méthode de Lattice Boltzmann. Bogdan et al. [89] ont proposé une investigation sur les matériaux hétérogènes à base de ciment, en utilisant un nouveau modèle qui permet de prédire l'évolution du pâte du ciment et de ses propriétés élastiques et diffusives en fonction de degré d'hydratation. Le mélange étudié est composé du ciment anhydre, de l'eau et des adjuvants hydratés. Ainsi, ils ont proposé une application au processus d'hydratation de la pâte du ciment en utilisant un simple modèle analytique qui permet de créer des morphologies initiales et les faire évoluer. Le modèle utilisé est celui de Powers and Brown yard [90] qui prend en compte cinq fractions volumiques (ciment anhydre, produits d'hydratation, eau, eau libre, retrait chimique), alors que Bogdan et al. ont utilisé seulement trois fractions (eau, ciment, produits d'hydratation). Le but était de prédire les propriétés élastiques et le coefficient de diffusion en appliquant des gradients unitaires dans chaque direction du VER. Ainsi la diffusivité était déduite par la matrice suivante:

$$D_{eq} = \begin{pmatrix} 5.03 & 0.102 & 0.173 \\ 0.0794 & 4.63 & 0.138 \\ 0.0507 & 0.354 & 4.96 \end{pmatrix} \cdot 10^{-11}$$

Wriggers. P [91] a généré dans son travail, un modèle de méso structure aléatoire d'un matériau béton, basé sur les paramètres et la distribution de probabilité des particules agrégées et leurs tailles. La méso structure générée par le modèle a été prise au moyen d'un préprocesseur automatique de maillage avec la méthode des éléments finis (FEM).

Rayane et al. [92] de leur part, ont proposé la caractérisation structurelle et thermique d'un isolant fibreux de laine de chanvre à l'aide d'images tridimensionnelles via la tomographie. La conductivité thermique a été déterminée en comparant les mesures expérimentales avec des modèles analytiques et modèles semi-empiriques.

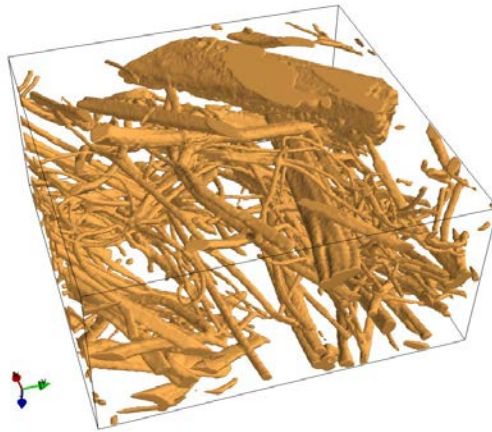


Figure I. 26: Visualisation d'une laine de chanvre (vue en 3D) par acquisition des images tomographiques)
[92]

Le principe consiste à calculer les propriétés thermiques macroscopiques de la microstructure réelle. Par la suite des outils mathématiques d'analyse d'images ont été utilisés afin de déterminer les paramètres géométriques (taille des pores, diamètres des particules, orientations des fibres, ...)

6.2. Conductivité hydraulique

6.2.1. Coefficient de conductivité hydraulique

C'est le coefficient qui définit la résistance d'un matériau à la pénétration d'un flux de matière (écoulement) sous gradient de pression totale. Il est défini par le rapport entre la perméabilité et la viscosité du fluide. Ainsi, la vitesse de filtration d'un fluide est régie par la loi de Darcy, en conditions non saturées, en négligeant les effets de gravité et les effets dynamiques.

Plus le milieu est perméable plus le fluide s'écoulera vite. De plus, ce coefficient dépend de la porosité du milieu. De ce fait, une perméabilité élevée exige une bonne porosité. Par contre l'inverse n'est pas vrai. Ceci a été montré dans la théorie de Kozney à travers de l'équation de Kozeny-Carman qui relie la perméabilité à la porosité du matériau au travers de grandeurs statistiques décrivant la géométrie et la répartition des pores [93]:

$$k = \frac{\varepsilon^3}{\beta \cdot S^2 (1 - \varepsilon)^2}$$

Avec; β est une constante empirique, S est la surface spécifique et ε est la porosité du matériau

Ainsi dans un réseau poreux, la perméabilité du milieu est généralisée par la perméabilité apparente qui dépend des caractéristiques du fluide incorporé dans les pores, de la distribution et la taille des pores et également de l'état hydrique du matériau [94]. Dans d'autres cas, (fissuration et dégradation) ce paramètre dépend fortement de ces dégradations. Picandet [95] a établi une corrélation entre la perméabilité et les fissures induites dans un composite cimentaire.

6.2.2. Modèles de prédiction de perméabilité au gaz

La composition d'un matériau hétérogène influe sur sa microstructure et par conséquent sur ses propriétés intrinsèques. Ces propriétés dont la perméabilité au gaz sont considérées comme indicateur de la durabilité d'un matériau en fonction de ses compositions [96].

Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature dans le but de déterminer la perméabilité au gaz. Certains modèles consistent à caractériser les réseaux poreux en un réseau de tubes cylindriques de rayons connus (Loi de Darcy, Loi de Poiseuille...). Hamami [96] a réparti les différents modèles en deux groupes: Modèles des réseaux de tubes et modèles des microstructures numérisées. D'autres auteurs ont classé les modèles de prédiction de perméabilité d'un milieu hétérogène en modèles analytiques et modèles statistiques [97]. Dans le tableau suivant, nous essayons de récapituler quelques modèles de la littérature sans être très exhaustif.

Modèles	Théories et Auteurs	Remarques
Modèles des réseaux des tubes	Kozney-Carman [98]	-Appelé aussi par Modèle de rayon hydraulique dont le terme perméabilité est considérée homogène à une longueur au carré qui contrôle les propriétés hydrauliques d'une structure poreuse. - Le terme de perméabilité, dans ce modèle prend en compte que la forme et la section des pores. Il ne prend pas en considération la tortuosité et la constrictivité des pores.
	Katz Thompson [99]	- Ce modèle propose la théorie de la percolation dont le milieu poreux est

		considéré comme un réseau tridimensionnel d'éléments conducteurs - Le réseau poreux est supposé faiblement connecté pour les structures poreuses très hétérogènes. Ainsi dans ce modèle aussi, la tortuosité et la constrictivité des pores ne sont pas prises en compte.
	Aiit Mokhtar et al. [100]	-Appelé aussi modèle LEPTIAB qui relie le coefficient de perméabilité d'un milieu à sa microstructure qui est assimilée à une ensemble de pores cylindriques parallèles qui sont entourées du volume total du matériau. - Au contraire aux théories de Kozney-Carman et Katz Thompson, ce modèle prend en considérations les deux termes de tortuosité et constrictivité.
Modèles des microstructures numériques	HYMOSTRUC (Van Breugel et al) [101]	- Ces modèles sont souvent utilisés pour les matériaux cimentaires, supposés formés des réseaux capillaires.
	Modèle Pignat EPFL (C. Pignat) [102]	- Ces modèles se basent sur les paramètres de formulation d'un composite cimentaire en reconstruisant sa microstructure et en calculant la perméabilité au gaz par simulation numérique. La perméabilité peut être calculé à l'aide d'un programme de résolution des équations de Stokes.
	Cem Hyd 3D (D.P. Bentz et	- Ils sont des modèles qui sont un peu proches des configurations réelles des

	al)[103]	structures à base de ciment. Par contre, ils se différent par la prise en compte des phases de ciment ainsi les pourcentages des espèces constituant le mélange.
Modèles statistiques	Dienes [104]	- Ce modèle est basé sur des approches statistique de type Gaussienne. Il consiste à représenter une structure poreuse par des distributions statistiques de tubes dont leurs répartitions dans l'espace est uniforme dans l'espace. - Le flux individuel de chaque élément est donné par la loi de Poiseuille.
Modèles des milieux effectifs	Kirkpatrick [105]	- Ce modèle consiste à assimiler un milieu hétérogène à un réseau poreux homogène de structure et de propriétés macroscopiques équivalentes à celles de milieu réel. - Les propriétés de transport hydraulique du milieu effectif sont déduites à partir un formalisme mathématique qui suppose l'absence de corrélations spatiales entre les éléments conducteurs d'écoulement.
Modèles de réseaux	Zhu et al.(1995) [106]	- Les modèles de réseaux sont établis à partir d'une analogie entre l'écoulement dans un milieu perméable (loi de Darcy) et le flux électrique (loi d'Ohm). - Les tubes sont supposées interconnectés sous la forme de structures régulières.

Tableau I. 3: Différents modèles de prédiction de coefficient de perméabilité

7. Conclusion

Dans le chapitre présent, le contexte énergétique à l'échelle internationale et la nécessité de la prise des consciences réglementaires par des labels, dans le secteur de bâtiment est abordé au premier lieu. Cependant la réduction de la facture énergétique dans un habitat reste liée aux performances de l'enveloppe et de son étanchéité à l'air et par conséquent des natures des matériaux constitutifs de cette structure. Les matériaux biosourcés constituent une filière prometteuse dans ce volet.

Ainsi, un état de l'art sur les matériaux biosourcés, notamment les mélanges multi constituants de type bétons végétaux et composites bois-ciment est dressé en second lieu. Ces matériaux avec leur caractère hygroscopique, d'une part, font le sujet de plusieurs phénomènes de transfert de chaleur et de fixation d'humidité. Une étude généralisée sur ces différents mécanismes est ainsi présentée. D'autre part, ces matériaux ont une structure hétérogène ce qui peut générer une difficulté dans la détermination de leurs propriétés thermophysiques. Pour cela, une partie de ce chapitre, a été consacrée à la description des différentes méthodes et outils d'estimation des propriétés équivalentes des milieux hétérogènes. Des modèles de prédiction des conductivités thermique et hydraulique sont ainsi cités.

Chapitre 2

Formulations mathématiques des phénomènes des transferts couplés de chaleur, air et humidité au sein des matériaux hygroscopiques

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est la compréhension des phénomènes couplés de transfert de chaleur et d'humidité au sein des matériaux de construction considérés comme milieux poreux. Cette analyse des phénomènes est traduite par une modélisation mathématique qui permet de décrire les mécanismes physiques, au sein d'un matériau bois massif, par des équations mathématiques gérées par des lois de transferts et de conservations d'énergie et de masse. Ainsi, le modèle proposé dans ce contexte, est un modèle couplé basé sur trois équations décrivant le transfert de chaleur, d'air et d'humidité connu par le modèle (HAM transfers) qui intègrent simultanément l'effet de la diffusion thermique et le phénomène d'infiltration dans un panneau de bois. Ce modèle a été mis en œuvre et résolu par une approche de type éléments finis (via le logiciel COMSOL Multiphysics). Les paramètres d'entrées du modèle ont été évalués expérimentalement selon les normes reconnues de la caractérisation de matériaux. Par conséquent, de nombreuses séries de calcul hygrothermique ont été effectuées pour deux configurations (1D et 2D) afin de tenir compte d'un effet possible de la dimension. Ainsi, deux types de conditions aux limites ont été examinés. Le premier est à l'échelle du matériau qui s'agit des conditions de séchage du bois. Le deuxième type de ces conditions est à l'échelle de la paroi, où des conditions climatiques sont considérées. En outre, la sensibilité du modèle au couplage et au variabilité des paramètres a été analysée.

2. Analyse et compréhension des phénomènes des transferts couplés

2.1. Combinaison des physiques

Le niveau hygrothermique d'une paroi est souvent traduit par sa capacité à l'étanchéité à l'air et à la régulation de la température intérieure. En effet, une paroi est plus performante et durable si elle s'oppose à toute infiltration d'eau et si elle étanche convenablement les flux de vapeur d'eau. Cette performance est liée éventuellement aux types et aux natures du matériau utilisé dans la construction. En effet, la notion d'hygrothermie dans les matériaux désigne particulièrement, l'évolution de température et de taux d'humidité de l'air ambiant à l'intérieur d'un local. Par ailleurs, ce comportement connu par hygrothermique dépend fortement des propriétés hygroscopiques intrinsèques du matériau [64].

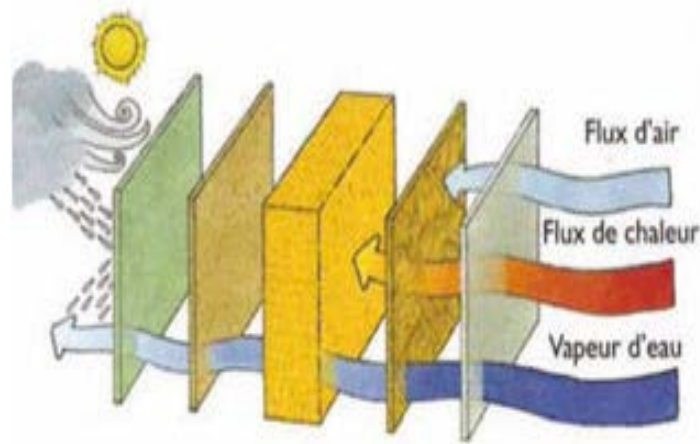


Figure II. 1: Transfert de chaleur et étanchéité à l'air au sein d'une paroi

En général, les phénomènes de transfert sont gérés par des lois dynamiques de la physique qui sont généralisées par les lois suivantes:

- Transfert d'eau gouvernée par la loi de Darcy :

$$J_l = -k_p \cdot \text{grad} \vec{P}$$

- Transfert de chaleur gouverné par la loi de Fourier:

$$J_{th} = -k_{th} \cdot \text{grad} \vec{T}$$

- Transport de gaz gouverné par la loi de Fick:

$$J_g = -D \cdot \text{grad} \vec{C}$$

2.2. Aspects multi échelles

L'étude des phénomènes de transfert dans les milieux poreux peut être décrite selon deux échelles [107]. Une échelle microscopique dans laquelle on décrit les différents phénomènes physiques qui peuvent se produire au niveau des pores. Une échelle macroscopique dont laquelle les propriétés thermophysiques et les différents modes de transfert et de diffusion sont décrites à grande échelle. Ainsi, pour passer de l'échelle micro-macro, plusieurs méthodes peuvent être utilisées[108, 109].

En outre, ces deux principales échelles, la compréhension et la modélisation des phénomènes couplés des transferts dans le contexte de l'habitat peuvent être réalisées aussi suivant trois

autres échelles, allant de l'échelle du matériau, puis l'échelle de paroi jusqu'à l'échelle du bâtiment. Ces différentes échelles peuvent être généralisées comme suit:

- A l'échelle Matériau, l'étude de transfert d'humidité et de chaleur est effectuée au sein du matériau dont ses propriétés thermo physiques et ses coefficients intrinsèques (porosité, conductivité thermique, perméabilité au gaz..) sont les paramètres d'entrée du modèle.
- A l'échelle Paroi, l'étude consiste à suivre la variation des champs de température et d'humidité au niveau de la paroi (façade, toit, mur simple, mur multicouche...), en imposant des sollicitations météorologiques extérieures. Ce suivi permet d'évaluer le comportement hygrothermique de l'enveloppe ainsi que l'ambiance intérieure.
- A l'échelle Bâtiment, il s'agit d'une étude globale de la consommation d'énergie dans un habitat ainsi que l'analyse de la qualité d'air maintenue à l'intérieur. L'étude à cette échelle, est souvent réalisée à partir des co-simulations qui font intégrer des modèles de transferts de chaleur et d'humidité dans des codes de co-simulation dynamique de bâtiment [110].

Par ailleurs, l'analyse de ce genre des mécanismes de transferts peut se faire selon deux voies; soit à travers l'expérimentation ou par des simulations numériques. Concernant l'étude expérimentale, elle constitue une voie pertinente qui permet de visualiser réellement le comportement du paroi sous des conditions réelles. De l'autre côté, l'étude par simulation n'est pas aussi négligeable. En effet grâce à des modèles mathématiques associés à un logiciel de simulation pour la résolution, on peut obtenir les mêmes résultats que ceux de l'expérimentation tout en évitant les répétitions des essais souvent coûteux en matière et en temps. Des fois, ces deux investigations se font en parallèle afin d'établir une comparaison et de valider le modèle sur lequel la simulation est basée.

Les dernières décennies ont connu l'émergence de nombreux modèles HAM (Heat, Air and Moisture). Le progrès des outils informatiques a permis de développer des modèles de plus en plus complexes, fiables et rapides. Par conséquent, de nombreux outils de simulation ont été utilisés dans les travaux de simulation qui permettent de prévoir l'évolution simultanée de température et d'humidité au sein de l'enveloppe. Citons les logiciels (WUFI, hygIRC, DELPHIN et MOIST...) qui sont basés sur des modèles de transfert d'humidité et de chaleur [111]. Ces outils sont souvent utilisés dans les bureaux d'étude de thermique de bâtiment et dans certains laboratoires de recherche.

Une autre catégorie de ces logiciels comme (TRNSYS, Fortran, Energy Plus, Matlab/Simulink...) a été aussi dédiée à la simulation des comportements hygrothermiques des matériaux. Ces logiciels se basent sur des méthodes de discrétisation qui permettent une résolution, à partir des schémas numériques, des équations couplées de transfert de chaleur et de masse au sein de la paroi ou du bâtiment. Parmi ces logiciels, on trouve le logiciel COMSOL qui fait l'outil de résolution dans cette étude et qui est basé sur la méthode des éléments finis.

3. Modélisation des transferts hygrothermiques

3.1 Modèles existants

L'étude des transferts couplés de chaleur et de masse au sein des milieux poreux a préoccupé plusieurs domaines de recherche tels que les milieux capillaires des corps [112], les matériaux textiles [113], les matériaux granulaires [114], les matériaux rochers et sols [115] et les matériaux de construction notamment les matériaux issus de la filière bois. Ces derniers sont de plus en plus sollicités dans le domaine génie civil étant considérés comme des matériaux durables et économes en énergie [116-123].

En général, le comportement d'un matériau de construction lignocellulosique tel que le bois, connu par une structure poreuse, dépend fortement de ses propriétés thermo physiques voir hygroscopiques ainsi que de sa composition chimique [124]. En effet un matériau en bois contient une proportion volumique d'eau qui peut exister sous différentes phases. Cette quantité d'eau influe considérablement sur ses propriétés thermo physiques et sur sa forme géométrique. La première étude décrivant l'évolution d'humidité des matériaux de construction a été traitée par la méthode Glaser [125]. Ensuite, Steeman et al. [126] ont étudié la capacité de ces matériaux de restreindre les variations d'humidité intérieure. Néanmoins, si le taux d'humidité change au cours du temps, cela peut impliquer des destructions et des imperfections dans la structure du produit final ce qui met de ses propriétés dans certains cas, dépendantes de température et de la teneur en eau[127].

Pour ces raisons, il était particulièrement intéressant d'avoir une compréhension fondamentale de ces variables. Pour le variable humidité, le suivi de transfert de cette matière peut être décrit par plusieurs potentiels (teneur en eau, pression de vapeur, pression totale, pression capillaire). En effet, ce terme peut être pris sous plusieurs états physiques. Quelques modèles

le prennent sous forme eau liquide [128] où la présence de vapeur d'eau est négligée. D'autres auteurs considèrent uniquement la diffusion de vapeur d'eau et négligent ainsi la phase d'eau liquide [129].

Les distinctions entre les différents modèles produits dans la littérature résident essentiellement dans les moteurs de calcul choisis ainsi que les niveaux des hypothèses prises en considération. En effet, le choix de ces moteurs diffère d'un auteur à un autre. Mais, en général, selon Funk et Wakili [130], les différentes sortes de formulations mathématiques de transfert d'humidité sont équivalentes. La plus grande différence apparaît notamment au niveau du terme de pression qui est considérée dans certains et est négligée dans d'autres modèles.

Ainsi, les modèles de base des transferts couplés de chaleur et de masse peuvent être classés en deux catégories dont la première concerne les modèles où la température et la teneur en eau sont les deux moteurs principaux et la deuxième concerne les modèles dont le terme de pression est considéré.

Pour la première catégorie, elle peut se résumer dans les modèles proposés par Philip et De Vries (1957) [131]. Ces deux auteurs proposent que le transport de vapeur d'eau se fait par la loi de Fick et le transfert de liquide se produit selon la loi de Darcy. Dans certaines études, le transfert d'humidité est accompagné par un phénomène d'hystérésis [132]. Par exemple, Milly [133] a rajouté l'effet de ce phénomène au modèle de Philip sans prendre en considération la pression totale.

La deuxième catégorie se résume dans le modèle développé en 1966 par Luikov [134] qui a incorporé le terme de pression dans son modèle pour analyser les transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans un milieu poreux capillaire. Il suppose dans son modèle que pendant la période de séchage, un gradient de pression totale peut apparaître. Ce modèle a été utilisé par plusieurs chercheurs [135-136]. Lewis et Fegusun (1993) [137] ont confirmé la possibilité d'intégrer le moteur de pression dans les modèles de transfert couplé de chaleur et de masse, en expliquant ça par le mouvement d'infiltration de vapeur et de liquide dans le matériau. Ce terme a été aussi intégré par Fengzhi et al. [138] dans leur modèle pour le cas des textiles. Dans ce même contexte, Abahri et al. [116] ont évalué l'impact de ce terme sur la modélisation de comportement hygrothermique d'un matériau en bois.

Pour la résolution, certains auteurs ont résolu les équations des transferts couplés de chaleur et d'humidité par des approches analytiques, d'autres par des simulations numériques. Chang et al. [138] ont introduit un potentiel de fonction correspondant à son système d'équations, en

utilisant un changement de variables de gradient de température et de taux d'humidité. Ils ont utilisé la condition aux limites de type Neumann en comparant leurs résultats prédits avec ceux de Thomas et al.[139]. Crausse et al. [140] ont étudié deux modèles de calcul de distributions spatiales de température et de l'humidité au sein d'une paroi. Mendes et al. [141-142] ont proposé une nouvelle approche pour résoudre ce problème en décomposant les équations de transfert de chaleur et de masse en plusieurs sous systèmes d'équations. Alsaena et Zedan [143] ont recommandé une optimisation de l'épaisseur du matériau testé en utilisant la méthode des volumes finis. Talukdar et al. [144] ont décrit une installation expérimentale de transfert d'humidité transitoire (TMT) afin de mesurer en continu la température, l'humidité relative et l'accumulation d'humidité dans les milieux poreux hygroscopiques. Osanyintola et al. [145] ont évalué le comportement hygrothermique d'un isolant en bois en estimant l'effet des matériaux hygroscopiques sur la consommation d'énergie dans les bâtiments. La comparaison entre la solution analytique et numérique de chaleur et d'humidité dans les transferts de matériaux de construction poreux hygroscopique a été réalisée dans l'étude de Abahri et al. [116].

La plupart de ces modèles sont résolus pour des configurations à une dimension [116, 146-149, 151-155]. Peu d'études qui ont traité les transferts couplés dans les matériaux de construction pour des configurations en 2D [154] ou 3D [153]. R. Younsi [154] ont traité un cas en 3D de modélisation de transfert couplé de chaleur et de masse dans un matériau en bois dont le modèle mathématique proposé est basé sur la théorie de Luikov (1976)[155]. Ils ont également étudié l'effet des paramètres de transfert de chaleur et de masse à travers le nombre de Biot sur la chaleur et de l'humidité transfert. Il a été conclu que les paramètres adimensionnels régissant ont une importante influence sur la cinétique de transfert de chaleur et d'humidité. Dans ce même contexte, Mengahou.Q et al.[156] ont proposé une résolution en 2D pour un cas des matériaux poreux de construction afin d'évaluer la migration simultanée de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe. Une méthode numérique des volumes finis validée par des résultats expérimentaux a été introduite pour la résolution.

Dans ce travail, nous proposons une investigation numérique afin d'analyser ces transferts de chaleur et d'humidité dans un matériau de bois à l'aide du modèle couplé (HAM). Elle concerne la résolution bidimensionnelle des transferts de chaleur et d'humidité au sein des matériaux de construction poreux en utilisant des méthodes des éléments finis.

3.2 Cas d'étude

Dans cette étude, nous proposons d'étudier le phénomène de transfert couplé de chaleur et d'humidité dans un matériau de bois massif. Ce matériau est à la base poreux, composé d'une matrice solide formée des particules rigides, des pores qui peuvent être liés entre eux ou séparés. Ces espaces vides sont occupés par une teneur en eau en phase liquide ou gazeuse comme présentées sur le schéma suivant:

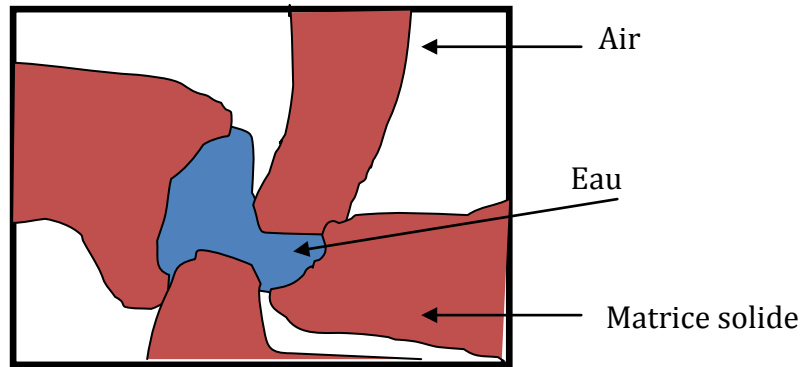


Figure II. 2: Structure d'un milieu poreux

Cette structure de nature poreuse a une grande influence sur les phénomènes de diffusion d'humidité dans le matériau. Le modèle proposé dans cette étude est basé sur la théorie de Luikov [5], qui prend en compte les termes de masse, d'air et le gradient de pression totale. Ainsi, un système dérivé de l'équation d'énergie (transfert de chaleur) et le bilan massique de la partie d'humidité présente dans le milieu est présenté dans ce modèle pour la configuration bidimensionnelle suivante.

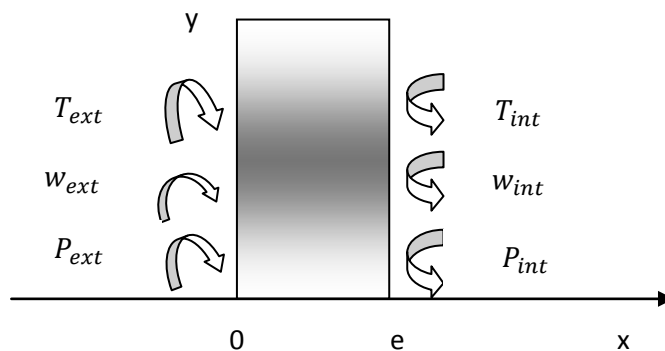


Figure II. 3: Configuration de cas d'étude en (2D)

Cette configuration présente un panneau en bois massif de 2,4 cm d'épaisseur, dont les propriétés physiques sont expérimentalement obtenues à partir des données de la littérature [32]. Ce milieu a été soumis aux différentes conditions aux limites. Certaines hypothèses ont été prises en compte afin d'établir le modèle mathématique:

- Le milieu poreux est supposé insaturé et indéformable.
- La matrice solide est supposée homogène et isotrope.
- Les réactions chimiques sont négligées.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligé.
- L'équilibre thermique hygroscopique local est établi et les différents états physiques présents (solides, liquides et gaz) sont dans un équilibre thermodynamique.
- La phase gazeuse obéit à la loi des gaz parfaits.

3.3.Équations de bilan

3.3.1 Equations de bilan massique

L'équation du bilan de masse est constituée de divers potentiels d'humidité qui traduisent le mouvement des différentes phases existantes dans les pores et le comportement hygroscopique du matériau. Dans ce cas, le bilan de masse contient la proportion d'eau dans ses deux formes: liquide et vapeur. Ces proportions se déplacent sous l'effet des forces capillaires pour le transfert de liquide et par diffusion pour la phase vapeur. Cependant, une partie de diffusion d'air sec dans les pores est également considérée dans le bilan de masse.

$$\text{- Phase liquide: } \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \nabla(J_l) = \dot{m} \quad (1)$$

$$\text{- Phase vapeur : } \frac{\partial \theta_v}{\partial t} + \nabla(J_v) = -\dot{m} \quad (2)$$

$$\text{- Air sec: } \frac{\partial \theta_a}{\partial t} + \nabla(J_a) = 0 \quad (3)$$

Dont θ_i représente la teneur en eau volumique de la phase i . Elle est donnée par la relation suivante: $\theta_i = \rho \cdot w_i$;

w_i est la teneur en humidité pour la phase i ; ρ $[kg / m^3]$ est la masse volumique de matériau et

$\dot{m} = \rho \chi \frac{\partial w}{\partial t} [Kg / m^3.s]$ est le ratio de changement de phase.

Ainsi, le bilan massique d'humidité peut être décrit par la somme de flux de liquide et de flux de vapeur :

$$J_m = J_l + J_v \quad (4)$$

Ce qui permet d'avoir le bilan massique suivant:

$$\frac{\partial(\theta_l + \theta_v)}{\partial t} + \nabla(J_l + J_v) = 0 \quad (5)$$

Avec, J_m le flux d'humidité totale [kg/m^2s], J_l est le flux liquide et J_v est le flux de vapeur d'eau.

3.3.1.1 Transport de la phase liquide

Le flux de la phase liquide est décrit par la Loi de Darcy:

$$J_l = -k_l \rho (\nabla w - \delta_l \nabla T) - \alpha_l \nabla P \quad (6)$$

dont $P = P_v + P_a$, est la pression totale [Pa];

k_l est le coefficient de perméabilité au liquide, δ_l est le rapport entre l'échange de masse de vapeur d'eau et l'échange de masse globale [—], α_l est le coefficient d'infiltration total d'humidité.

Dans le cas bidimensionnel, l'équation est décrite par l'expression suivante:

$$J_l = -k_l \rho \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} u_x + \frac{\partial w}{\partial y} u_y \right) + \delta_l \left(\frac{\partial T}{\partial x} u_x + \frac{\partial T}{\partial y} u_y \right) \right] - \alpha_l \left(\frac{\partial P}{\partial x} u_x + \frac{\partial P}{\partial y} u_y \right) \quad (7)$$

3.3.1.2 Diffusion de vapeur d'eau

De même que pour le flux de liquide, le flux de vapeur d'eau se déplace au sein des matériaux de construction poreux par diffusion. Il est régi par la loi de Fick tout en introduisant l'effet de la pression de vapeur et la pression d'air, selon le modèle de Luikov (1966):

$$J_v = -D \nabla \rho_v - \alpha_v \nabla P \quad (8)$$

dont α_v [$kg / m.s.Pa$] est le coefficient de filtration molaire de vapeur, ρ_v [kg / m^3] est la masse volumique de vapeur d'eau, D [m^2 / s] est la diffusivité molaire.

Le gradient de densité de vapeur $\nabla \rho_v$, peut être exprimé par la relation suivante, où le gradient de température apparaît dans l'expression de flux de vapeur :

$$\nabla \rho_v = \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial w} \right)_T \nabla w + \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right)_w \nabla T \quad (9)$$

A partir de cette relation, nous pouvons déduire l'expression de coefficient de diffusion de vapeur d'eau $k_v [m^2 / s]$, et le coefficient de thermo-gradient δ_v .

$$\begin{cases} k_v = D \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial w} \right) \\ \delta_v = D \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right)_w \bigg/ \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial w} \right)_T \end{cases} \quad (10)$$

Ainsi, la densité de flux de vapeur d'eau en 2D peut être décrite comme suit:

$$J_v = -k_v \rho \left[\left(\frac{\partial \omega}{\partial x} u_x + \frac{\partial \omega}{\partial y} u_y \right) + \delta_v \left(\frac{\partial T}{\partial x} u_x + \frac{\partial T}{\partial y} u_y \right) \right] - \alpha_v \left(\frac{\partial P}{\partial x} u_x + \frac{\partial P}{\partial y} u_y \right) \quad (11)$$

3.3.1.3. Transfert d'air sec

Dans les milieux poreux, le flux d'air peut être exprimé par la loi de Darcy, qui relie le gradient de pression à la vitesse de l'écoulement:

$$v = \frac{k_a}{\mu} \nabla P \quad (12)$$

Avec $v [m/s]$ est la vitesse de fluide, ∇P est le gradient de pression $[Pa/m]$. $\mu [Pa \cdot s]$ est la viscosité du fluide et $k_a [m^2]$ est la perméabilité intrinsèque du milieu.

Ainsi, l'équation d'équilibre de l'air sec est une fonction du gradient de pression totale qui peut être déterminée comme suit:

$$C_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div} \left(\alpha_p \left(\frac{\partial P}{\partial x} u_x + \frac{\partial P}{\partial y} u_y \right) \right) - \dot{m} \quad (13)$$

dont, $C_a = \frac{M}{\rho RT} \varepsilon (1 - S_l) [s^2 / m^2]$ est la capacité de stockage de l'air sec, $\varepsilon [-]$ est la porosité du milieu et $S_l [-]$ est le degré de saturation en eau.

3.3.2. Transfert de chaleur

L'équation de base de la conservation de l'énergie est donnée par la formulation suivante:

Variation totale temporelle = (ce qui entre - ce qui sort) de la surface + source de chaleur créé l'intérieur du volume.

Cette forme de conservation d'énergie est dérivée de l'équation générale de transfert de chaleur. Elle est expliquée par la présence du gradient de température, la densité de flux thermique et le terme source due à la chaleur latente de changement de phase.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(J_h) + Q \quad (14)$$

dont, $\rho [W / m.K]$ est la masse volumique du matériau, Q est le terme source et $J_h [J / m^2.s]$ est la densité de flux de chaleur qui est présentée par l'expression suivante:

$J_h = J_{cd} + J_{cv} [J / m^2.s]$; J_{cd} , J_{cv} sont respectivement les flux conductif et convectif de transfert thermique, $(J / m^2.s)$. Ainsi le terme de conduction est gouverné par la loi de Fourier et le terme de transfert convectif est établi à partir de l'étude de Crausse et al. [142] qui est présenté par la somme de chaleur latente créée par la vapeur et la chaleur sensible de changement de phase liquide-vapeur d'eau .

L'équation de chaleur, est ainsi généralisée comme suit:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} \left[-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} u_x + \frac{\partial T}{\partial y} u_y \right) + \delta_t \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} u_x + \frac{\partial \omega}{\partial y} u_y \right) + k_p \left(\frac{\partial P}{\partial x} u_x + \frac{\partial P}{\partial y} u_y \right) \right] - h_{lv} \quad (15)$$

3.3.3. Modèle résultant

Le modèle mathématique formulé par les principales variables (T , w , P) décrivant le transfert couplé de chaleur et de masse dans les milieux poreux, induit trois équations aux dérivées partielles non linéaires:

- Une équation de température T dérivant de l'équation d'équilibre énergétique;
- Une équation de teneur en humidité traduisant les deux équations de conservation de la quantité d'eau, sous ses deux états thermodynamiques (liquide et vapeur);
- Une équation de pression P obtenue à partir de l'équation de conservation de l'air sec.

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(\frac{\partial T}{\partial x} u_x + \frac{\partial T}{\partial y} u_y) + \delta_t(\frac{\partial \omega}{\partial x} u_x + \frac{\partial \omega}{\partial y} u_y) + k_p(\frac{\partial P}{\partial x} u_x + \frac{\partial P}{\partial y} u_y)) + h_{lv} \rho \sigma C_m \frac{\partial w}{\partial t} \\ \rho C_m \frac{\partial w}{\partial t} = \text{div}(k_w(\frac{\partial \omega}{\partial x} u_x + \frac{\partial \omega}{\partial y} u_y) + k_h(\frac{\partial T}{\partial x} u_x + \frac{\partial T}{\partial y} u_y) + \alpha_p(\frac{\partial P}{\partial x} u_x + \frac{\partial P}{\partial y} u_y)) \\ C_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(k_p(\frac{\partial P}{\partial x} u_x + \frac{\partial P}{\partial y} u_y)) + \rho \chi \frac{\partial w}{\partial t} \end{cases} \quad (16)$$

Ce modèle a été testé et validé, antérieurement, pour un cas à une dimension dans l'étude de Abahri et al. [33], où la contribution totale de pression pour le transfert a été examinée. Dans ce qui suit, nous proposons une solution numérique pour un cas à deux dimensions, tout en évaluant la sensibilité de ce modèle au dimension dans l'espace, au variabilité des paramètres ainsi qu'au couplage.

3.3.4. Conditions initiales et conditions aux limites

Dans ce travail, deux échelles d'étude et deux types des conditions aux limites ont été prises en considération. La première est à l'échelle du matériau, où les conditions aux limites de séchage du bois ont été fixées. La deuxième condition est à l'échelle de la paroi où les conditions d'ambiance d'un bâtiment sont considérées.

3.3.4.1 Conditions à l'échelle du matériau

Dans ce cas, des conditions de séchage de bois sont considérées. Initialement, le bois est soumis à des sollicitations hygrothermiques symétriques de température, d'humidité et de pression pour les deux côtés d'extérieur. Ces conditions sont présentées dans le tableau suivant:

Temperature (°C)	$T(x, y, t = 0) = T_0$	$T_0 = 10$
Teneur en eau (kg/kg)	$\omega(x, y, t = 0) = \omega_0$	$\omega_0 = 86$
Pression totale (Pa)	$P(x, y, t = 0) = P_0$	$P_0 = 101375$

Tableau II. 1: Les conditions initiales de séchage de bois

Les conditions aux limites sont décrites comme suit:

$$\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0, e} = h_h [T_{(0, t)} - T_a] + (1 - \chi) h_m (\omega_{(0, t)} - \omega_a) \quad (17)$$

$$k_m \frac{\partial \omega(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0,e} = h_m [\omega_{(0,t)} - \omega_a] \quad (18)$$

$$P(x=0, y, t) = 101475 \text{ Pa} \quad (19)$$

$$P(x=e, y, t) = 101325 \text{ Pa} \quad (20)$$

Avec: $T_a = 110^\circ\text{C}$; $\omega_a = 4^\circ\text{M}$

3.3.4.2 Conditions à l'échelle du paroi

Dans ce cas, nous avons étendu l'étude dans les conditions d'ambiance d'une paroi. Ces conditions sont similaires aux conditions expérimentales données dans l'étude de Trabelsi et al. [159]. Les conditions initiales et aux limites sont décrites comme suit:

$T(x_{(0,e)}, y, t = 0) = T_0$	$T_0 = 5^\circ\text{C}$
$\omega(x_{(0,e)}, y, t = 0) = \omega_0$	$\omega_0 = 75^\circ\text{M}$
$T(x = 0, y, t) = T_{\text{int}}$	$T_{\text{int}} = 23^\circ\text{C}$
$T(x = e, y, t) = T_{\text{ext}}$	$T_{\text{ext}} = 5^\circ\text{C}$
$\omega(x = 0, y, t) = \omega_{\text{int}}$	$\omega_{\text{int}} = 45^\circ\text{M}$
$\omega(x = e, y, t) = \omega_{\text{ext}}$	$\omega_{\text{ext}} = 98^\circ\text{M}$

Tableau II. 2: Conditions initiales et aux limites d'ambiance climatique

3.4. Résolution numérique

3.4.1 Méthodes des éléments finis

La résolution du modèle proposé a été effectuée via le logiciel de calcul numérique COMSOL Multi physique qui est un outil dédié à la modélisation et à la résolution d'une variété des problèmes physiques où plusieurs phénomènes peuvent être étudiés simultanément dont notre cas des transferts couplés de chaleur et d'humidité. La résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) est effectuée par la méthode des éléments finis.

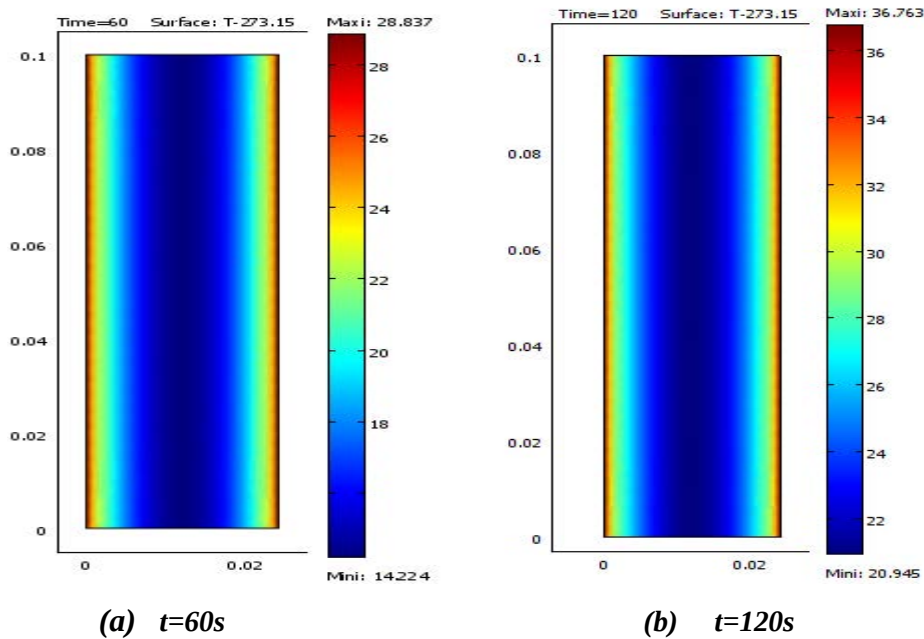
Cette méthode est considérée l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou non stationnaires) définis dans un domaine géométrique à une, deux ou trois dimensions et permet de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles sur un domaine compact. On parle couramment de

conditions de type Dirichlet (valeurs aux bords), Neumann (gradients aux bords) ou Fourier (relation gradient/valeurs aux bords) [157].

La méthode consiste à découper, le domaine spatial en sous- domaines appelés éléments. Sur chaque élément, la grandeur inconnue est approchée par une fonction simple d'un espace de fonctions de dimensions finies à support local. Cette technique permet un choix très vaste en ce qui concerne la forme de l'élément (triangle, quadrangle,...). C'est une méthode basée sur une formulation intégrale des équations plutôt que sur leur forme différentielle, et sur le choix des espaces fonctionnels [157].

3.4.2 Evaluation du modèle en 1D et 2D

Dans cette partie, une évaluation du modèle proposé pour deux cas de dimensions. Les configurations en 2D pour le cas de séchage du bois sont présentées dans la figure (II.4) et les comparaisons des résultats numériques 1D et 2D au centre et à la surface de la plaque en bois sont illustrées dans les figures qui suivent pour les différents cas des conditions aux limites.



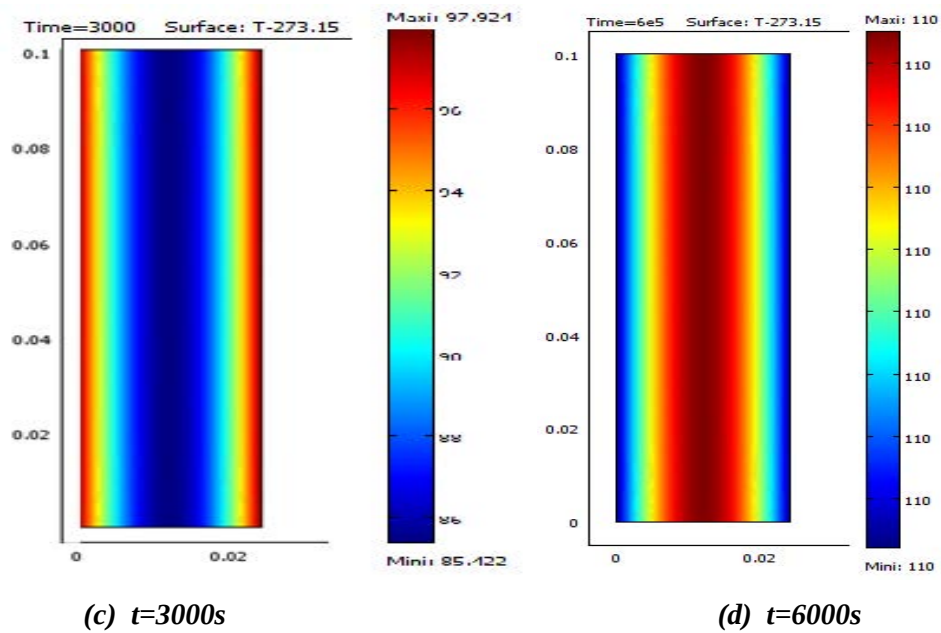


Figure II. 4: Distributions de température à la surface du matériau pour des différents temps

Ces figures illustrent respectivement les distributions de température dans l'échantillon de bois massif pour des différents moments. Ainsi, nous remarquons que la répartition de la température évolue rapidement au début, puis devient stable. Pour les deux premières minutes, nous constatons un fort gradient de température, ce qui explique la cinétique de séchage dans les matériaux en bois. Après deux minutes, une apparition symétrique d'une couche fine (couleur orange) sur les deux côtés de la plaque de bois. Ces couches correspondent à une température moyenne de 90 °C. Après, la différence de température entre la zone intérieure et la zone extérieure diminue de plus en plus jusqu'à qu'elle atteigne son état d'équilibre à 110 °C.

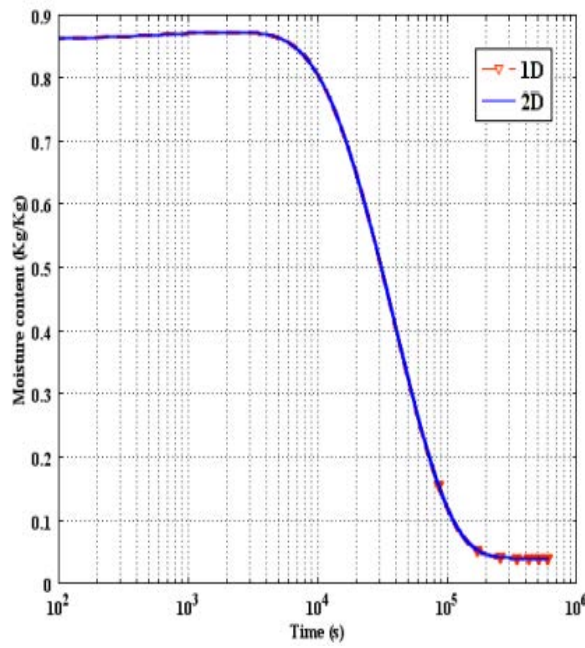


Figure II. 5: Variation de teneur en eau au centre du matériau

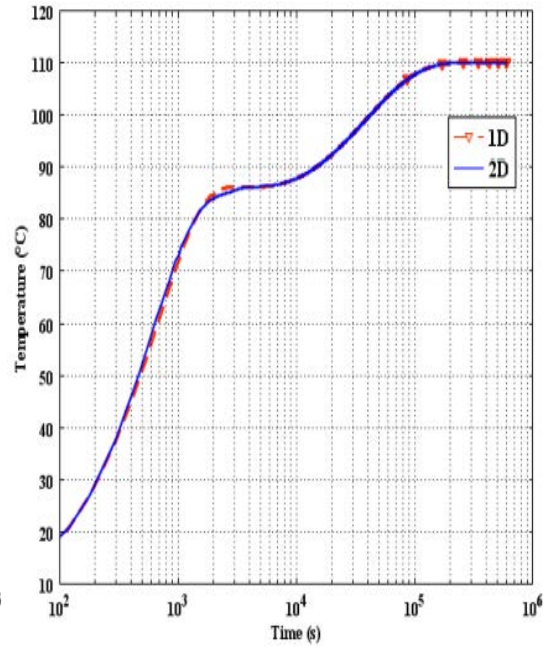


Figure II. 6: Variation de température au centre du matériau

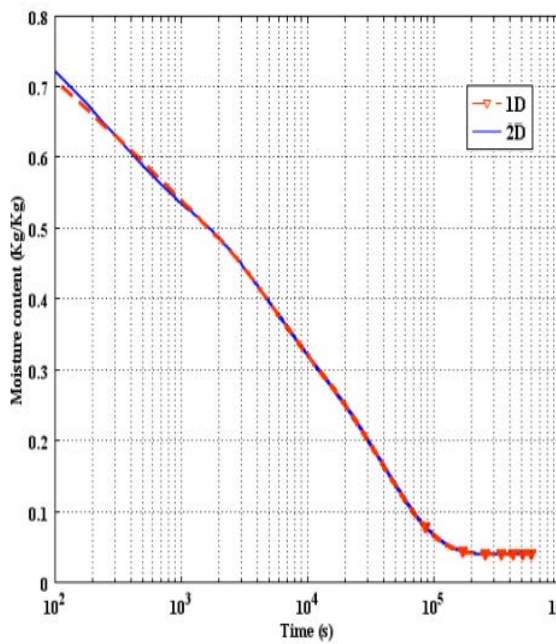


Figure II. 7: Variation de teneur en eau à la surface du matériau

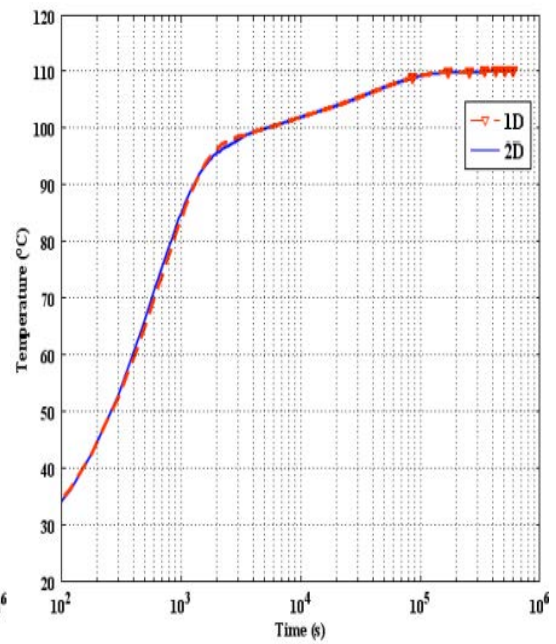


Figure II. 8: Variation de température à la surface du matériau

La résolution du modèle de transfert couplé de chaleur et d'humidité dans un matériau en 1D et 2D pour des conditions de séchage de bois, donne presque le même résultat. En effet, à partir de ces quatre figures, nous constatons qu'il y a une vraie coïncidence entre les profils de

température et la teneur en eau. Cette confrontation est indiquée pour les profils, soit au centre ou même à la surface du matériau.

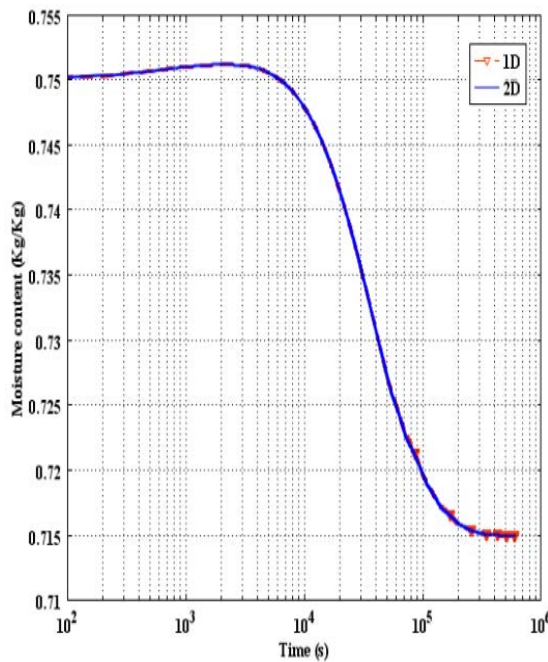


Figure II. 9: Variation de teneur en eau au centre du matériau

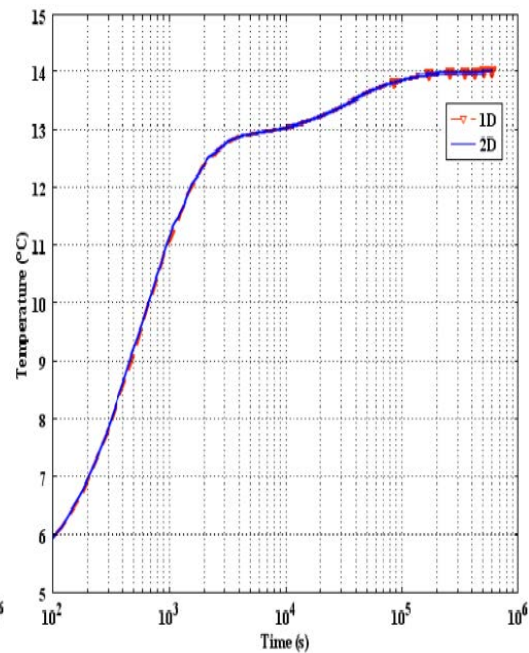


Figure II. 10: Variation de température au centre du matériau

Bien que ces résolutions ont été fait pour une configuration en 2D, ces figures montrent qu'il n'y a pas de variabilité spatiale entre l'évolution de la température et de la teneur en eau au sein du matériau pour les deux cas de dimensions étudiées. En effet, la condition de convection est supposée homogène sur toute la hauteur des surfaces de matériaux ce qui n'est toujours représentatif des conditions réelles de construction. Dans ce contexte, Younsi et al. [154] ont déjà étudié un cas de modélisation en 3D pour un matériau de bois. Ils ont également constaté que le comportement hygrothermique pour une modélisation en 3D est pratiquement le même que le cas 1D.

En revanche, cette constatation a été obtenue pour des cas de coefficients convectifs thermique et massique constants, ce qui ne représentent pas vraiment les conditions aux limites réelles d'un bâtiment.

Ainsi, dans la présente étude, nous avons testé l'effet convectif réel par la prise en compte de la variabilité de ce coefficient en fonction de la hauteur de la paroi. Cette variabilité est représentée par le nombre de Nusselt. Il est fonction du nombre de Reynolds, le nombre de Prandtl et H qui est la hauteur du matériau étudié:

$$Nu_y = f\left(\frac{y}{H}, Re_y, Pr\right)$$

$$Nu_y = \frac{h'_h \cdot y}{\lambda_{air}} \quad (21)$$

$$h'_h = \frac{\lambda \cdot Nu_y}{y} \quad (22)$$

Ainsi, les nombres de Nusselt et de Reynolds sont calculés par les relations suivantes:

$$Nu_y = 0.332 \sqrt{Re_y} \sqrt[3]{Pr} ; \quad Re_y = \frac{\rho_{air} v_{air} H}{\nu_{air}}$$

$$h'_h = \frac{\lambda_{air} (0.332 \sqrt{\frac{\rho_{air} v_{air} H}{\nu_{air}}} \sqrt[3]{Pr})}{y} \quad (23)$$

Dans ce cas, une plaque de bois massif avec une température de surface constante est soumise à un flux de chaleur convectif varié pour le long de la hauteur du panneau au cours du processus de séchage. Les autres surfaces sont soumises à une des conditions aux limites où le coefficient de convection thermique demeure constant. La température de séchage a une valeur de 110°C et le débit d'air est considéré comme laminaire. Les conditions aux limites pour le cas de séchage de bois peuvent être réécrites comme suit:

$$\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = h'_h [T_{(0,t)} - T_a] + (1 - \chi) h_m (\omega_{(0,t)} - \omega_a) \quad (24)$$

$$\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=e} = h'_h [T_{(0,t)} - T_a] + (1 - \chi) h_m (\omega_{(0,t)} - \omega_a) \quad (25)$$

Dans ces conditions, les variations de température et de teneur en eau sur la position verticale (hauteur du matériau) sont présentées sur les figures (II. 11) et (II. 12), respectivement.

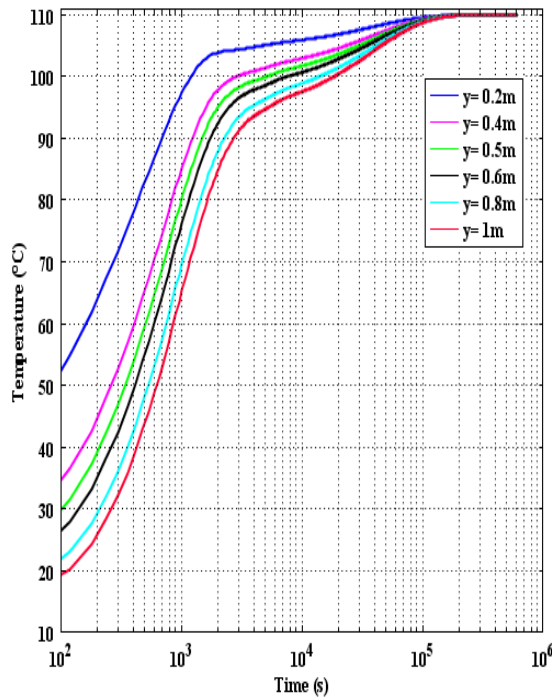


Figure II. 13: Variation des profils de température sur la verticale (y)

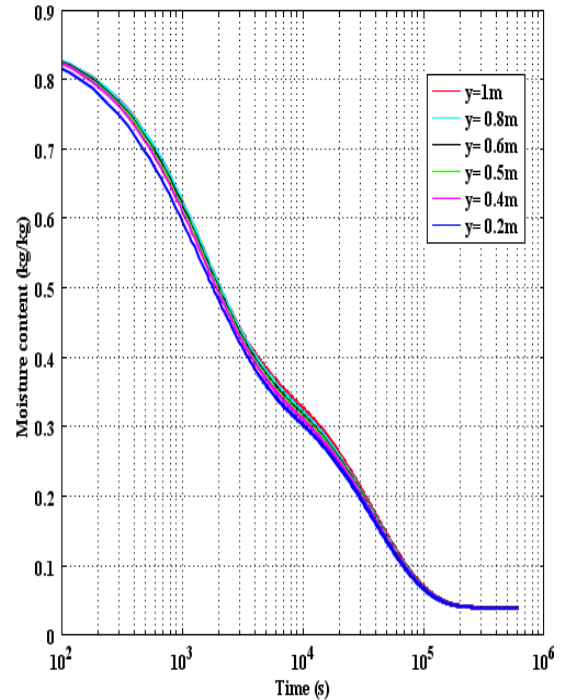


Figure II. 14: Variation des profils de teneur en eau sur la verticale (y)

Nous constatons à partir de ces deux figures, que le profil de température dépend fortement de la position verticale (y). En effet, la température est élevée au niveau des points proches de ($y=0$), puis elle diminue progressivement en se rapprochant de la hauteur maximale de la plaque de bois. L'effet de convection est donc localisé plutôt sur la surface, ce qui n'est pas le cas pour la teneur en eau où nous remarquons des légères variations de ces profils qui sont dues à une légère affectation par le couplage dans le modèle.

3.5. Etude de sensibilité du modèle

Dans la partie précédente, nous avons considéré que tous les paramètres du modèle HAM sont constants. Dans cette partie, nous proposons d'évaluer l'impact de la variabilité des paramètres et l'effet du couplage dans le modèle sur le comportement hygrothermique du matériau.

Ainsi dans cette partie, nous nous intéressons à étudier le cas 2D de la même configuration monocouche précédente constitué d'une plaque en bois massif de 2,4 cm d'épaisseur. Les mêmes conditions aux limites à l'échelle de la paroi ont été conservées. Deux paramètres sont ainsi analysés et considérés comme des variables: la conductivité thermique et le coefficient de diffusion de l'humidité.

3.5.1. Influence des différents paramètres

En réalité, la conductivité thermique est un paramètre variable qui dépend de l'humidité relative et de teneur en eau [46]. De même, le coefficient de diffusion d'humidité est considéré comme variable en fonction de la teneur en eau. Ainsi, ces deux coefficients sont exprimés comme ci-dessous [159]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda = \lambda_0 + 0.475.\theta \\ D_m = D_0(-18,14.10^{-4}\omega + 1) \end{array} \right. ; \text{Dont} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_0 = 0.107(W / m.K) \\ \theta = \frac{\rho}{\rho_{eau}}\omega \\ D_0 = 2.61.10^{-5}(m^2 / s) \end{array} \right.$$

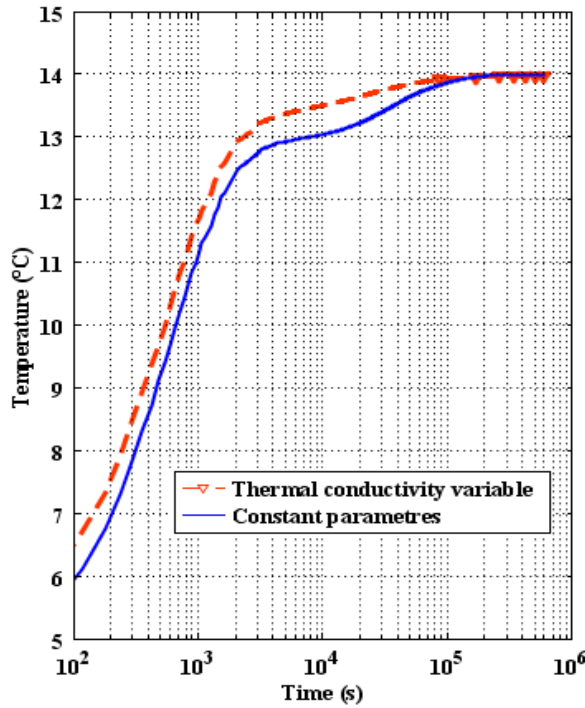


Figure II. 15: Evolution de température en $x=0.012m$

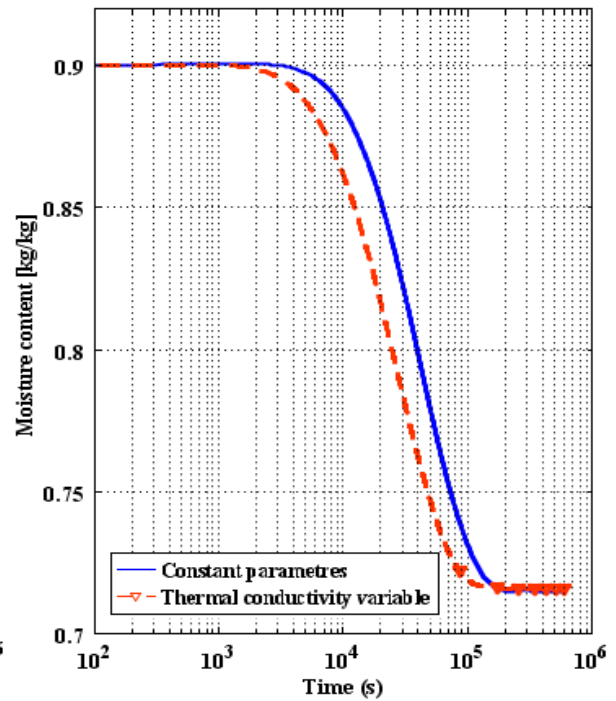


Figure II. 16: Evolution de teneur en eau en $x=0.012m$

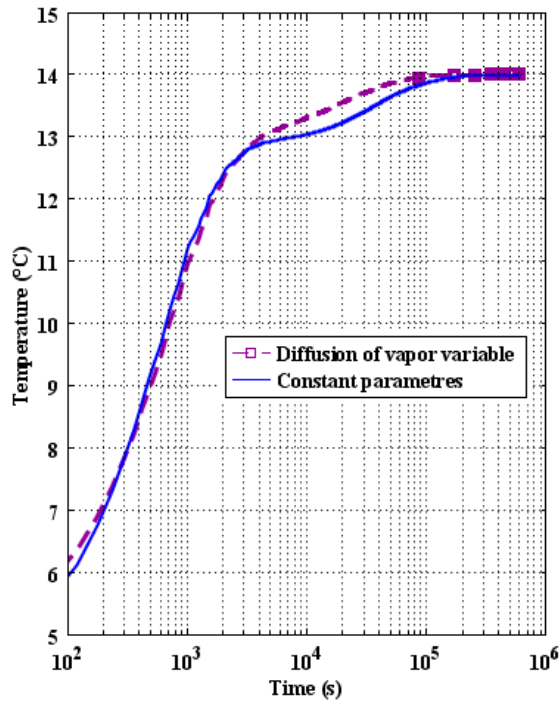


Figure II. 17: Evolution de température en $x=0.012\text{m}$

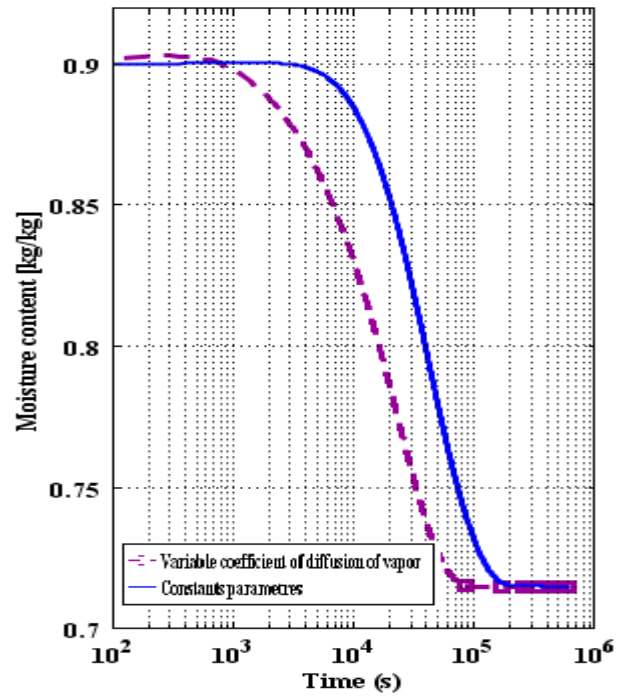


Figure II. 18: Evolution de teneur en eau en $x=0.012\text{m}$

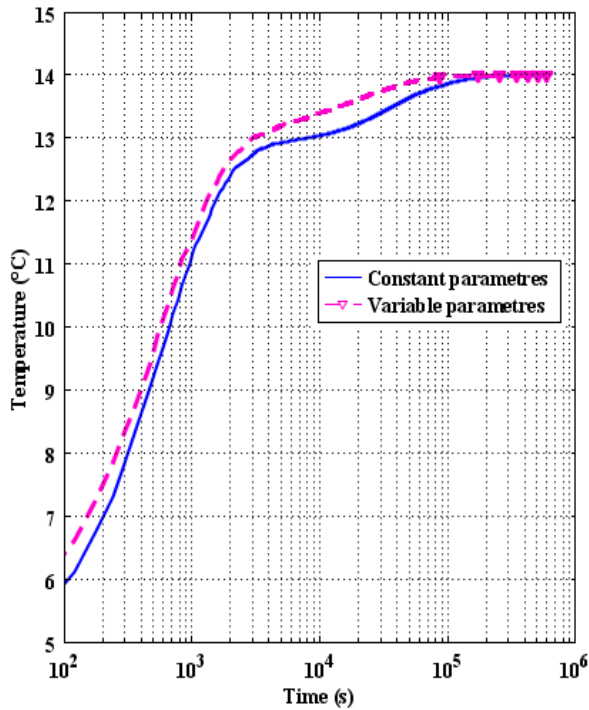


Figure II. 19: Evolution de température en $x=0.012\text{m}$ pour des paramètres constants et variables

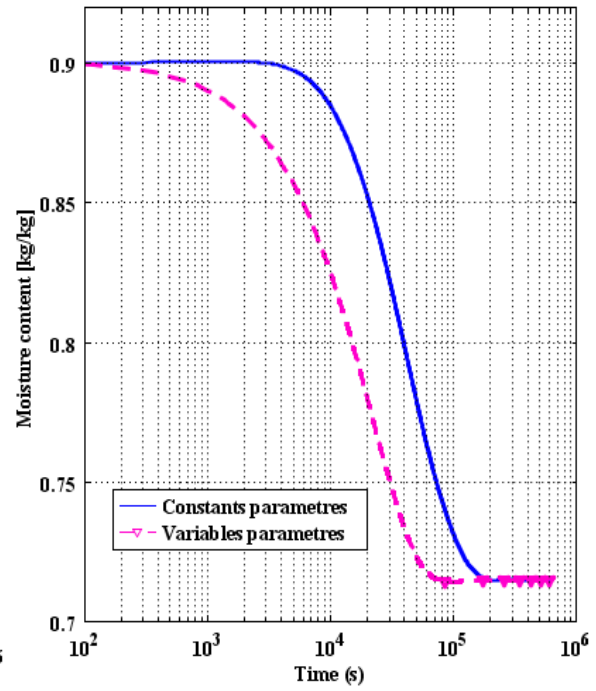


Figure II. 20: Evolution de teneur en eau en $x=0.012\text{m}$ pour des paramètres constants et variables

Ces figures montrent une différence notable entre les profils de température et de teneur en eau au cours de l'évaluation des paramètres lorsqu'ils sont considérés constants ou variables. En ce qui concerne la sensibilité à la conductivité thermique, un léger impact sur le transfert hygrothermique a été observé. En effet, ce paramètre est fortement dépendant de la teneur en eau des matériaux. Ainsi sur la figure (II.15), en tenant en compte de la présence d'une telle quantité d'eau dans le matériau, nous remarquons que ce dernier devient plus conducteur ce qui implique une cinétique de température plus importante par rapport à celle où la conductivité est considérée constante.

Par contre, la figure (II.16), montre que le profil de teneur en eau est plus faible dans le cas où la conductivité thermique est variable. En effet, au début le profil de teneur en eau est presque le même que pour le cas d'une conductivité thermique constante, jusqu'à la valeur de 10^3 s. A partir de cette valeur, la teneur en eau diminue dans le cas d'une conductivité variable. La teneur en eau est également affectée lorsque nous avons considéré la variabilité du coefficient de diffusion d'humidité telle que représentée sur la figure (II.18). En effet, nous observons que ce coefficient ne perturbe que légèrement le transfert thermique selon les profils de température obtenus dans la figure (II.19). En ce qui concerne la prédiction de l'évolution de la teneur en eau, la figure (II.20) montre qu'elle est fortement affectée par la prise en compte la variabilité des termes de conductivité thermique et de coefficient de diffusion de la vapeur.

3.5.2. Influence de couplage

Dans cette partie, nous avons évalué l'impact du couplage sur la prédiction des transferts hygrothermiques. Ainsi, nous discutons dans ce cas, le comportement hygrothermique du matériau lorsque nous considérons les moteurs de modèle HAM sont couplés. Dans ce cas, tous les termes du modèle sont prises en compte et dépendants les uns aux autres. Cependant, dans le cas de découplage des conditions de couplage ne sont pas prises en compte dans les équations du modèle.

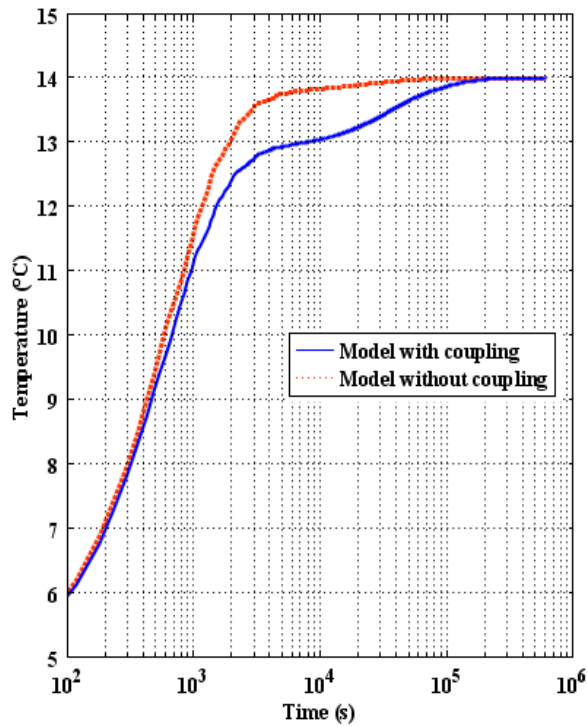


Figure II. 21: Sensibilité de température au couplage du modèle

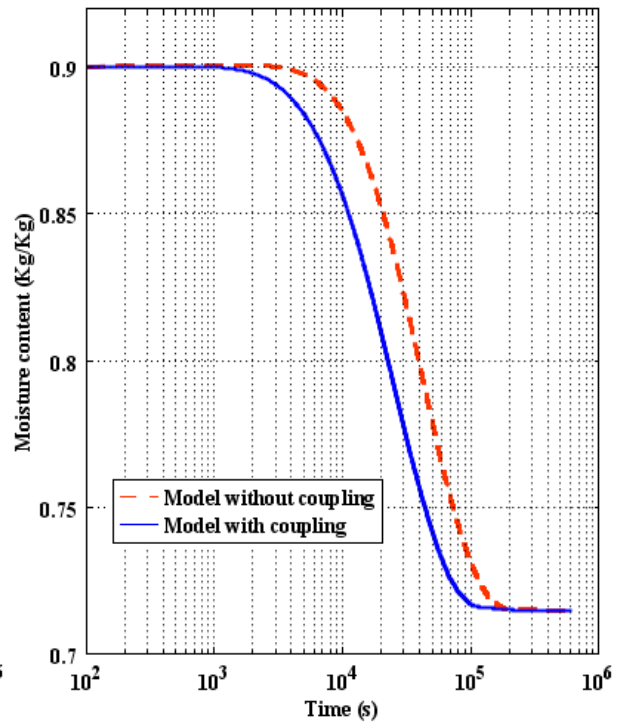


Figure II. 22: Sensibilité de teneur en eau au couplage du modèle

A partir de ces deux figures, nous constatons que le couplage affecte l'évolution de la teneur en eau et la température. Concernant le moteur de transfert température, le modèle couplé contribue à stabiliser le matériau et à maintenir des gradients thermiques plus bas. De même, pour l'évolution et de teneur en eau, le modèle couplé donne un bon résultat afin de ne pas atteindre des valeurs plus élevées que dans le cas de modèle non-couplé. Ces valeurs plus élevées en cas de modèle non couplé perturbent le comportement hygrothermique du matériau.

4. Conclusion

Ce chapitre présente une analyse numérique pour le transfert couplé de chaleur et d'humidité dans un matériau poreux à base de bois. Une configuration en 2D a été traitée afin de décrire les processus de migration de chaleur et d'humidité dans une plaque en bois massif. L'effet de la résolution 2D est seulement apposé lorsque nous avons pris en compte la dépendance des conditions aux limites sur l'axe vertical.

La sensibilité du modèle a été traitée dans une deuxième étape, dont une analyse de variabilité des deux coefficients moteurs de diffusion thermique et massique a été effectuée. Les résultats de simulation montrent que la conductivité thermique et la diffusion du vapeur d'eau affectent

la migration de l'humidité dans l'enveloppe du bâtiment par la contribution des termes couplés dans les équations aux dérivées partielles et ils affectent un peu moins le profil de température. La sensibilité du modèle au couplage a été aussi procédée. Ainsi la prise en compte du couplage dans le modèle entre les différents moteurs de transfert donne des résultats plus fiables que dans le cas de découplage.

Le matériau testé dans cette analyse numérique est considéré homogène dont le seul composant est le bois. Ainsi pour un cas d'un composite hétérogène où les propriétés thermophysiques prennent en compte les différents constituants de mélange, le modèle ne sera plus applicable qu'après la prédiction des propriétés thermophysiques équivalentes de ce type de matériau. Pour cela, dans la suite de ce travail, l'étude se focalise sur un cas d'un composite bois-ciment dont la prédiction de ses propriétés thermophysiques équivalentes est l'objectif souhaité.

Chapitre 3

Etude de faisabilité et de développement d' une filière des éco matériaux dans un contexte transfrontalier

1.Introduction

Le travail de ce chapitre s'inscrit dans le cadre du projet ECOTRANSFAIRE (Projet InterReg VI A) qui a pour but le développement de la construction et la rénovation énergétique, à l'aide des éco-matériaux dans la grande Région (Sarre-Lorraine-Wallonie-Luxembourg). Il s'agit d'un exemple d'analyse pratique pour avoir un aperçu couplant les sciences de l'ingénieur et le développement socio-économique sur un territoire transfrontalier (France, Luxembourg, Belgique). Le projet opère sur un territoire donné (d'un rayon de 30Km en moyenne) abritant trois campus universitaires (ULG, LIST, IUT). Dans le cadre de ce projet, les universitaires ont été sollicités pour deux types d'étude: l'harmonisation de la réglementation thermique entre les pays concernés et la définition des critères scientifiques pour la sélection d'éco-matériaux prometteurs dans cette région. L'analyse nous a conduit à identifier huit matériaux prometteurs. Ainsi une évaluation de leurs réponses thermohydriques par le test expérimental MBV (Moisture Buffer Value) a été effectuée. Dans cette partie, nous proposons une méthodologie expérimentale de caractérisation des propriétés hygrothermiques des éco-matériaux sélectionnés.

2. Projet ECOTRANSFAIRE

2.1. Présentation et localisation du projet

Le projet "ECOTRANSFAIRE" s'inscrit dans le programme «Interreg IV-A Grande Région», cofinancé par l'Union européenne, qui a pour objectif principal la création d'une coopération transfrontalière dans l'éco-rénovation et la construction durable, dans une partie de la Grande Région, définie par les trois régions présentées sur la carte ci-dessous:



Figure III. 1: Carte géographique concernée par le projet ECO TRANSFAIRE

L'objectif est de renforcer les capacités des entreprises à favoriser l'utilisation des éco-matériaux performants produits localement, dans le domaine de construction. Ainsi que

d'analyser la faisabilité et de modéliser la création de filières locales de production des matériaux écologiques.

2.2. Grande Région

La Grande Région s'agit d'un Groupement Européen de Coopération Territoriale (GECT), regroupant le Grand-duché de Luxembourg, la Lorraine, la Sarre, la Rhénanie-Palatinat, la Wallonie et la Communauté française et germanophone de Belgique. Ainsi, cette plateforme géographique regroupe des divisions territoriales de quatre pays, situées entre le Rhin, la Moselle, la Sarre et la Meuse, pour une superficie totale de 65.401 km² [160].

ECOTRANSFAIRE concerne uniquement une partie de cette région, qui est plus particulièrement le sud de la province de la Belgique, l'ensemble du Grand-duché de Luxembourg et la Lorraine française. Parmi les objectifs opérationnels de cette grande région est d'évaluer le potentiel de développement de nouvelles filières (nouveaux matériaux - produits de construction, gestion des déchets, etc.) dans le périmètre délimité par le projet, en y associant notamment les entreprises d'insertion. La création de cette filière doit donc se faire en accord avec les trois piliers du développement durable: l'économique, l'environnemental et le social.

Afin de répondre à ces besoins, le travail était collaboré entre trois sites universitaires: l'ULG Campus Arlon (BELGIQUE.), le Centre de Recherche Public Henri Tudor, aujourd'hui LIST (LUXEMBOURG.) et l'Université de Lorraine, IUT de Longwy (FRANCE.). Ainsi, des mises en commun et des études comparatives entre les réglementations thermiques et les gisements des matériaux de chaque région des trois pays sont régulièrement réalisées.

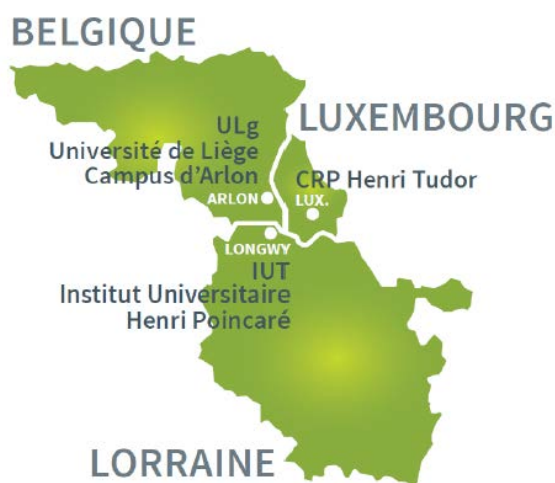


Figure III. 2: Cartes des partenaires universitaires transfrontalières

2.3. Enjeux et objectifs:

2.3.1. Mobilisation

Tout bâtiment génère des pertes d'énergie qui quantifient son niveau de performance énergétique. Ainsi, il est important de chercher à réduire ces pertes coûteuses en améliorant ce critère. Face de constater que le mode opératoire pratiqué et les matériaux isolants habituellement utilisés dans le bâtiment ancien à rénover n'offrent qu'un médiocre compromis entre la réduction significative des pertes d'énergie générées par ce bâtiment et la diminution de son niveau de confort. Ceci étant dû, par exemple, à la perte de surface habitable consécutive à la pose d'une épaisseur excessive d'isolant. La volonté d'améliorer la performance énergétique d'un bâtiment dans le cadre de sa rénovation est une décision subordonnée au niveau du gain financier est comptée et générée par cette action.

Ainsi, la qualité environnementale d'une construction (neuve ou rénovée) est basée sur la prise en considération des trois piliers du développement durable durant son cycle de vie. En effet, la réduction des impacts environnementaux et le maintien d'une ambiance intérieure agréable, compatible avec la notion du confort thermique est pratiquement liée à la viabilité économique tout en s'appuyant sur un équilibre social.

2.3.2. Construction durable

Le concept de construction durable repose sur la recherche des bâtiments présentant un équilibre entre trois piliers: écologique, économique et social [161]. C'est à dire, un bâtiment qui répond à ces trois critères doit avoir un minimum de consommation d'énergie, fabriqué à partir des éco-matériaux respectueux à l'environnement qui permettent d'offrir un climat intérieur sain et confortable pour ses occupants, avec un coût de construction et d'entretien faible.

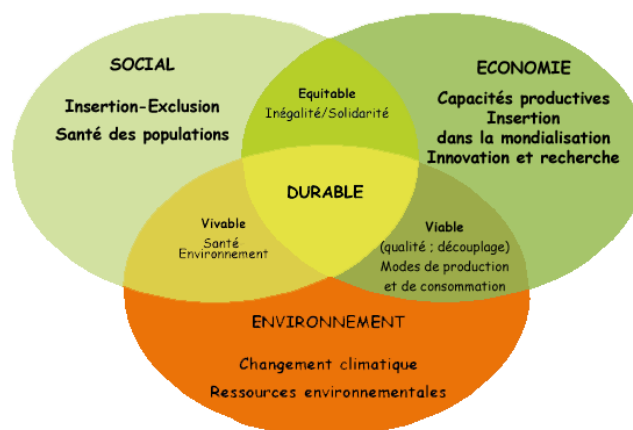


Figure III. 3: Les trois piliers du développement durable

- **Aspects environnementaux:**

- Vérifications climatiques: effet de serre, acidification, destruction de la couche d'ozone
- Biodiversité: pollution due aux engrais, conservation de la biodiversité ...
- Matières première: origine et utilisation des matériaux, gestion des déchets...

- **Aspects sociaux:**

- Bien-être des occupants: confort thermique, climat intérieur sain,
- Accessibilité: bâtiments et alentours, accès aux transports...
- Qualité esthétique du bâtiment

- **Aspects économiques:**

- Financement et gestion: analyse des fonctions d'utilisation, analyse des risques...
- Valeur du cycle de vie : coûts du cycle de vie, coût du bâtiment, valeur d'entretien...
- Utilisation de produits et de services fabriqués au niveau local ..;

Dans ce cadre, le projet ECOTRANSFAIRE a proposé un processus d'analyse qui permet d'évaluer l'utilisation d'un matériau selon ces trois critères. L'objectif était de développer des filières de production et de vente d'éco matériaux de construction en circuits courts. L'analyse de cycle de vie du matériau qui prend en compte toute la chaîne depuis l'extraction des matières premières jusqu'à son vieillissement est l'un des indicateurs d'aspect environnemental.



Figure III. 4: Cycle de vie idéale d'un matériau de construction

3. Etudes des matériaux disponibles et en cours de développement sur la Grande Région

3.1. Les éco-matériaux

Dans le secteur de bâtiment, les matériaux biosourcés de nature écologique dites aussi "éco-matériaux" sont connus par une basse consommation en énergie grise, par rapport à celle dégagée des matériaux dites "classiques". Ainsi, les émissions de gaz à effet de serre sont réduites et l'offre des bâtiments plus sains qui respectent la biosphère de notre environnement est de plus en plus atteint.

Par conséquent, le choix d'un matériau de construction doit être effectué en fonction de plusieurs critères d'impact environnemental, pour être classé dans la catégorie des «éco-matériaux». Il peut être issu de différentes matières premières naturelles (végétales, animales ou minérales). Ainsi, il dispose des ressources renouvelables et aussi locales de préférence, avec un minimum d'émission d'énergie grise.

Dans ce cadre, le projet ECOTRANSFAIRE a fixé deux Indicateurs généraux pour comparer et analyser les matériaux proposés dans cette étude :

- o IEnv = impacts environnementaux par m³ de matériau : Les impacts sont d'autant plus importants que l'indicateur est élevé ;
- o IPrim = impact en énergie primaire non-renouvelable, MJ/m³produit: Plus la valeur est faible, plus le produit est écologique.

3.2.Méthodologie d'analyse

Une méthodologie d'analyse a été définie et suivie afin d'identifier une chaîne des éco-matériaux disponibles et qui peuvent être développés dans cette région. Quatre étapes ont été parcourues pour cet objectif:

- Sélection des éco-matériaux susceptibles d'être analysés et les classer par catégorie. (La liste initiale des matériaux étudiés est détaillée en Annexe III.1)
- Etude de chaque catégorie par le développement d'une fiche technique pour chaque matériau. (Le modèle des fiches techniques est en Annexe III.2)
- Attribution d'une note d'analyse pour chaque matériau dans chaque catégorie.
- Sélection des éco-matériaux qui pourraient être développés sur le marché local de la construction.

Dans l'ordre, pour obtenir une propre exécution de cette tâche, le travail a été divisé en plusieurs phases :

La première était un examen préliminaire pour éliminer les répétitions de certains matériaux. Ensuite, une réorganisation et une reformulation plus claire de différentes catégories a été procédée. À ce stade, une première sélection a été effectuée pour retenir un total de 195 matériaux. Après avoir identifié ces 195 matériaux disponibles, et pour affiner cette liste de manière plus approfondie: un sondage a été crée et mis en ligne auprès des professionnels de (belge, français et luxembourgeois) dans le secteur de la construction.

Le questionnaire commence par une note explicative sur le fonctionnement et le but de l'enquête. Pour chaque matériau, le répondeur peut choisir entre cinq réponses possibles. Cette analyse est présentée dans le tableau ci-dessous, et les résultats de cette enquête sont présentées dans la figure qui suit.

Potentiel de matériau	Note accordée
Très intéressant	3
Intéressant	2
Pas intéressant	1
Hors catégorie	0
Aucune idée	-

Tableau III. 1: Notes d'évaluation des matériaux analysés

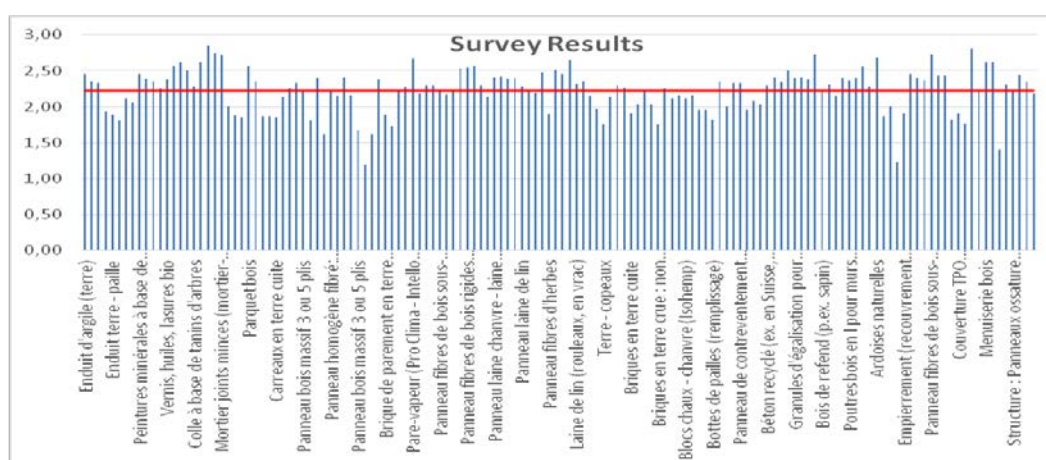


Figure III. 5: Résultats de l'enquête

3.4. Résultats: Produits pouvant potentiellement être développés sur un marché local (Grande Région)

Suite aux résultats de l'enquête et à un tri final qui a été fait dans le cadre d'un colloque, il était convenu de garder huit matériaux candidats comme matériaux prometteurs dans la Grande Région :

- La Ouate de cellulose,
- La laine et fibres de chanvre,
- Le béton de chanvre,
- Bois de construction,
- Botte de Paille,
- Panneau fibres textiles recyclés,
- Ciment écologique
- Le béton en bois

Cette liste peut être classée en deux grandes catégories, les matériaux homogènes qui ont été assez étudiés dans la littérature et les matériaux de structure plus complexe et de nature hétérogène (béton en bois) qui font le sujet de cette étude.

4. Etude hygrothermique

4.1. Classification et catégories des matériaux d'étude

Après l'identification de gisement des éco matériaux disponibles sur le territoire considéré au cours du projet, une analyse comparative des performances hygrométriques de quelques matériaux de construction est présentée dans ce qui suit. Dans notre analyse, on a catégorisé deux sortes de familles des matériaux pour la comparaison: une famille des panneaux de bois et une famille des matériaux fibreux. L'un de nos objectifs est de comparer un matériau hétérogène qui est un composite bois-ciment à chaque famille des matériaux afin de connaître et d'analyser son comportement hygrothermique. les deux familles des matériaux de comparaison sont présentées dans le tableau suivant:

Famille des panneaux de bois	Famille des matériaux fibreux
Panneau en Placo	Panneau des fibres de chanvre
Panneau Placo hydrofugé	Panneau des fibres de bois
Panneau aggloméré	Panneau d'ouate de cellulose
Panneau OSB	Panneau fibres des textiles recyclés

Tableau III. 2: Classification des matériaux d'étude

En face de ces deux familles, un panneau composite faisant un mélange de bois et du ciment, est mis en comparaison avec ces différents types de matériaux par une caractérisation hydrique. En effet, ce type de caractérisation repose sur l'exploitation en régime permanent pour mesurer les isothermes de sorption et la perméabilité à la vapeur, ou sur des mesures en régime dynamique telles que la mesure de la valeur tampon hydrique MBV (Moisture Buffer Value) qui permet d'accéder à la qualité de régulateur hydrique d'un matériau et qui fait la méthode de caractérisation utilisée dans notre test d'étude.

4.2. Valeur du tampon hydrique (MBV)

La valeur du tampon hydrique connue par le terme anglais «Moisture buffer value (MBV) » a été mise en place par le projet NORDTEST afin de déterminer la valeur de la capacité tampon hydrique (VCTH) des matériaux. Elle indique la quantité d'eau absorbée ou résorbée lorsque le matériau est soumis à une variation d'humidité relative extérieure et pour un temps donné [162]. Le projet NORDTEST définit un cycle dynamique, de période 24h, dans lequel l'humidité relative est fixée à 75% pour 8h ensuite à 33% pour les 16h qui suivent [163]. Lorsque l'épaisseur du matériau est supérieure à la profondeur de pénétration hydrique sous les conditions journalières, la VCTH est indépendante de l'épaisseur du matériau et de l'amplitude de variation de l'humidité relative. Une classification des matériaux a été proposée par le Nordtest Project qui est montré sur la figure suivante et qui permet d'évaluer la performance d'un matériau en fonction de sa valeur de MBV.

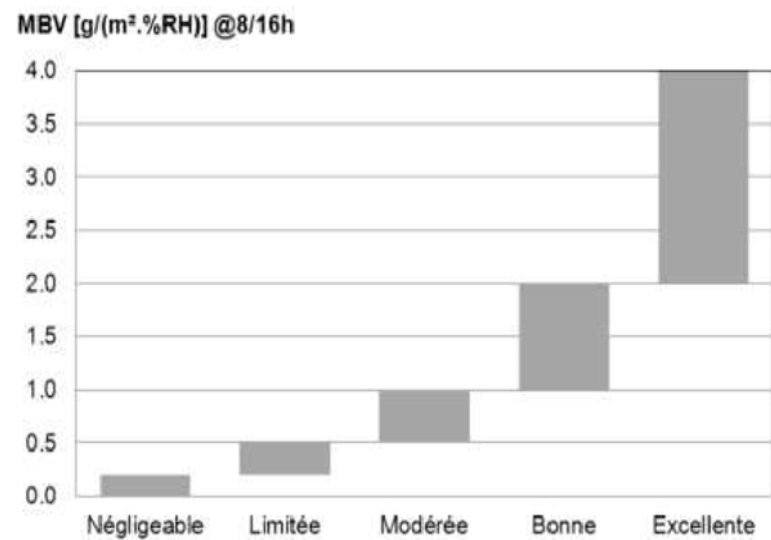


Figure III. 6: Classification des valeurs tampon hydrique (MBV) selon le Project Nordtest

La classification de MBV est évaluée en fonction de la réponse hydrique d'un matériau. Selon Rode, 2005 [164], l'effet tampon des matériaux de construction peut être considéré comme très important pour la performance hygrothermique d'un habitat. Toutefois on trouve des matériaux dont leur MBV est très négligeable, d'autres qui ont des valeurs de tampons hydriques supérieures à 2[g/m².%HR] sont classées pour une excellence réponse hydrique.

4.3. Protocol expérimental

La caractérisation par le test MBV selon le protocole expérimental Nordtest[165] consiste à mesurer la capacité d'un matériau, à modérer les variations d'humidité relative de l'air avoisinant. Cette valeur est définie par :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A(HR_{haute} - HR_{basse})}$$

Avec:

Δm : variation de masse au cours de la phase d'absorption / de désorption (g)

A : Surface d'échange (m²)

HR_{haute}/HR_{basse} : humidités relatives haute et basse au cours du cycle (%)

Le principe du protocole d'essai associé propose de soumettre les échantillons en format carré à des cycles d'humidités relatives bien définis qui présentent en général des données météorologiques afin d'être représentatifs des cycles imposés sur les parois des bâtiments. La

température est posée constante. Pour l'humidité relative, plusieurs couples peuvent être considérés pour présenter les cycles d'humidification et de séchage. Le couple de référence étant 75 % HR pour une durée d'exposition de 8 heures en absorption et 33 % HR pour une période de 16 heures en désorption. Le suivi massique en pesant à chaque cycle des échantillons qui sont soumis à des variations périodiques d'humidité permet alors de déterminer la valeur tampon hydrique des matériaux.

Le banc d'essai utilisé est constitué d'une armoire climatique Memmert HCP au sein de laquelle la température peut être réglée entre 30 et 90 °C et l'humidité relative entre 30 et 95%. Les essais sont réalisés à 40°C. Le suivi massique des échantillons s'appuie sur une pesée durant la phase d'absorption et une pesée durant la phase de désorption. Les cycles sont répétés durant deux semaines.



Figure III. 7: . Chambre climatique contrôlée en température et en humidité relative

L'étude est réalisée sur des échantillons de deux listes des matériaux citées dans le (Tableau III.2) et sur le matériau composite de bois et de ciment. Ils sont tous isolés sur cinq faces avec du scotch aluminium de manière à laisser l'humidité circuler de façon verticale. Les échantillons sont découpés en fonction des capacités de la balance (210 grammes précision 0.01 gramme) et de leur masse surfacique.

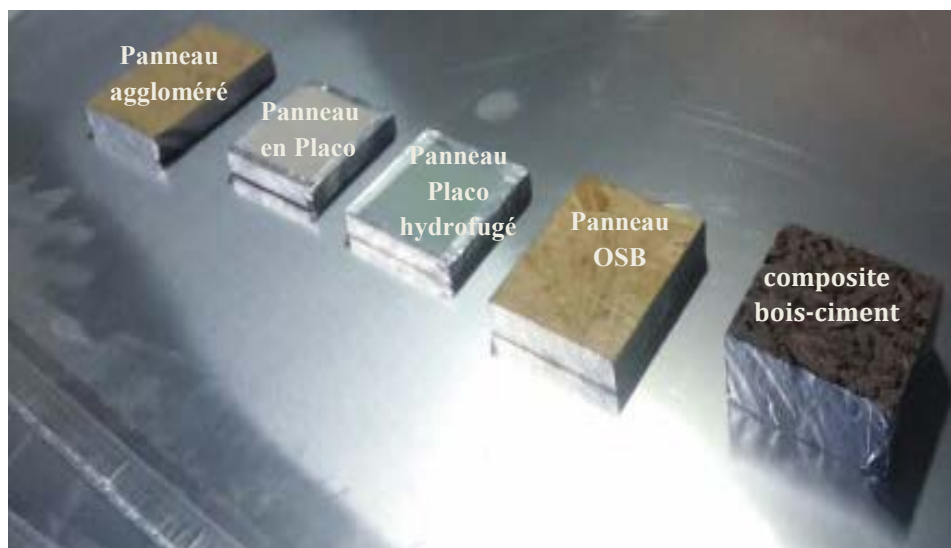


Figure III. 8 : Échantillons de la liste des panneaux de bois



Figure III. 9 : Échantillons de la liste des matériaux fibreux

Pour réaliser l'essai MBV dans l'étuve, nous avons créé le cycle sur logiciel Celsius comme ci-dessous.

Traiter profil					
	Heure hh:mm	Durée hh:mm	Temp °C	Humidité	Type
1	0:01	0:01	40.0	33	next
2	16:00	15:59	40.0	33	next
3	16:01	0:01	40.0	75	next
4	24:00	7:59	40.0	75	loop
5					

Tableau III. 3: Cycle MBV

La première rampe dure une minute. Elle permet d'augmenter ou de diminuer la température intérieur à 40°C et de fixer l'humidité relative à 33%. La seconde rampe permet de maintenir la température à 40°C et 33% d'humidité relative durant 16h, afin de réaliser le cycle de désorption. La troisième rampe est à nouveau une rampe d'une minute. Elle permet de passer d'une humidité relative de 33% à 75%. Pour finir, la quatrième rampe permet de maintenir la température à 40°C et 75% d'humidité relative durant 8h, afin de réaliser le cycle de d'absorption.

Au cours de l'essai, nous pouvons constater que la valeur moyenne d'humidité relative chute à 10H00 de 75 % à 19%. Cette baisse est dû à l'ouverture de la porte lors de la pesée. D'autre part, lors des changements de consignes, le passage de 33% à 75% s'effectue en environ une minute.

4.5. Résultats et discussions

Après avoir effectué les cycles successifs d'humidification-séchage, des pesées régulières ont été réalisées pour chaque cycle comme notés précédemment. Ainsi les valeurs de MBV sont calculées pour chaque matériau testé selon la formule définit par le projet Nordtest. Les deux listes des matériaux présentées ci-dessus sont analysées et les résultats sont présentés dans les figures suivantes.

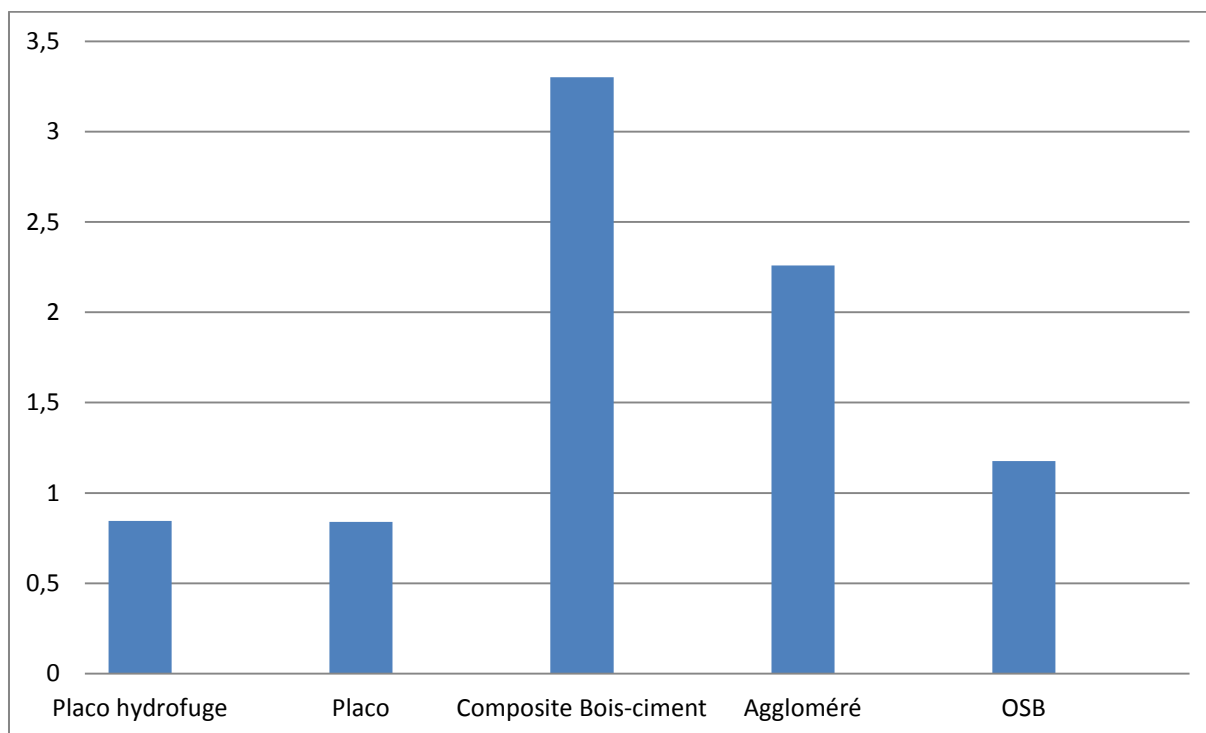


Figure III. 10: Valeurs des tampon hydriques de différents matériaux de la liste des panneaux de bois et du composite bois-ciment

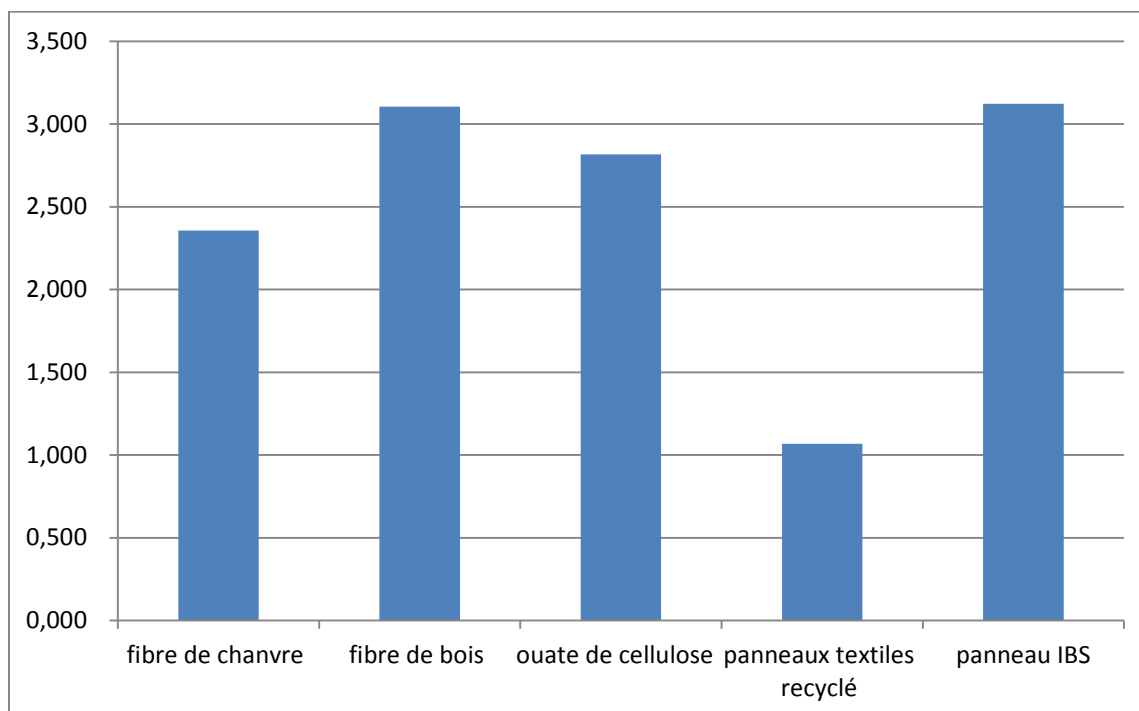


Figure III. 11: Valeurs des tampon hydriques de différents matériaux de la liste des matériaux fibreux et du composite bois-ciment

Selon la classification des matériaux dans le tableau (III.2), nous remarquons que la valeur tampon hydrique varie d'une liste à une autre et d'un matériau à un autre. En effet, pour la première liste qui concerne les panneaux en bois, on constate qu'elle a des valeurs de tampons hydriques moins importantes que la liste des matériaux fibreux. Toutefois, le composite bois-ciment de fibre en bois marque toujours une excellente capacité hydrique en le comparant avec les panneaux de bois ou avec les matériaux fibreux. Il présente une pouvoir tampon supérieure à $3[\text{g/m}^2.\%\text{HR}]$ très voisine à celle des panneaux des fibres de bois. On constate également, que les panneaux en Placo ont des réponses modérées ($\text{MBV} < 1 [\text{g/m}^2.\%\text{HR}]$), selon la classification de (Rode, 2005). Les panneaux agglomérés et OSB ont donnée des valeurs MBV comprises entre 1 et 2 $[\text{g/m}^2.\%\text{HR}]$ ce qui nous permet de les classer comme des bons régulateurs hydriques. Concernant les matériaux fibreux sont tous considérés comme des excellents régulateurs hydriques vu que leurs MBV est supérieure à $2[\text{g/m}^2.\%\text{HR}]$ sauf les panneaux des fibres des textiles recyclés qui ont une réponse inférieure à cette valeur.

C'est ce que nous intéresse, dans notre étude c'est le matériau composite bois-ciment qui est un matériau hétérogène dont sa composition est à la base d'un mélange des particules végétales avec des particules minérales. cette composition lui offre une bonne absorption et désorption de la teneur en eau. Sa réponse hydrique est très proche à celle des matériaux fibreux que celle des panneaux en bois.

5.Conclusion

Cette recherche a apporté des solutions pratiques pour les contextes énergétiques de territoire, et inversement, les solutions d'efficacité énergétiques s'appuyant sur les matériaux disponibles ont besoin de qualifications universitaires scientifiques et techniques.

Pour caractériser le comportement hydrique des matériaux de différentes catégories, en régime dynamique, la méthode MBV s'avère très pertinente. Il était marqué que les matériaux à base des fibres ont des bonnes réponses hydriques par rapport aux panneaux compactés de bois. Cependant le composite bois-ciment, caractérisé par une composition hétérogène, a marqué une valeur MBV très importante par rapport aux autres matériaux étudiés. Ainsi, une étude plus approfondie sur ce composite sera détaillée dans le chapitre suivant afin de déterminer ses propriétés intrinsèques ainsi que l'effet des pourcentages de ses éléments de composition sur ses propriétés thermo physiques.

Chapitre 4

Caractérisation et prédiction par voie numérique des propriétés équivalentes d'un matériau bois-ciment

1. Introduction:

Ce chapitre a pour objectif principal de contribuer à la caractérisation numérique des matériaux de construction bio composites à base de bois et de ciment. Il s'agit en particulier d'étudier un panneau hétérogène qui fait le mélange des copeaux de bois avec le liant ciment. Plus précisément, cette partie vise à la prédiction des propriétés thermo physiques équivalentes de ce matériau à travers la combinaison de l'expérience, à l'aide des mesures microscopiques issues de la micro-tomographie, et de la modélisation en 3D. La méthodologie suivie consiste à la détermination de la structure de l'échantillon par une prise des images à l'échelle microscopique. Une fois la structure de l'échantillon est générée, une reconstruction de la représentation bidimensionnelle à une structure tridimensionnelle est procédée moyennant un outil numérique qui permet de déterminer la perméabilité et la conductivité thermique équivalentes des domaines reconstruits en 3D.

2. Techniques d'imagerie

La détermination des structures des matériaux nécessite souvent des techniques et des méthodes de traitement d'images pour accéder aux morphologies internes. Cependant, quelques techniques restent limitées à donner des images de structures bidimensionnelles. De ce fait, d'autres techniques ont été développées [166-168] dans ce domaine pour passer d'une image bidimensionnelle à une image tridimensionnelle telle que la technique de micro-tomographie X [169] qui est utilisée dans notre travail.

Dans le cas des matériaux hétérogènes qui sont à la fois poreux et multi constituants connus par des structures complexes, l'accès aux morphologies internes restent compliqué. En effet, le mélange présente des particules solides (de même nature ou de nature différente) avec des particules d'air incorporées dans les pores. Cette partie fluide a un effet non négligeable sur le comportement et la durabilité du matériau [170]. Néanmoins, le suivi de ces particules et la visualisation de la microstructure interne d'un matériau n'est pas toujours possible qu'à partir des échantillons préparés pour plusieurs essais qui sont couteux à la fois en temps et en matière.

Aujourd'hui et avec la technique micro-tomographie, il est devenu possible de visualiser la microstructure interne d'un produit et de prédire les différents phénomènes et les transformations qui peuvent être produites au sein d'une structure. Par exemple, dans le cas des fissures qui peuvent s'engendrer dans une structure, cette technique permet de suivre

l'endommagement produit de l'extérieur jusqu'à l'intérieur [171]. De même pour les cas des matériaux fibreux à structure complexe [172].

2.1. Technique de micro-tomographie

La technique de tomographie est une technique qui était développée au début du XXème siècle dans le domaine d'imagerie médicale. Puis, elle était utilisée en géophysique et en astrophysique. Par la suite, elle est devenue de plus en plus utilisée en sciences des matériaux. Elle est considérée parmi les techniques non destructives qui permettent de reconstruire d'images en coupe des structures à trois dimensions [173].

Le principe de cette technique repose sur l'analyse de l'interaction d'un faisceau de rayon X avec un objet, par enregistrement à travers des détecteurs du rayonnement transmis après la traversée de l'élément [174]. Ainsi, grâce à sa capacité de pénétration, cette technique peut fournir des données sur la microstructure intérieure et sur les propriétés intrinsèques des matériaux mises en étude [175]. La figure suivante présente un exemple d'un tel appareillage au laboratoire.



Figure IV. 1: Le tomographe NSI (X50+) et son environnement dans le Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT) de l'ENS Cachan

Cet appareil est composé d'un système qui permet de produire les données qui constituent le tomogramme, et qui donnent lieu à une structure en 3D de l'échantillon. Chaque point dans ce tomogramme constitue un voxel. Un faisceau de rayons X qui traverse l'échantillon et une camera qui enregistre ces images en 2D appelées radiographies [176]. Ainsi des séries de ces images brutes sont collectées et traitées par un algorithme de reconstruction à partir duquel l'image tridimensionnelle est obtenue.

2.2.Reconstruction tridimensionnelle

L'idée de la reconstruction tridimensionnelle est récente et provient d'un besoin justifié par la croissance du marché des matériaux et appuyée par le développement rapide des techniques d'imagerie et des outils informatiques. Ce mode de présentation d'un matériau en 3D permet d'exécuter numériquement sur différents aspects de traitement d'images pour obtenir une image nette et réelle qui concerne leur domaine d'étude. En effet, le procédé de reconstruction est basé sur quatre étapes nécessaires [168]:

1. L'acquisition d'une image de structure bidimensionnelle.
2. Le traitement et l'analyse de cette image.
3. Le choix d'une méthode ou technique de reconstruction.
4. La vérification de l'efficacité de la méthode de reconstruction par l'étude qualitative de la structure tridimensionnelle obtenue par l'étape précédente.

Le principe d'acquisition des images qui sont appelées radiographies est schématisé en figure ci-après. Cette acquisition se fait sur une rotation complète qui permet d'obtenir de 500 à 2000 radiographies en différents niveaux de gris [177].

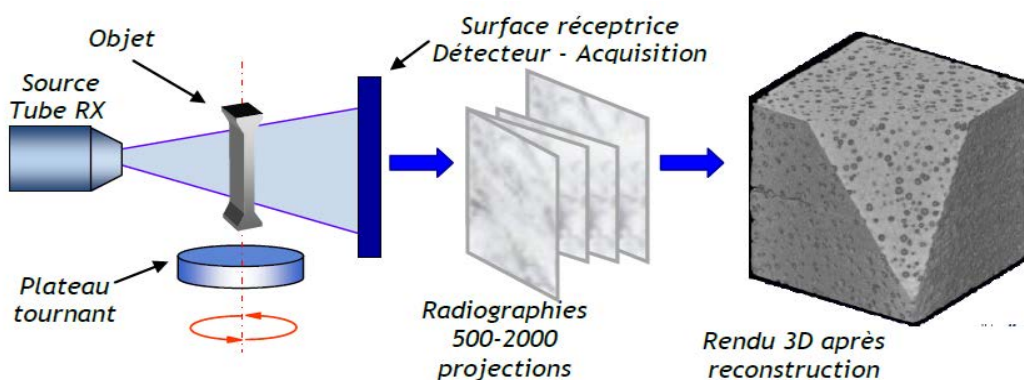


Figure IV. 2: Principe de fonctionnement de l'acquisition des données en 3D

Ces projections se recoupent afin d'obtenir des éléments redondants nécessaires à une bonne reconstruction de l'information. Le calcul de traitement de ces radiographies permet à partir des projections 2D de reconstruire le volume de l'objet en 3D [178].

Dans la suite de ce travail et en se basant sur ces principes de la tomographie et de la reconstruction en 3D, nous traitons un matériau de construction considéré comme un milieu poreux hétérogène constitué de deux phases: une phase solide continue formée de deux éléments différents (bois et ciment) et une phase dispersée formée d'air circulant dans les

pores. L'objectif est de déterminer ses propriétés de diffusion et étudier les modes de transfert et d'écoulement qui peuvent s'écouler dans cette structure.

4. Modélisation

Le comportement thermique et hydrique d'un matériau de construction de structure hétérogène est fortement lié aux mécanismes physiques de transfert de chaleur et des fluides qui peuvent se manifester au sein de la structure. Ces phénomènes qui sont, à leur tour liés, directement aux propriétés intrinsèques du matériau de base. Il est donc nécessaire de trouver un lien entre la microstructure et les propriétés du matériau pour la compréhension et la prédiction de son comportement. Ces propriétés peuvent être mesurées (jusqu'à l'échelle du μm) ou modélisées (jusqu'à l'échelle du nm) [179]. Le développement de technique de micro-tomographie accompagné de l'évolution des moyens informatiques permettent de représenter la microstructure d'un matériau en 3D à partir des volumes représentatifs. Ainsi, moyennant des codes de calcul spécifiques, il est possible de déterminer les propriétés diffusives effectives (équivalentes) de ces volumes numériques. Pour cela, nous proposerons la méthodologie suivante, dans notre étude, afin de caractériser le composite bois-ciment.

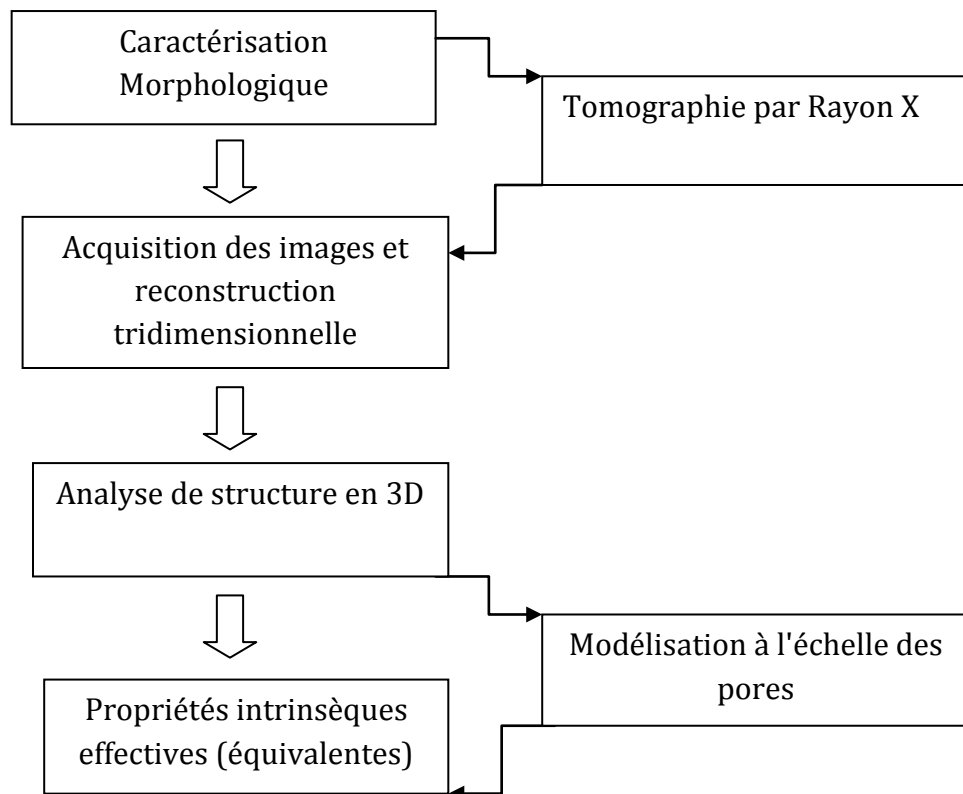


Figure IV. 3: Méthodologie d'étude d'une structure en 3D

Dans notre cas d'étude, nous nous intéressons à la détermination de deux propriétés physiques moteurs des transferts diffusives thermique et hydrique. Ces deux paramètres sont la perméabilité au gaz qui est liée à l'écoulement de fluide dans une structure et la conductivité thermique qui présente le coefficient clé du transfert de chaleur.

4.1. Modélisation à l'échelle macroscopique

4.1.1. Théories des milieux poreux

Plusieurs théories et modèles ont été développés pour la modélisation des transferts au sein des milieux poreux. Ces modèles peuvent être classés en deux catégories [180]. La première catégorie concerne les théories issues des travaux de Biot. M.A. [181] et la deuxième comporte les modèles des mixtures [182].

Ces méthodes permettent de décrire les mécanismes des transferts à l'échelle du VER à partir des équations de conservation écrites à l'échelle microscopique. Cette description équivalente est souvent connue sous le nom d'une homogénéisation par prise de moyenne [183] où les modes des transferts et de l'écoulement sont modélisés par un modèle équivalent macroscopique.

4.2.2. Méthode de prise de moyenne

Dans notre cas, nous nous intéressons à l'étude d'un milieu poreux constitué des particules de bois liées par un liant cimentaire. La porosité du milieu est liée à certains nombres de vides qui peuvent être créés dans cette structure.

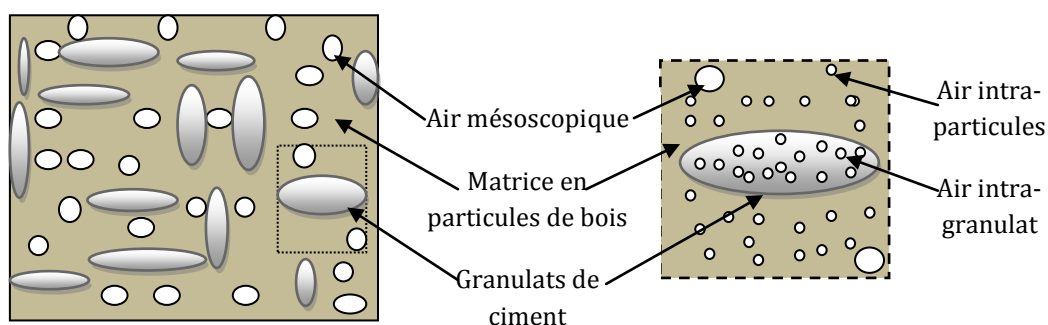


Figure IV. 4 Composition microscopique d'un composite poreux hétérogène

Une proportion des vides d'air est due au volume des pores intégrés dans le granulat quantifiée comme porosité microscopique qui traduit une porosité intra-granulat et qui est donnée par la formule suivante:

$$\phi_g = \frac{V_{\text{cappillaire}}}{V_{\text{granulaire}}}$$

$V_{\text{cappillaire}}$: le volume des vides dans les granulats de ciment

$V_{\text{granulaire}}$: le volume total occupé par les granulats dans la structure.

La matrice des particules de bois contient également une proportion des vides dite à l'ensemble de volume d'air crée à l'intérieur des particules. On parle dans ce cas d'une porosité intra-particules et qui est également quantifiée comme microscopique. Elle est donnée comme suit:

$$\phi_p = \frac{V_{\text{inter}}}{V_{\text{particules}}}$$

V_{inter} : le volume intérieur dans les particules de bois

$V_{\text{particules}}$: le volume total occupé par les particules de bois dans la structure.

Ainsi la porosité totale d'un milieu multi constituant peut s'écrire dans ce cas comme suit:

$$\phi_t = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{total}}}$$

V_{vides} : le volume des vides dans le matériau

V_{total} : le volume total du matériau

Ce milieu fait ainsi un endroit au sein duquel plusieurs modes de transfert et d'écoulement, présentés par des grandeurs physiques sont engendrés. Chaque grandeur microscopique G est définie par une moyenne volumique définie par:

$$\langle G \rangle = \frac{1}{V} \int_{A\alpha_i} G dV$$

$$\langle \nabla G \rangle = \nabla \langle G \rangle + \frac{1}{V} \int_{A\alpha_i} G \cdot n_{\alpha i} \cdot dA$$

$$\left\langle \frac{\partial G}{\partial t} \right\rangle = \frac{\partial}{\partial t} \langle G \rangle - \frac{1}{V} \int_{A\alpha_i} G \cdot W \cdot n_{\alpha i} \cdot dA$$

Ainsi le bilan thermique des phases présentes dans ce milieu peut être exprimé comme suit:

- En tout point de fluide (gaz):

$$\rho C_{p_g} \frac{\partial T_g}{\partial t} = -\nabla(-\lambda_g \nabla T_g) - \rho C_{p_g} \cdot U_g \cdot \nabla T_g$$

- En tout point solide:

$$\rho C_{p_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = -\nabla(-\lambda_s \nabla T_s)$$

$$T_f = T_s$$

$$\lambda_s \nabla T_s \cdot n_{sf} = \lambda_f \nabla T_f \cdot n_{sf}$$

Ce bilan thermique de chaque phase peut être ainsi décrit par la méthode de prise de moyenne suivant les expressions suivantes:

- Pour la phase solide:

$$(1 - \varepsilon) \rho C_{p_s} \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial t} = \nabla \left[(1 - \varepsilon) \lambda_s \nabla \langle T_s \rangle^s + \frac{1}{V} \lambda_s \int_{A_{fs}} \bar{n}_{sf} (T_s - \langle T_s \rangle^s) \cdot dA \right] + \frac{1}{V} \int_{A_{fs}} \bar{n}_{sf} \cdot \lambda_s \cdot \nabla T_s \cdot dA$$

$$\langle T_s \rangle^s = \frac{1}{V_s} \int_{V_s} T_s dV$$

Avec $\langle T_s \rangle^s$ est la température intrinsèque de la phase solide. Elle est liée à la moyenne volumique par la relation suivante:

$$\langle T_s \rangle = (1 - \varepsilon) \langle T_s \rangle^s$$

- Pour la phase fluide:

$$\varepsilon \rho C_{p_f} \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial t} = \nabla \left[\varepsilon \lambda_f \nabla \langle T_f \rangle^f + \frac{1}{V} \lambda_f \int_{A_{fs}} \bar{n}_{fs} (T_f - \langle T_f \rangle^f) \cdot dA \right] + \frac{1}{V_f} \int_{A_{fs}} \bar{n}_{fs} \cdot \lambda_{fs} \cdot \nabla T_f \cdot dA$$

$$\langle T_s \rangle^s = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} T_f dV$$

$$\langle T_f \rangle = \varepsilon \langle T_f \rangle^f$$

Modèle de température:

$$\langle T_s \rangle^s = \langle T_f \rangle^f = T$$

$$(\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[[\varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s] \nabla T + \frac{1}{V} (\lambda_f - \lambda_s) \int_{A_{fs}} \vec{n}_{fs} \cdot (T_f - T_s) \cdot dA \right]$$

$$(\rho C_p)_{eq} = \varepsilon (\rho C_p)_f + (1 - \varepsilon) (\rho C_p)_s$$

$$T_f - T = \vec{b}_f \cdot \nabla T$$

$\vec{b}_f$ est un vecteur dépendant de la géométrie de la structure poreuse et des conductivités thermiques de la phase fluide et la phase solide.

$$(\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_{eq} \cdot \nabla T)$$

$$\lambda_{eq} = \varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s$$

4.3. Présentation du modèle

Dans cette partie, nous présentons la résolution en 3D via des simulations numériques les phénomènes des transferts de chaleur et d'un écoulement dans un milieu poreux en utilisant un code de calcul basé sur les méthodes des volumes finis. Le domaine d'étude est considéré hétérogène d'une configuration parallélépipédique constituée d'un solide et d'un réseau des pores rempli d'air qui est défini par un voxel. Ainsi le domaine total considéré peut être présenté par l'union suivante:

$$\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$$

Dont Ω_1 constitue le sous domaine solide dans la structure et Ω_2 est le sous domaine fluide. D'autres hypothèses de simplification sont aussi retenues afin d'adopter les équations générales au problème étudié et qui sont résumées comme suit:

- Le fluide circulant dans les pores est supposé Newtonien et incompressible,
- L'écoulement est laminaire,
- Les propriétés physiques du matériau sont constantes,

- La matrice du milieu poreux est supposée indéformable et en équilibre thermodynamique avec le fluide,
- L'anisotropie de perméabilité du milieu poreux n'est pas prise en considération.
- Le transfert d'énergie par rayonnement est négligé.

Ainsi le système d'équations de conservation couplées régissant l'écoulement et le transfert qui sont présentées par les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et d'espèces peut s'écrire comme suit :

$$\nabla V^* = 0$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + (V^* \cdot \nabla) V^* = -\nabla P^* + \frac{1}{D_a} V^* + \nabla^2 V^*$$

$$(\rho C_p)_r \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + V^* \nabla T^* = \nabla (\lambda_r \nabla T^*)$$

$$\varepsilon \frac{\partial C^*}{\partial t^*} + V^* \nabla C^* = \nabla (D_c \nabla C^*)$$

Dans ce cas, l'équation de conservation de la quantité de mouvement est supposée vectorielle dont ses composantes peuvent être projetées sur les trois axes du domaine étudié. Le problème est ainsi à six degrés de liberté (u, v, w, T, P, C). Les variables notées avec le symbole étoile (*) sont dimensionnelles qui seront différencier dans ce qui suit, dont l'adimensionnement est appliqué sur les variables suivantes:

$$(x, y, z) = \frac{(x^*, y^*, z^*)}{H^*}$$

$$(u, v, w) = \frac{(u^*, v^*, w^*)}{V_{ref}}$$

$$P = \frac{P^*}{P_{ref}}$$

$$T = \frac{T^* - T_{ref}}{\Delta T}$$

$$C = \frac{C^* - C_{ref}}{C_{ref}}$$

$$t = \frac{t^*}{t_{ref}}$$

En introduisant ces variables et ces grandeurs adimensionnés dans le système d'équations précédent, nous obtenons un nouveau système adimensionnel dont les paramètres de contrôle des transferts sont de types équivalentes qui définissent les propriétés équivalentes du matériau étudié avec ses différentes phases:

$$\nabla \vec{V} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \frac{1}{Da} \vec{V} + \nabla^2 \vec{V}$$

$$(\rho C_p)_r \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = \frac{1}{Pr} \nabla (\lambda_r \nabla T)$$

Les paramètres non-dimensionnels dans les équations ci-dessus sont le nombre de Darcy qui définit la perméabilité du milieu et le nombre de Prandtl qui définit les propriétés des fluides:

$$Da = \frac{k}{H^{*2}}$$

$$Pr = \frac{\mu}{\alpha_f}$$

Dont μ représente la viscosité cinématique du fluide, α est la diffusivité thermique donnée par la relation suivante:

$$\alpha_f = \frac{\lambda_f}{(\rho C_p)_f}$$

La capacité calorifique et la conductivité thermique relatives sont définies comme suit:

$$(\rho C_p)_r = \frac{(\rho C_p)_s}{(\rho C_p)_f}$$

$$\lambda_r = \frac{\lambda_s}{\lambda_f}$$

$\sigma = \frac{(\rho C_p)_{eq}}{(\rho C_p)_f}$: présente le rapport des chaleurs spécifiques du milieu équivalent et du fluide.

4.4. Conditions aux limites :

Les conditions aux limites appliquées au problème sont les suivantes :

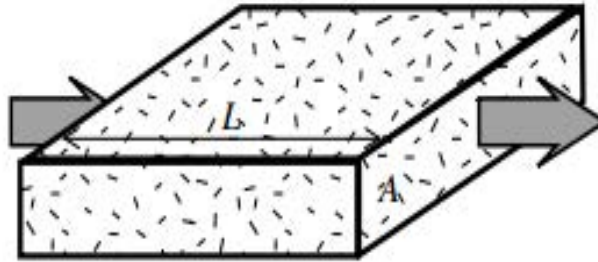


Figure IV. 5: Représentation de problème physique

- Les vitesses zéro ($u = v = 0$) sont appliquées sur le bloc (type Dirichlet), ce qui implique que $V = 0$
 - à $X=0$: $T=0$; $\vec{V} = \text{Re} \cdot \vec{i}$
 - à $Y=0$: $\frac{\partial T}{\partial Y} = 0$; $\vec{V} = 0$
 - à $Z=0$: $\frac{\partial T}{\partial Z} = 0$; $\vec{V} = 0$
- Pour la température, les conditions de Dirichlet et Newman sont utilisées. En effet, dans une extrémité où l'on impose une température constante et dans des autres extrémités c'est des conditions de flux à gradient thermique qui sont imposées.
- Pour l'interface solide-fluide, la continuité des deux températures et du flux de chaleur est appliquée.

$$T_f = T_s \frac{\partial T_f}{\partial n} = \lambda^* \frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (1)$$

Pour les sorties, le transfert de chaleur est caractérisé par un nombre adimensionnel de Nusselt qui correspond à la conductivité thermique équivalente déduite à partir du rapport entre le flux thermique convectif et le transfert thermique conductif.

$$Nu = \frac{\Phi_{\text{CONVECTION}}}{\Phi_{\text{CONDUCTION}}} = \frac{hL}{\lambda}$$

Ce nombre est également retenu à partir du flux moyen qui est établit par le gradient de température adimensionné à la paroi :

$$Nu = -\frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0.1}$$

4.5. Discrétisation par la méthode des volumes finis :

La formulation d'un problème physique est souvent décrite par des équations aux dérivées partielles qui devraient être résolues afin de trouver une solution de problème posé. Cependant, cette résolution reste un peu compliquée, notamment dans le cas des équations couplées et les équations non linéaires. C'est ainsi que le recours aux méthodes numériques moyennant la discrétisation est devenu une piste recommandée dans le domaine de modélisation.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour la discrétisation (éléments finis, moyens spectrales, différences finis et méthodes des volumes finis). Ces derniers sont les méthodes utilisées dans la suite de ce travail. La méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en des volumes élémentaires dites des volumes de contrôle. Chaque volume entoure un nœud qui représente le point de calcul. Ainsi les équations sont intégrées sur ces éléments de contrôle.

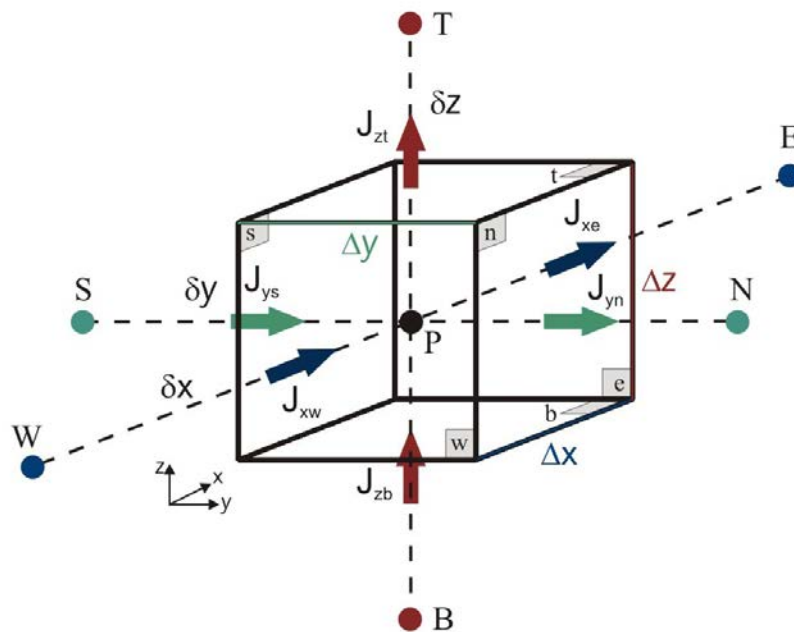


Figure IV. 6: Volume élémentaire de contrôle

4.3. Schéma QUICK

Dans la littérature, il existe plusieurs schémas d'interpolation afin de simplifier et stabiliser les études par simulation. Les plus couramment utilisées de ces schémas sont cités avec précision dans l'étude Patankar [184]. D'autres ont été cités et utilisés dans la thèse de Rahli. O [185]. Dans notre étude, on ne citera que le schéma QUICK (*QuadraticUpstream Interpolation for Convective Kinematics*) qui a été utilisé comme outil de simulation.

Ce schéma a été introduit par Léonard en 1979 [186]. Il est considéré le schéma le plus précis selon les résultats de Rahli. O, en le comparant avec les autres outils. Ainsi, ses avantages de précision et de stabilité ont été largement démontrés.

4.4. Cas test de validation

Afin de réduire les risques des erreurs numériques, le schéma d'interpolation QUICK a été utilisé. La première étape dans notre étude consiste à un test de validation du code en comparant ses résultats de simulation avec des approches analytiques d'homogénéisation proposées par Mori et Tanaka [187] et avec des approches numériques par la méthode de Lattice Boltzmann, effectuées par Walther et al. [188]. Cette validation est effectuée afin de vérifier l'aptitude du code pour prédire la diffusivité apparente d'un matériau avec des inclusions. Deux cas de fractions volumiques ont été testées (15% et 50%) dans cette validation.

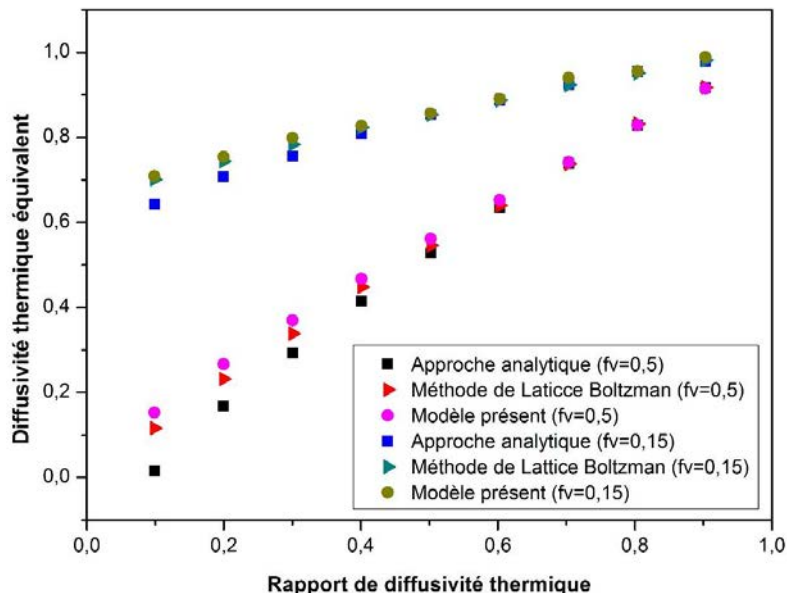


Figure IV. 7: Comparaison des résultats du modèle présent avec des approches analytiques et numériques

Ces résultats montrent que la résolution numérique du modèle développé est en bonne confrontation avec les solutions des approches analytiques et celles des approches numériques via la méthode de Lattice de Boltzmann. Cette bonne confrontation permet de confirmer, d'une part que le modèle proposé prédit fidèlement les propriétés de diffusion équivalentes, et d'autre part que la résolution numérique du code utilisé est fiable. Ce qui nous permet l'utilisation de cet outil avec confiance dans la suite de ce travail.

5. Analyse numérique des composites hétérogènes

5.1. Matériau d'étude

La formulation d'un composite de béton constitué des copeaux de bois et d'un liant ciment, consiste à déterminer et contrôler les proportions de chaque constituant qui permettent d'obtenir un mélange dont les propriétés sont contrôlées. En effet, les propriétés de diffusion thermique et hydrique sont directement liées aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et aux interactions entre les différents types des particules existant dans le matériau.

Dans les matériaux de construction, les propriétés principales qui quantifient sa résistance contre la chaleur et l'humidité sont la conductivité thermique λ et la perméabilité k .

Pour notre cas d'étude, nous proposons d'étudier et de caractériser numériquement un matériau lignocellulosique poreux constitué de deux éléments bien connus dans le domaine de construction (le bois et le ciment). Le bois est présent sous format des granulats avec des formes et des tailles irrégulières, provenant des déchets de menuiserie, et le ciment considéré comme un liant dans la phase solide. Ainsi, ce présent matériau est formé de ces deux phases solides constituant les matières premières et d'une phase d'air remplissant les vides créés entre les particules solides de la structure.



Figure IV. 8: Matériau d'étude: composite bois-ciment

Afin de décrire la microstructure de ce matériau, la technique de micro tomographie citée précédemment a été utilisée. À partir de la description de microstructure, nous avons développé une démarche de modélisation multi-échelle des transferts thermiques et des écoulement des fluide. Dans cette partie, nous illustrons cette approche par deux exemples traitant un cas des milieux hétérogènes bi phasiques dans lesquels les phase de bois et d'air sont considérées, et un autre cas des milieux hétérogènes tri phasiques où la phase de ciment est associé à ce mélange.

5.2.Présentation des morphologies par micro-tomographie

5.1.1.Reconstruction en 3D

Dans ce que suit, nous proposons une reconstruction en 3D de l'échantillon présentée dans la figure (IV.8) qui a été convertie en données numériques à travers la micro-tomographie. L'image digitale est de proportions de 1 pixel / 23 μm , de dimensions 14,9 x 15,4 x 11,5 mm et respectivement 632 x 680 x 500 pixels avec des données en 8 bits. La taille de domaine 3D est 194 voxels.

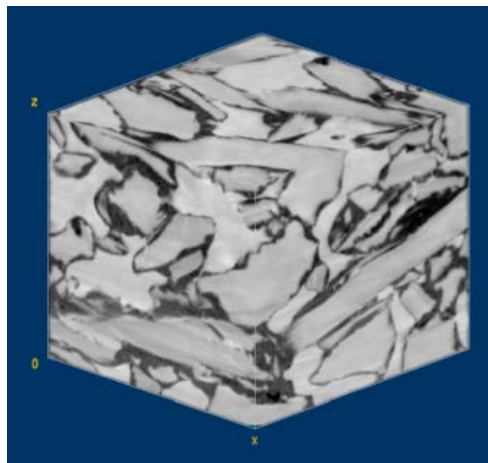


Figure IV. 9: Structure tridimensionnelle numérisée

Les différentes phases présentes dans ce milieu, sont présentées par des différents niveaux de couleur gris. Ce niveau de gris peut varier de 0 (tout noir) à 255 (tout blanc), selon l'échelle standard de niveau de gris en 8 bits. Ce classement a le rôle de partager le domaine de l'image en trois intervalles différents en fonction de proportions des phases présentes dans l'échantillon réel. Chaque phase est alors présentée par un niveau de gris selon le tableau suivant:

Air	0-60
Bois	60-121
Ciment	121-255

Tableau IV. 1: Description des phases présentes selon les niveaux de gris dans la structure

Cette division numérisée nous permet ainsi d'identifier et visualiser les trois phases présentes, dans notre échantillon d'étude à travers l'outil Imorph® selon le schéma suivant.

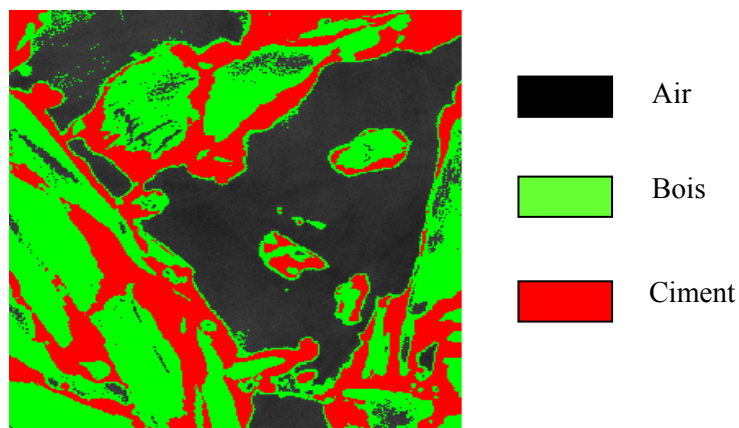
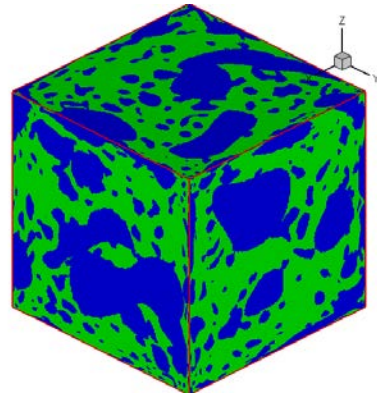


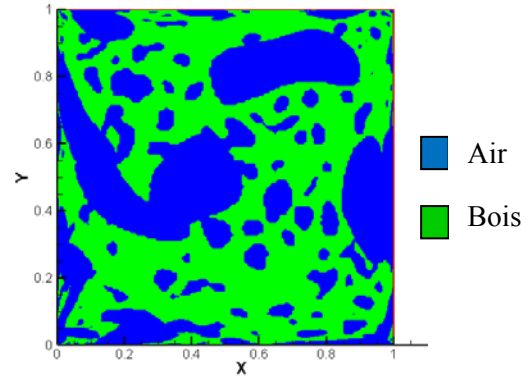
Figure IV. 10: Structure numérisée en Imorph®

5.2.2.Composite bi-phasique: Air-Bois

Dans cette partie, nous traitons uniquement la composition du matériau à deux phases dont le bois et l'air. La phase de ciment n'est pas générée dans cette structure. Ce milieu bi phasique est assimilé par les configurations ci-dessous. L' objectif dans cette phase est de déterminer la composition idéale d'un matériau en bois avec le moindre coût de production tout en gardant ses performance physique et thermique suffisantes pour maintenir sa performance d'isolation. En effet, le coût de ce produit est directement proportionnel à la quantité de matière solide (pourcentage de copeaux de bois) présente dans le produit final. Par conséquent, il est normal qu'un matériau présentant une porosité élevée a un faible coût. Néanmoins, le fait d'avoir un grand pourcentage de vides dans une structure peut influencer sur la cohésion des particules et par la suite sur sa résistance mécanique.



(a) Structure en 3D



(b) Structure en 2D

Figure IV. 11: Représentation morphologique du milieu bi phasique (Air-Bois)

Dans ce cas, trois termes sont évalués: le niveau du seuillage, la porosité et le nombre de Nusselt qui traduit la conductivité thermique équivalente de ce milieu poreux. Ainsi différentes morphologies du mélange air- bois sont présentées dans les figures ci-après pour différentes valeurs de porosité (respectivement 20%, 50%, 80%) qui correspondent également à différents niveaux du seuillage. Pour cela, trois niveaux de seuillage ont été étudiés. La porosité est donc calculée pour chaque niveau de seuillage. Il est à noter que cette porosité dépend fortement de niveau du seuillage. En effet, en augmentant le niveau du seuillage, la porosité du milieu diminue.

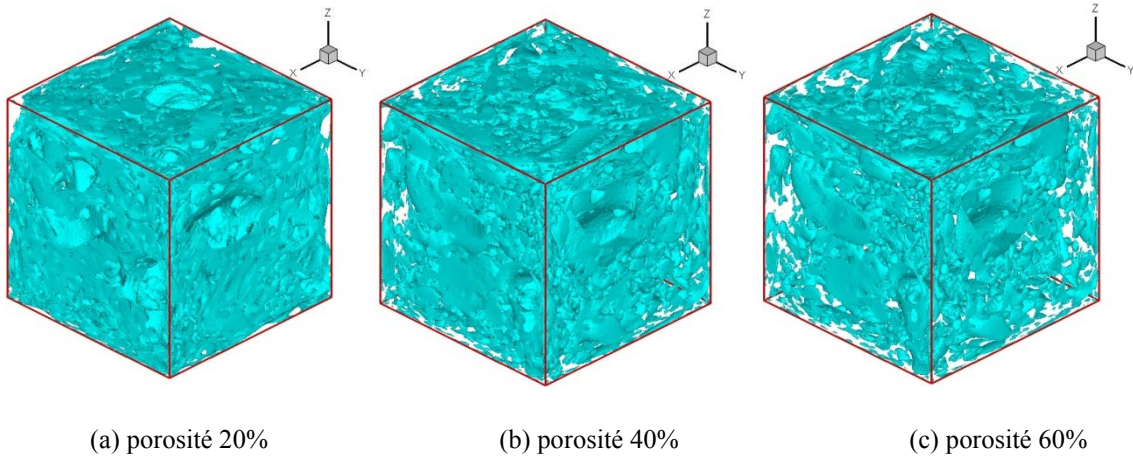


Figure IV. 12: Morphologies du matériau bois pour différents cas de porosité

Ainsi, en connaissant la structure et les différentes morphologies pour chaque cas, nous allons procéder par simulation numérique afin d'estimer la conductivité thermique équivalente du matériau en fonction de porosité et de rapport de conductivité thermique.

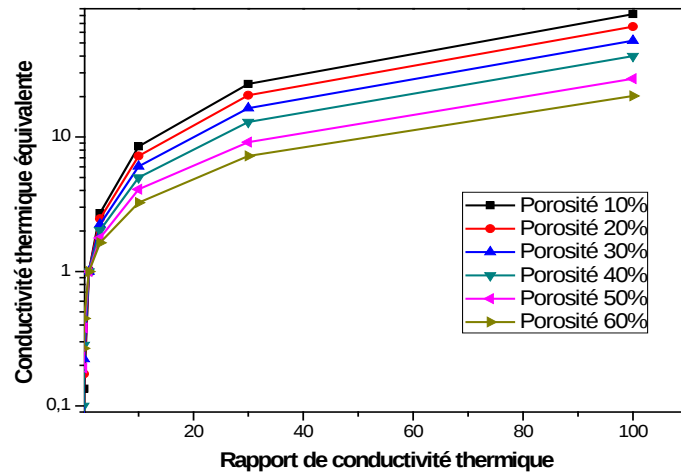


Figure IV. 13: Variation de la conductivité thermique équivalente du matériau en fonction de porosité et du rapport de conductivité thermique

Nous notons à partir de cette figure, que la conductivité thermique équivalente de matériau est influencée par la porosité et le rapport de conductivité thermique. En effet, en augmentant le rapport de conductivité thermique, cette conductivité thermique équivalente augmente. Cependant, en augmentant la porosité de la structure, la conductivité thermique équivalente diminue.

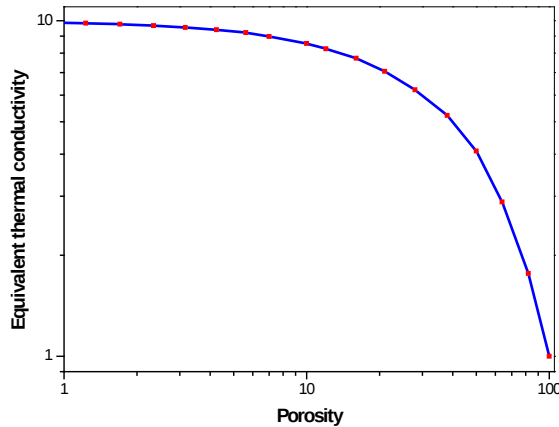


Figure IV. 14: Variation de la conductivité thermique équivalente en fonction de porosité

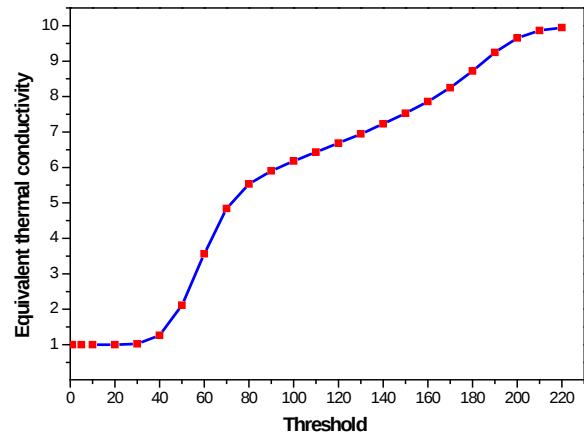


Figure IV. 15: Variation de la conductivité thermique équivalente en fonction de niveau du seuillage

Ces figures montrent que la conductivité thermique du matériau est inversement proportionnelle à la porosité. Par conséquent, lorsque la porosité augmente, la conductivité thermique équivalente diminue. En effet, l'air a une conductivité thermique très faible (de

l'ordre de 10^{-2}). Ainsi, plus l'air est présent dans le milieu, plus le matériau sera isolant. Néanmoins, dans un cas réel, il est impossible d'avoir une structure de bois avec une porosité très élevée, car ça peut engendrer le problème de la cohésion entre les particules, comme noté précédemment, mais il a été proposé sous forme graphique pour une meilleure prédiction de conductivité thermique pour des différents mélanges Air-Bois.

5.2.3.Composite à trois phases: Air- Bois- Ciment

5.2.3.1. Reconstruction en 3D

Il s'agit ici d'étudier le cas réel de notre matériau hétérogène de type composite bois-ciment présenté dans la figure (IV.8). La morphologie du matériau à trois phases est représenté ci-dessous, dont la phase du ciment apparaît.

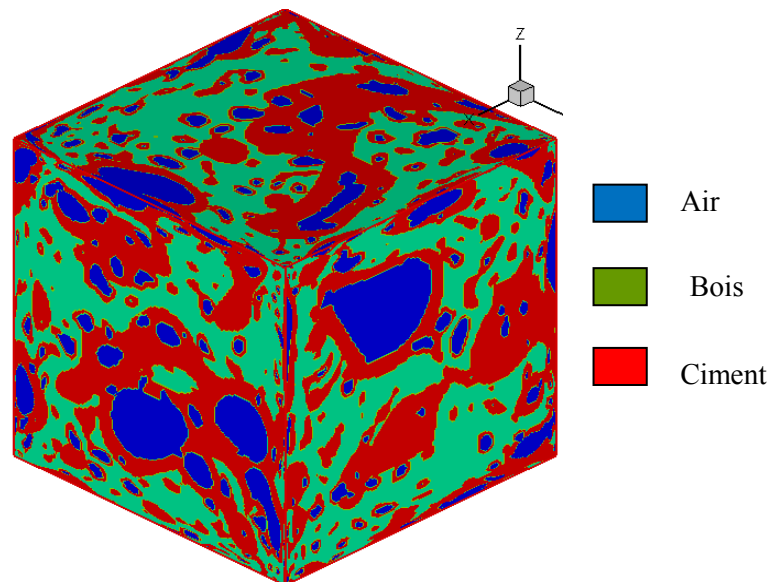


Figure IV. 16: Représentation en 3D du milieu tri phasique (Air-Bois-Ciment)

Le modèle numérique présenté dans cette structure morphologique issue de la microtomographie de dimensions de 632x680x500 pixels, a été réduit à une dimension de 200x200x200 pixels afin de mieux manipuler les mécanismes de transfert thermique. Ce changement est lié aussi à la composition hétérogène du matériau qui présente des zones très irrégulières qui sont dus aux particules de bois et de ciment de granulométrie très diverse. Ainsi, nous distinguons trois phases colorées dont chacune présente une proportion de matière. La phase air est identifiée par la couleur bleu, le bois est définie par la couleur verte et la phase de ciment est présentée en couleur rouge.

D'après ce changement de résolution de l'image, un nouveau traitement d'image a été fait pour bien chercher les intervalles de niveaux de gris optimaux aux essais numériques des transferts thermiques. Ces nouvelles valeurs sont présentées dans le tableau suivant:

Air	0-56
Bois	56-90
Ciment	90-255

Tableau IV. 2: Répartition des phases présentes selon les niveaux de gris

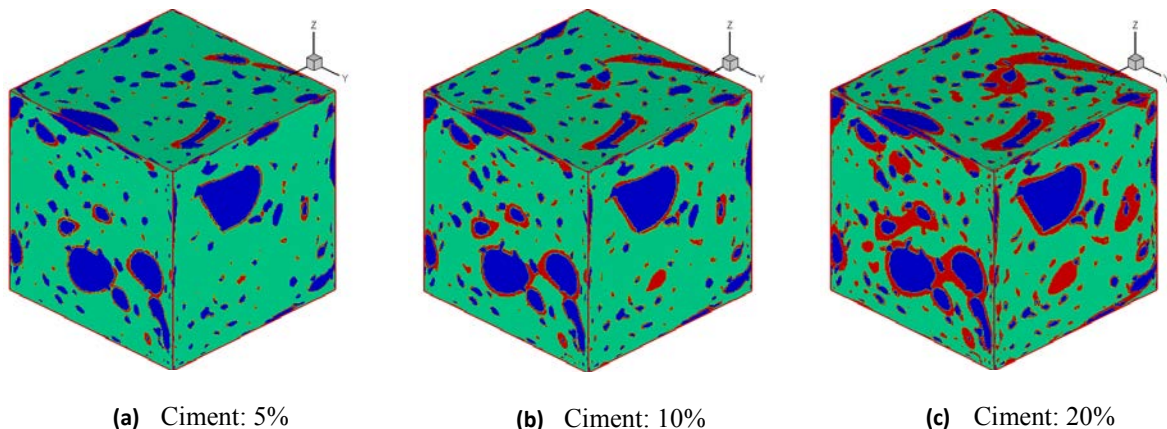
Selon cette analyse, la proportion volumétrique de chaque composant est donnée comme suit :

	Air	Bois	Ciment
Volume (%)	29,6	36,6	33,8

Tableau IV. 3: Proportion volumique de différentes phases dans la structure

D'après ces résultats, nous pouvons remarquer que le matériau a une porosité de 29,6%. Ainsi la phase solide dans ce milieu présente 70,4% de volume total dont la phase ciment présente 33,8% de la composition hétérogène.

Afin de mieux visualiser les fractions volumiques de ciment dans le mélange, plusieurs simulations pour des différents pourcentages de ciment ont été établies où la porosité du milieu est considéré à l'ordre de 20%.



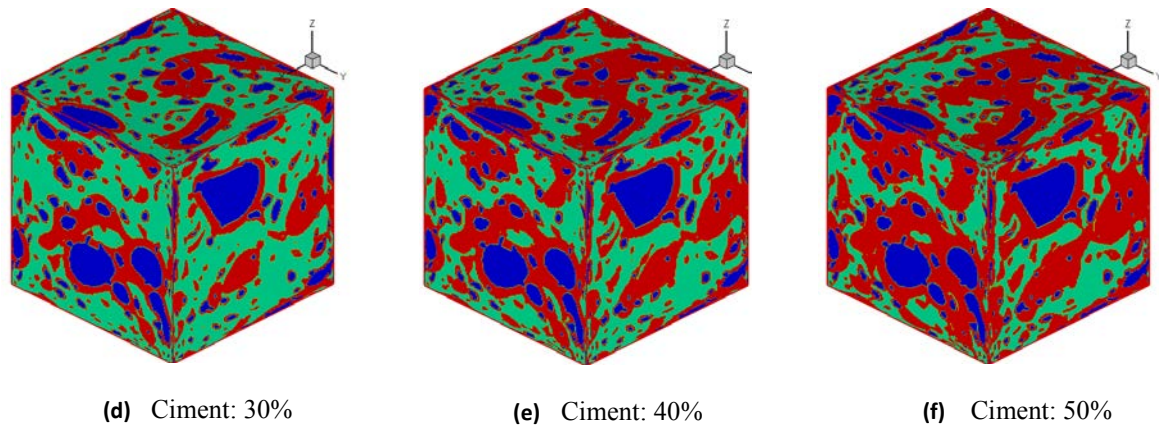


Figure IV. 17: Evolution de la structure en fonction des pourcentages de ciment

Nous remarquons dans ces configurations, que la couleur rouge qui présente la phase de ciment couvre de plus en plus le volume du structure selon les pourcentages de ciment rajoutés. Pour un pourcentage de 5% de ciment, la structure est plutôt couverte par les particules en bois (couleur verte) avec les vides remplis d'air.

5.2.3.2. Porosité

La porosité totale d'un matériau représente généralement la somme des pores fermés et ouverts. Ces derniers constituent les vides interstitiels interconnectés ou les vides séparés [189]. Schoeller [190], distingue ces deux catégories de pores en porosités ouvertes qui sont composées de vides inter-communicants connectés à la partie extérieure du matériau, dont les pores pénétrants ont la particularité de relier au moins deux faces de matériau poreux et les porosités fermées qui sont isolées à l'intérieur et qui ne permettent aucune perméabilité.

Ainsi, à l'échelle microscopique, chaque constituant de matériau a sa propre microporosité, donc, la loi de Darcy donne une valeur spécifique pour chacun de ces composants. Par conséquent, pour le constituant solide, sa valeur de Darcy tend vers zéro, et à l'inverse, le vide a une valeur qui tend vers l'infini. Cette définition est importante car la perméabilité résultante d'un mélange de ces matériaux suivra la proportionnalité de ces composants dans ce matériau, qui peut être traduit par sa porosité équivalente ou totale.

L'analyse numérique des données de la technique par micro-tomographie nous permet d'identifier la macroporosité du matériau, c'est-à-dire le volume de vides contenu entre les particules de bois et les granulats de ciment dans l'ensemble du matériau. Par contre, cette analyse ne permet pas de mesurer la microporosité.

	Air	Bois	Ciment
Volume	32,03%	43,57%	24,40%

Macroporosité	32,03%
----------------------	---------------

Tableau IV. 4: Macroporosité selon l'analyse de l'Imorph

La distribution de cette macroporosité est illustrée, selon l'analyse numérique sur la graphique suivante :

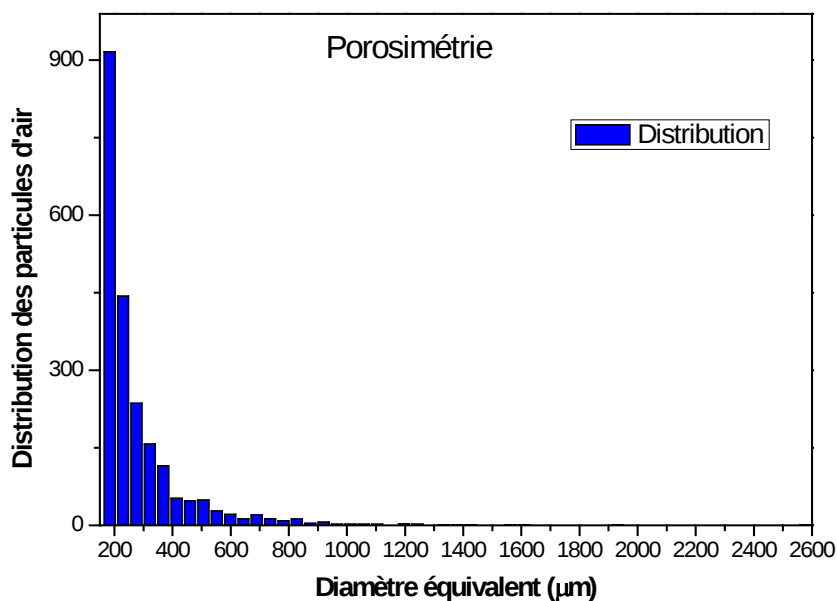


Figure IV. 18: Distribution porosimétrique dans le matériau

Nous constatons ici, que les pores à petites tailles sont les plus présents dans la structure. Par contre, les pores ayant un diamètre plus de 500 micromètres sont distribués d'une manière très faible. Ceci peut être expliqué par à l'encombrement des différents constituants de mélange solide (bois et ciment), ce qui emprisonne la phase d'air dans les petits vides.

5.2.3.3. Granulométrie

Il est important d'expliciter que l'outil *Imorph* utilise un standard de granulats de format sphérique pour calculer la granulométrie et dans ce cas, les granulats ont des formats irréguliers qui varient sur toutes les formes géométriques.

Selon la dernière norme applicable FR EN ISO 17225-2:2014 [191] les granulats de bois sont classifiés comme suit :

Appellation	Dimensions maximales de plus de 80% des plaquettes (en poids)	Dimensions en deçà desquelles les plaquettes doivent représenter moins de 5% du poids	Dimensions au-delà desquelles les plaquettes doivent représenter moins de 1% du poids
P8	$P < 8 \text{ mm}$	$< 1 \text{ mm}$	$< 45 \text{ mm}$
P16	$3,15 \text{ mm} < P < 16 \text{ mm}$	$< 1 \text{ mm}$	$> 45 \text{ mm}$, l'ensemble $< 85 \text{ mm}$
P45	$3,15 \text{ mm} < P < 45 \text{ mm}$	$< 1 \text{ mm}$	$> 63 \text{ mm}$
P63	$3,15 \text{ mm} < P < 63 \text{ mm}$	$< 1 \text{ mm}$	$> 100 \text{ mm}$
P100	$3,15 \text{ mm} < P < 100 \text{ mm}$	$< 1 \text{ mm}$	$> 200 \text{ mm}$
P300	$3,15 \text{ mm} < P < 300 \text{ mm}$	$< 1 \text{ mm}$	$> 400 \text{ mm}$

Tableau IV. 5: Classement des granulats de bois selon la norme FR EN ISO 17225-2:2004

Alors, au-delà la contrainte sur les formes des granulats de bois, l'échantillon analysé a une dimension de 14,9 x 15,4 x 11,5 mm, ce qui démontre que les appellations possibles des granulats restent dans l'intervalle P8 et P16. Par contre, comme le matériau étudié est très hétérogène, s'il avait un échantillon plus représentatif, certainement il aurait la présence des granulats de tailles plus grandes. Le graphe suivant illustre la distribution granulométrique.

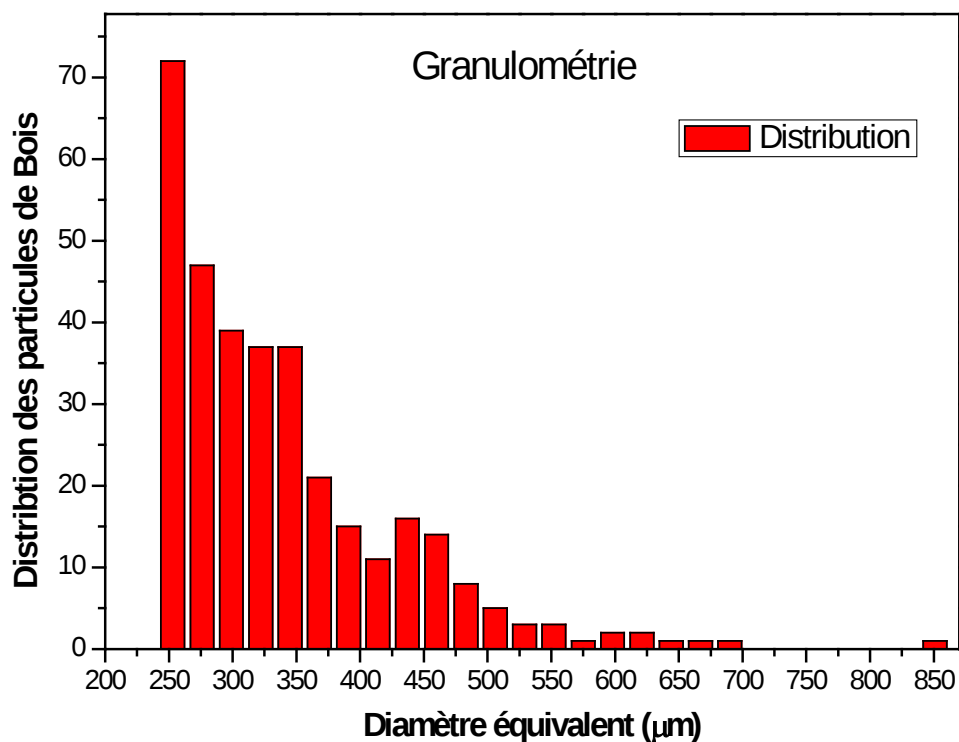


Figure IV. 19: Distribution granulométrique du matériau

Nous remarquons que les particules de petites diamètres sont les plus présents dans la structure. Puis, viennent les particules moyennes. Les particules de tailles plus au moins grandes présentent une très faible distribution. Ainsi, les granulats de bois présents dans l'échantillon peuvent être classifiés selon l'appellation P8. Par contre il est important de noter

que dans un échantillon très petit comme celui qui a été mesuré, les granulats plus grands sont presque tous coupés et le volume élémentaire représentatif (VER) est plus réduit de sorte qu'il ne tend pas vers l'homogénéité.

5.2.3.4. Tortuosité

La tortuosité est définie par la quantité adimensionnelle décrivant le parcours tortueux des capillaires, dans un milieu poreux solide. Cette notion est utilisée pour décrire la diffusion des molécules dans ce type de milieu.

Selon Epstein [191], la tortuosité τ^2 est exprimée par le carré du rapport entre le chemin de diffusion effective à travers un milieu poreux et sa longueur dans le même axe de diffusion, où τ est donnée comme suit :

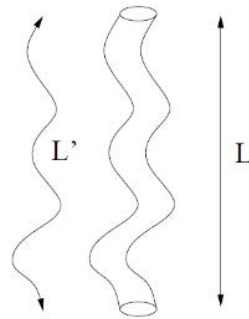


Figure IV. 20: Schéma illustrant la définition de la tortuosité : $\tau = L' / L$

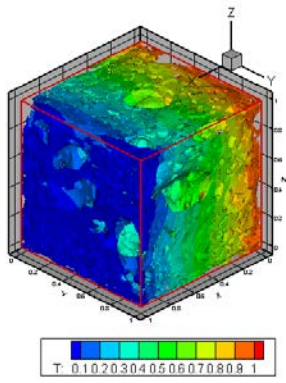
D'après l'analyse des trois plans d'injection présents dans le matériau, la tortuosité respective pour chacun de ces plans est présentée comme suit :

Plan d'injection	Distance moyenne parcourue (μm)	Distance entre les plans (μm)	Tortuosité	Écart type
X	16809,34	14536	1,16	0,09
Y	17226,72	15640	1,10	0,07
Z	13752,25	11500	1,20	0,11

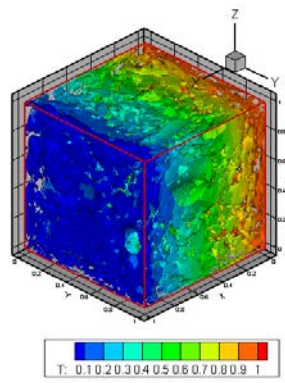
Tableau IV.6: Valeurs de la tortuosité

6. Analyse des champs de température

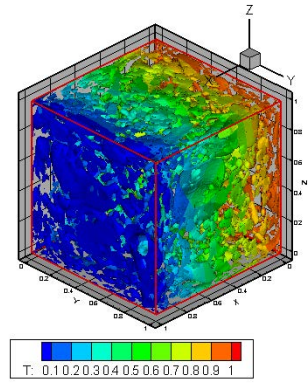
Dans cette partie, nous proposons d'étudier l'évolution de champ de température au sein de la structure. Pour ce fait, et afin d'illustrer le champ thermique, on représente le profil de température sur la ligne médiane horizontale X, pour des différents rapports de conductivité thermique. Trois cas de porosité ont été étudiés (15%,30%,50%)



(a) Porosité=15%

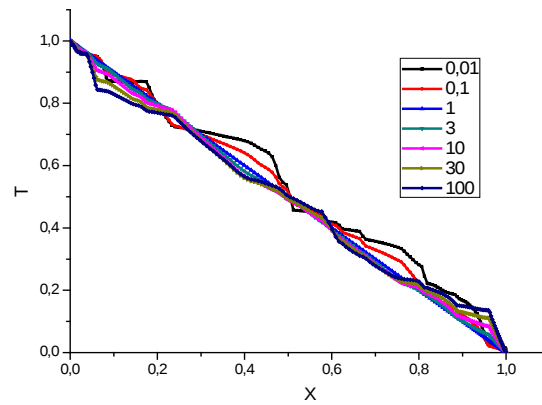


(b) Porosité=30%

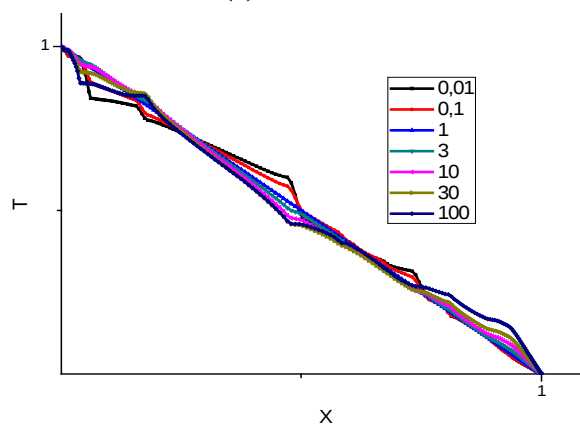


(a) Porosité=50%

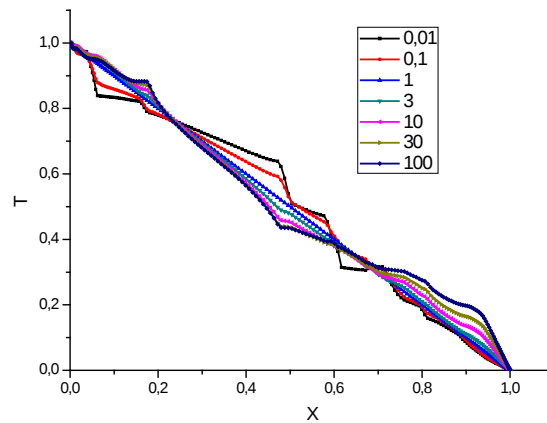
Figure IV. 21: Champs de température dans la structure poreuse



(a) Porosité=50%



(b) Porosité=30%



(a) Porosité=15%

Figure IV. 22: Profil de température sur la ligne médiane X pour différents cas des rapports de conductivité thermique

Ces courbes ont un peu près les mêmes allures. En effet, dans le cas correspondant à la conductivité thermique apparente équivalente de l'unité (ligne en bleu) qui présente un cas homogène où le profil de température reste linéaire en fonction de X. Pour des rapports de conductivité thermique plus faibles où le milieu poreux est considéré comme isolant, le gradient de température diminue fortement. Lorsque la conductivité thermique relative augmente, le domaine solide tend à homogénéiser le champ de température.

7. Analyse des propriétés équivalentes

7.1. Conductivité thermique

L'évolution des matériaux d'isolation qui sont souvent poreux dans le domaine de construction nécessite une connaissance approfondie de leurs propriétés thermo physiques. En effet, afin d'assurer une bonne isolation thermique, la propriété responsable de leur pouvoir d'isolation est la conductivité thermique. Cette propriété caractérisant chaque matériau s'étend sur plusieurs ordres de grandeur, de quelques dixièmes de $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour les polymères, à quelques centaines de $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour les métaux. La présence des pores dans les matériaux contribue ainsi à diminuer la conductivité thermique et à augmenter par conséquent ses capacités d'isolation.

Dans cette partie, nous essayons d'analyser l'effet des propriétés thermiques du ciment sur cette propriété pour le composite bois-ciment. En effet, nous savons que la conductivité

thermique du ciment est d'environ 10 fois supérieure à celle du bois. Donc plus le ciment est présent dans la structure, plus cette dernière est thermiquement conductrice.

Les études sur ce sujet s'attachent donc à mieux connaître les propriétés thermiques de ce type de mélange dans le but d'améliorer et d'optimiser le comportement global d'un système composite en conditions d'utilisation afin d'avoir des composites plus isolants et plus légers.

Dans notre cas, à l'aide des méthodes de microstructure en 3D décrites précédemment, nous proposons de déterminer la conductivité thermique apparente (ou effective) qu'aurait le milieu homogène équivalent au milieu hétérogène poreux. Afin de valider cette approche, une caractérisation par voie expérimentale, en utilisant la méthode de fil à chaud, est proposée au premier lieu.

7.1.1.Méthode de fil à chaud

La méthode que nous avons utilisée est la technique de fil chaud. Cette technique fait partie des techniques de mesure de la conductivité thermique en régime transitoire. La mesure consiste à placer une sonde entre un couple d'éprouvettes d'un matériau pour ainsi imposer un flux de chaleur entre elles.

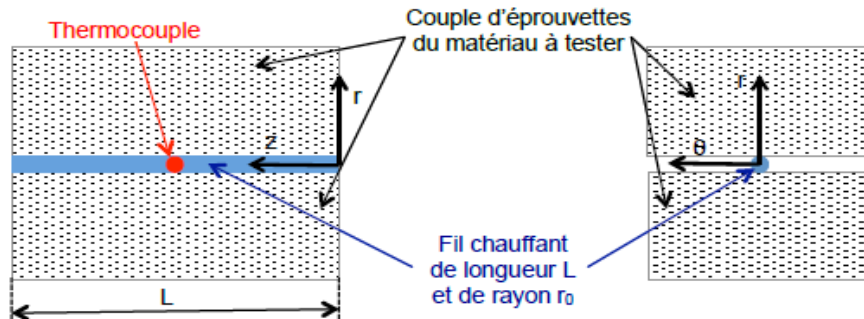


Figure IV. 23: Méthode du fil à chaud

Suite à ce flux de chaleur, la température dans les éprouvettes augmente. Cette augmentation de température est mesurée à l'aide d'un thermocouple lié au fil chaud. Un logiciel permet de visualiser l'évolution de la température, et par un traitement mathématique intégré dans ce logiciel, la valeur de la conductivité thermique est déterminée. Cet appareil est destiné à la mesure de conductivités thermiques comprises entre 0,02 W/m/K et 5 W/m/K en positionnant la sonde entre deux éléments constitués du matériau à tester.

Les paramètres des essais ont été les suivants :

Paramètres standards d'essai		
Échantillonnage	0,5	[s]
Durée	40	[s]
Source	0,2	[W]
Résistance	14	[ohms]
Points côtés	25	[%]

Tableau IV. 6: Paramètres des essais : Sonde fil chaud

Pour vérifier l'efficacité de cette méthode, il est nécessaire d'assurer la certitude des résultats présentés. Ainsi, il faut que l'onde de chaleur cylindrique diffusée de la sonde se propage de forme homogène vers le matériau, par contre à cause du haut degré d'hétérogénéité du présent matériau, les résultats peuvent présenter des écarts importants. Donc, le réglage des essais doit être bien défini pour atténuer les incertitudes. Le nombre d'essais lancé est fixé à 20 afin d'optimiser l'ensemble de données trouvées. Les mesures sont présentées comme suit:

Conductivité thermique équivalente			
Essai	λ_{eq}	Essai	λ_{eq}
1	0,186	11	0,186
2	0,185	12	0,184
3	0,187	13	0,185
4	0,184	14	0,184
5	0,187	15	0,186
6	0,184	16	0,187
7	0,185	17	0,185
8	0,187	18	0,184
9	0,185	19	0,186
10	0,184	20	0,184
$\lambda_{eq} \text{ moyenne } [W/m.K]$		0,18525	
Écart-type		$1,16 \times 10^{-3}$	

Tableau IV. 7 : Conductivité thermique équivalente par la méthode expérimentale

Alors, soit λ_{eq}^e la conductivité thermique équivalente trouvée par la méthode expérimentale :

$$\lambda_{eq}^e \sim 0,185 [W/m.K]$$

7.1.2.Méthodes numériques

D'après les simulations à travers la méthode de reconstruction en 3D suivie de calcul numérique par le schéma QUICK, le nombre de Nusselt de matériau étudié a la valeur suivante:

$$\boxed{\text{Nu} = 15,9}$$

Ce nombre de Nusselt permet de déduire la valeur du conductivité thermique équivalente à partir de la relation suivante:

$$\text{Nu} = \frac{\lambda_{\text{eq}}}{\lambda_f}$$

Dont λ_f est la conductivité thermique du fluide qui correspond à l'air dans notre cas d'étude ($\sim 10^{-2}$) et λ_{eq} est la conductivité thermique équivalente du matériau étudié. Ainsi la valeur numérique calculée de cette dernière est de l'ordre de la valeur suivante

$$\boxed{\lambda_{\text{eq}}^n \sim 0,159 \text{ [W/m.K]}}$$

En comparant les deux valeurs expérimentale et numérique de conductivité thermique de composite bois-ciment, nous remarquons que ces valeurs sont presque proches avec une certaine certitude. Ceci peut être expliqué par l'hétérogénéité du matériau. En plus les échantillons testés ont des taille pas suffisamment grandes pour atteindre un VER idéal.

Selon M. Bornert [192], pour avoir une certitude statistique nécessaire dans les résultats, le Volume Élémentaire Représentatif (VER) des échantillons doit être plus petit que la taille caractéristique de l'échantillon, pour pouvoir éventuellement être remplacé par un matériau homogène équivalent lors d'un calcul de structure. En même temps, il doit être aussi plus grand que la taille caractéristique des constituants afin que leur nombre soit suffisant pour permettre une représentation statistique correcte du matériau étudié. Ainsi, en calculant l'écart relatif entre les mesures par ces deux voies, on trouve un écart de $\sim 15\%$ entre eux, mais en valeurs absolues cet écart vaut $\sim 0,026 \text{ [W/m.K]}$. Ce qui nous permet d'affirmer que la méthode numérique utilisée est bien validée par rapport à la méthode expérimentale testée.

Ces résultats de conductivité thermique sont inférieurs à la conductivité thermique d'un béton ordinaire (qui varie entre $0,72$ et $2,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Ces résultats prouvent donc le pouvoir isolant des bétons de granulats de bois. Ceci a été aussi confirmé dans l'étude de Abdessamad Akkaoui [193]. En effet, la valeur moyenne de la conductivité thermique du béton de

granulats de bois trouvée dans leur étude, varie entre $0,24 \text{ W.m}^{-1} .\text{K}^{-1}$ et $0,57 \text{ W.m}^{-1} .\text{K}^{-1}$ selon la formulation de mélange étudié. De même pour le composite de liège étudié par El bakkouri et al [32] et Moreira et al. [33] qui ont démontré une faible conductivité thermique de ce composite. En effet, sa valeur est de $0,194$ à $0,318 \text{ W.m}^{-1} .\text{K}^{-1}$, selon le pourcentage du liège incorporé dans le mélange.

7.1.3. Analyse de l'effet de ciment

En analysant les mêmes configurations dans la figure (IV.17), suite aux simulations relaissées pour des différents cas de porosité du milieu ainsi que du pourcentage de ciment par rapport au volume total du matériau. Le calcul de la conductivité thermique de chaque composition permet d'obtenir les résultats suivants:

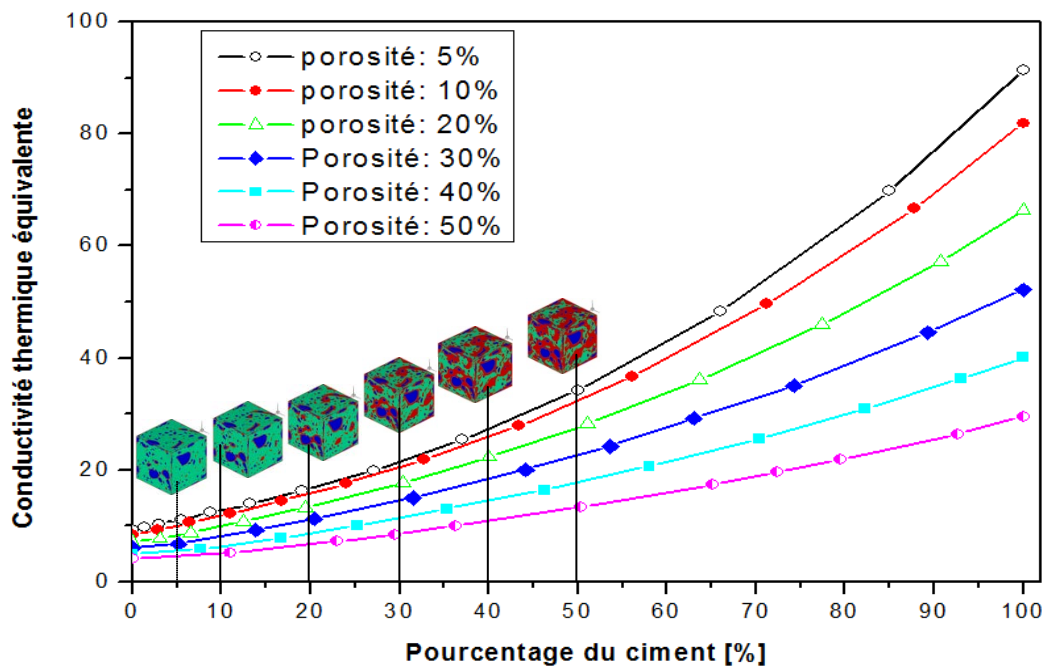


Figure IV. 24: Variation de conductivité thermique équivalente en fonction des pourcentages de ciment dans le mélange et la porosité de matériau

D'après cette figure, nous constatons clairement que le matériau est plus isolant pour les grandes porosités. Plus la porosité augmente, plus la conductivité thermique est faible. De même, avec des faibles pourcentages de ciment, le composite a une conductivité thermique équivalente plus faible. Ce qui est normal, comme c'est expliqué précédemment, que le ciment se caractérise par une conductivité thermique plus importante que le bois, donc plus cet élément est présent dans le mélange, plus le matériau devient conducteur.

7.2.Perméabilité au gaz

Après la prédiction des microstructures virtuelles assimilables aux microstructures réelles du matériau hétérogène étudié (composite bois-ciment) et après avoir prédire le comportement thermique et les propriétés thermiques de ce matériau, la prédiction de la perméabilité à la vapeur a été aussi effectuée. La prédiction de ce paramètre est aussi réalisée de la même manière que celle de conductivité thermique. En effet, en utilisant le modèle proposé dans la première partie de ce chapitre, le calcul de la perméabilité équivalente par simulation numérique a été réalisé. La détermination de cette propriété par une voie indirecte comme la simulation est ainsi justifiée de point de vue économique. En outre cette solution est plus efficace que la détermination par voie expérimentale en raison de la nature hétérogène des matériaux poreux.

Dans la littérature, plusieurs modèles ont été présentés afin de prédire la perméabilité en fonction de plusieurs facteurs liés à la structure comme la porosité, la taille des pores et la distribution des particules dans le milieu. La plupart de ces modèles ont été déjà exposés dans la dernière section du premier chapitre.

Selon la Loi de Darcy, la perméabilité du milieu varie selon la vitesse v d'injection du fluide et la variation de pression ΔP entre l'entrée et la sortie du domaine d'écoulement. Ainsi, pour trouver la perméabilité du matériau, il est nécessaire de trouver la pente de la droite formée par v en fonction de ΔP , qui est traduit par la valeur de Darcy. Cette pente a été calculée pour des différents cas de porosité comme le montre le graphe suivant:

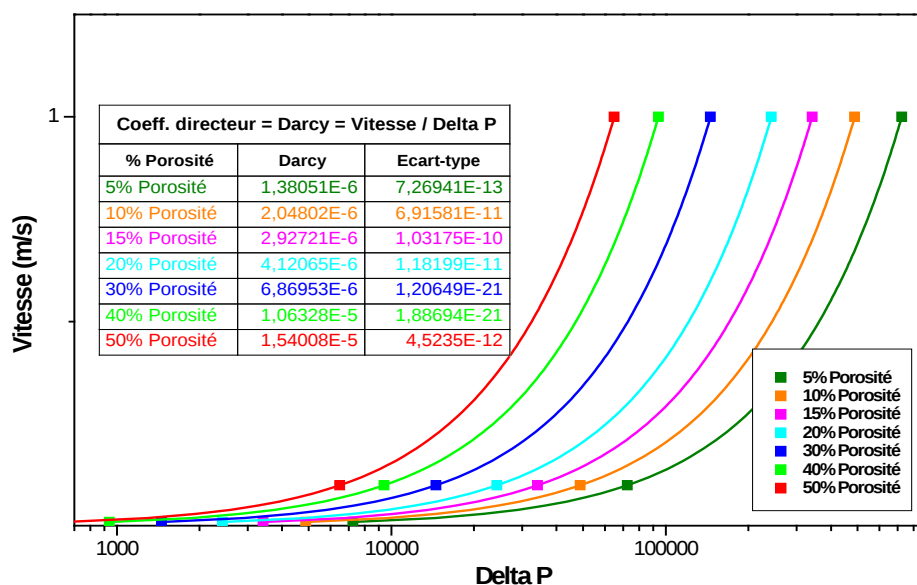


Figure IV. 25: Différents valeurs pour Darcy

Alors, pour un écoulement d'air parmi les granulats de bois et ciment, on a les résultats suivants selon plusieurs pourcentages de porosité avec $\mu_{air} = 1,85 * 10^{-5} \left[\frac{kg}{ms} \right]$:

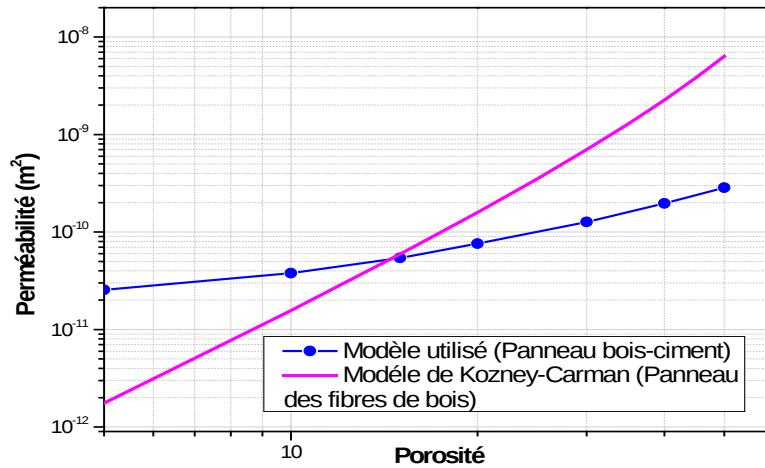


Figure IV. 26: Variation de perméabilité en fonction de la porosité et en comparaison avec le modèle de Kozney-Carman

Le graphe précédent compare les valeurs de perméabilité trouvées par notre modèle avec celles trouvées par le modèle de Kozeny-Carman adapté à un matériau de fibres de bois [194]. Nous remarquons ainsi que la perméabilité augmente en fonction de la porosité. Plus le milieu est poreux, plus sa capacité à laisser l'infiltration d'un écoulement est importante. Cependant l'allure des deux courbes n'est pas la même. En effet, nous observons une inclinaison de la courbe de Kozeny-Carman qui illustre une rapidité d'accroissement de perméabilité en fonction du pourcentage de porosité. Alors que le profil de perméabilité de notre matériau d'étude est un peu différent de celle du modèle de Kozeny-Carman qui montre une croissance de perméabilité plus légère, ce qui peut être justifié par la différence entre les deux types de composants présents aux deux modèles comparés.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, une approche de caractérisation microscopique via la technique microtopographie couplée à une simulation numérique grâce à une reconstruction en 3D a été proposée. L'étude consiste à caractériser une structure hétérogène lignocellulosique qui s'agit d'un composite poreux constitué de bois et de ciment. Cette caractérisation a été mise en place afin de prédire les propriétés thermophysiques équivalentes du matériau à travers l'expérience et la modélisation numérique.

Pour cet objectif, un modèle de transfert de chaleur et d'écoulement en trois dimensions dans un milieu poreux a été développé. Ce milieu est configuré comme un bloc tridimensionnel parallélépipédique chauffé par une extrémité et refroidie de l'autre extrémité parallèle. La méthode des volumes finis a été ainsi introduite pour la résolution. La validation de modèle a été entreprise en premier lieu en comparant les résultats fournis par cette méthodologie avec ceux fournis par des approches analytiques et numériques.

Par la suite une reconstruction en 3D d'un l'échantillon du panneau bois-ciment qui a été converti en données numériques à travers la micro-tomographie a été réalisée. Ce mélange est, pour rappel, constitué de trois phases: air, bois et ciment dont ce dernier constitue le liant hydraulique dans cette composition. Ainsi, afin de mieux visualiser les fractions volumiques de ciment dans le mélange, plusieurs simulations pour des différents pourcentages de ciment ont été établies. L'observation visuelle de la microstructure poreuse et hétérogène et l'effet des proportions de ciment dans la composition ont été ainsi procédés. La prédiction des propriétés équivalentes de ce composite a été aussi effectuée. Il était constaté que la perméabilité ainsi que la conductivité thermique de ce composite dépendent fortement de la porosité et la distribution des pores dans la phase continue (la phase solide). De plus ces deux paramètres dépendent fortement des pourcentages de ciment dans la structure. Plus le pourcentage de ciment est important dans le mélange, plus la conductivité thermique augmente. Ce qui fait qu'un matériau biosourcé avec une grande proportion de ciment risque de perdre son caractère d'isolation en introduisant ces particules minérales.

Conclusions Générales et Perspectives

La nécessité de la maintenance des structures et de la gestion d'énergie dans le secteur habitat laisse les attentions s'orienter davantage vers les matériaux utilisés dans la construction.

Dans ce cadre, les matériaux biosourcés sont devenus de plus en plus des candidats prometteurs dans les ouvrages en construction ou en rénovation.

Les travaux présentés dans cette thèse, constituent une contribution dans ce contexte dont l'objectif est l'étude des propriétés et des performances des matériaux biosourcés de composition hétérogène. Cette étude a été maintenue à travers une analyse des phénomènes de transfert de chaleur et de masse au sein d'un milieu poreux de type bois. Suivie par une évaluation des propriétés thermophysiques équivalentes d'un composite de mélange bois-ciment moyennant des méthodes expérimentales et numériques.

Dans un premier temps, une synthèse bibliographique sur les matériaux biosourcés, notamment les mélanges multi constituants de type bétons végétaux a été présentée. Ces matériaux, d'une part, ont une structure hétérogène ce qui peut générer une difficulté dans la détermination de leurs propriétés thermophysiques. Pour cela, une partie de cette synthèse, a été consacrée à la description des différentes méthodes et outils d'estimation des propriétés équivalentes des milieux complexes. Des modèles de prédiction des conductivités thermique et hydraulique sont ainsi cités.

D'autre part, et du à leurs caractères poreux et hygroscopique, ces matériaux font le siège de plusieurs phénomènes de transfert de chaleur et de fixation d'humidité. Ces derniers sont traduits par des modèles mathématiques gérés par des lois de transport et de conservation d'énergie et de masse.

Dans un deuxième temps, et afin de déterminer le comportement hygrothermique du matériau, un modèle mathématique est proposé. Ce modèle est basé sur trois équations décrivant le transfert de chaleur, d'air et d'humidité connu par le modèle (HAM transferts), en intégrant simultanément l'effet de la diffusion thermique et du phénomène d'infiltration au sein d'un matériau bois massif. La mise en œuvre et résolution du modèle est réalisée via le logiciel COMSOL Multiphysics. Les paramètres d'entrées du modèle ont été évalués expérimentalement selon les normes reconnues dans la caractérisation des matériaux. Par

conséquent, de nombreuses séries de calcul hygrothermique ont été effectuées pour deux configurations (1D et 2D) afin d'évaluer l'effet des dimensions. Dans une première étape, une comparaison entre la résolution du modèle en une et deux dimensions a été établie. L'effet de la résolution 2D a été seulement apposé lorsque nous avons pris en compte la dépendance des conditions aux limites sur l'axe vertical. En outre, deux types de conditions aux limites ont été examinés. Le premier est à l'échelle du matériau, il s'agit des conditions de séchage du bois. Le deuxième type de ces conditions est à l'échelle de la paroi, où des conditions climatiques sont considérées.

La sensibilité du modèle a été traitée dans une deuxième étape, dont une analyse de variabilité des deux coefficients moteurs (diffusion thermique et diffusion massique) a été effectuée. Les résultats de simulation montrent que la conductivité thermique et la diffusion de la vapeur d'eau affectent la migration d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment par la contribution des termes couplés dans les équations du modèle et ils affectent un peu moins le profil de température. La sensibilité du modèle au couplage a été également effectuée. La prise en compte du couplage entre les différents moteurs de transferts donne des résultats plus fiables que dans le cas de découplage.

Le matériau testé dans cette analyse numérique est considéré homogène dont le seul composant est le bois. Ainsi, pour un cas d'un matériau hétérogène où les propriétés thermophysiques prennent en compte les différents constituants du mélange, le modèle ne sera plus applicable qu'après la prédiction des propriétés thermophysiques équivalentes de ce type de matériau. Pour cela, la prédiction des propriétés thermophysiques équivalentes du matériau étudié (composite bois-ciment) a fait l'objet de la suite de ce travail.

Le choix de ce matériau a été fixé dans un contexte transfrontalier local dans le cadre d'un projet appelé ECOTRANSFAIRE. L'objectif de ce projet est d'étudier de la faisabilité d'une filière des éco matériaux dans la grande région (France, Luxembourg, Belgique). Une méthodologie d'analyse sur plusieurs aspects (socioéconomiques et environnementaux) nous a conduit à identifier huit matériaux candidats, dans cette filière. La liste de ces matériaux comporte des panneaux à base des fibres de bois ou des copeaux de bois, des panneaux de fibres de textiles recyclés et un panneau bois-ciment. Ainsi, une évaluation des réponses thermohydriques de ces matériaux par un test expérimental MBV (Moisture Buffer Value) a été effectuée. Il était marqué que les matériaux à base des fibres ont de bonnes réponses hydriques par rapport aux panneaux compactés de bois. Cependant le composite bois-ciment,

caractérisé par une composition hétérogène, a marqué une valeur MBV très importante par rapport aux autres matériaux étudiés. La prédiction des propriétés intrinsèques équivalentes de ce mélange biocomposite ainsi que l'effet des pourcentages des éléments de composition sur ses propriétés thermo physiques a été réalisée à travers une caractérisation microscopique via la technique microtopographie couplée à une simulation numérique en 3D.

Pour cet objectif, un modèle de transfert de chaleur et d'écoulement en trois dimensions dans un milieu poreux a été développé. Ce milieu est configuré comme un bloc tridimensionnel parallélépipédique chauffé d'une extrémité et refroidi de l'autre extrémité parallèle. La méthode des volumes finis a été ainsi introduite pour la résolution et pour la détermination des conductivités thermique et hydraulique (perméabilité) équivalentes. La conductivité thermique a été analysée par cette voie numérique et également par des mesures expérimentales à l'aide de la méthode de fil à chaud. Les valeurs prédites numériquement ont été en confrontation avec les mesures expérimentales. Il était constaté également que la perméabilité ainsi que la conductivité thermique de ce composite dépendent fortement de la porosité et la distribution des pores dans la phase continue (la phase solide). De plus, ces deux paramètres dépendent fortement des pourcentages de ciment dans la structure. En effet, plus le pourcentage de ciment est important dans le mélange, plus la conductivité thermique augmente. Ce qui fait qu'un matériau biosourcé avec une grande proportion de ciment risque de perdre son caractère d'isolation en introduisant des particules minérales.

L'ensemble des travaux réalisés dans cette étude soulèvent plusieurs pistes de recherches et ouvrent de nombreuses perspectives.

Concernant la partie modélisation,

- Une amélioration de la description des phénomènes physiques de transferts de chaleur et d'humidité au sein des matériaux poreux de construction doit être envisagée. En effet, la prise en compte de l'hétérogénéité d'un matériau multi constituant s'avère intéressant afin de bien décrire le comportement réel du matériau bois-ciment étudié, avec ses différentes phases.
- L'évaluation des phénomènes d'hystérésis dans ce modèle demeure aussi un objectif à suivre pour évaluer son effet sur le comportement d'un matériau composite hygroscopique.

- La description de comportement hygrothermique à travers le modèle HAM de composite bois-ciment à l'échelle de paroi et sa contribution à la maintenance de confort thermique est aussi envisagée.
- La modélisation du comportement hygrothermique de ce matériau en considérant les mécanismes de dégradation causés par l'humidité constitue aussi une étape indispensable pour la prédiction de la durabilité et le cycle de vie du matériau.

Concernant la partie caractérisation;

- La détermination des isothermes de sorption demeure une étape nécessaire pour la caractérisation du matériau.
- Des essais mécaniques demeurent aussi indispensables afin d'évaluer la rigidité et la durabilité du matériau étudié.
- Il est intéressant proposer la caractérisation du matériau donnée par des plus amples champs possibles, notamment sa résistance physique et son comportement après des réactions chimiques, ainsi que, l'analyse d'un modèle contenant une percolation de colle ciment (analogue à une fissure) et de plus une étude afin d'obtenir la température limite à l'intérieur du matériau pour éviter la brûlure des composites

Références

- [1] L. Marcel. *L'énergie Au Quotidien*. 2011.
- [2] Climat Change (2001), <http://www.climatechange.gc.ca>
- [3] Carole-Anne Sénit , L'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel : *une analyse des politiques des pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée*, 2008
- [4]R. Missaoui, Energy efficiency in the construction sector in the Mediterranean: baseline study for Tunisia, *MED-ENEC*, mars 2006
- [5] : J.Kaboursky (1975) : *Règle du pont thermique*.
- [6] F. Allard (1978) : Etude des ponts thermiques des parois de bâtiment en régime variable des températures. *Thèse de Doctorat à l'université de Lyon*.
- [7] Centre Scientifique et Technique du bâtiment. Comparaison internationale bâtiment et énergie. *Rapport intermédiaire 2007*
- [8] G. Escadeillas, Les éco-matériaux dans la construction: Enjeux et perspectives. *Septieme edition des Journees scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le beton (RF) B*, 2006, vol. 2.
- [9] C. Loïc. Les politiques d'efficacité énergétique en France et en Allemagne: quand deux voisins empruntent des chemins différents. *Rapport intermédiaire 2012*.
- [10] P. Lecuelle . La basse et très basse énergie dans l'habitat neuf et rénové : état des lieux et retours d'expérience de 4 pays européens. *Rapport Energivie 2005*.
- [11] C.Jean. Comparaison internationale bâtiment et énergie, *Rapport intermédiaire*. 2006.
- [12] N. Wahid. Contribution à l'étude numérique du comportement du béton et des structures en béton armé soumises à des sollicitations thermiques et mécaniques couplées: une approche thermo-élasto-plastique endommageable. 2000. *Thèse de doctorat*.
- [13] N.Vincent. Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal: application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux. 2012. *Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II*.
- [14] P-T. Fernando et J.Said , Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, no 5, p. 832-838.
- [15] P-T. Fernando et J.Said, Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*, 2011, vol. 25, no 2, p. 575-581.
- [16] G. Ramakrishna, G. et T. Sundararajan, Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study. *Cement and concrete composites*, 2005, vol. 27, no 5, p. 547-553.

- [17] C.Laetitia, B.Christophe, I.Mark, *et al.* Produits à base de bois en fin de vie: une ressource pour l'industrie chimique.
- [18] A. Alabdallah, *et al.* Étude expérimentale de l'effet de l'empilement sur les caractéristiques mécaniques des stratifiés (verre/polyester).
- [19] B.Christophe. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Ed. Techniques Ingénieur*, 2005.
- [20] F. De larrard, A.Lecomte, et R. Mensi, Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques: cas des granulats calcaires tunisiens. 2007.
- [21] G.Bruno et L-R.André. Alkali-réaction dans le béton: mécanisme, pathologie et prévention. *Techniques de l'ingénieur. Construction*, 1995, vol. 3, no C2252, p. C2252. 1-C2252. 13.
- [22] Y. Hustache, et L. Arnaud, Programme d'essais complémentaires concernant la mise en œuvre des bétons de chanvre sur chantier. Validation des règles professionnelles. *Rapport final, CONSTRUIRE EN CHANVRE, Rapport de recherche pour le compte de la DGUHC*, 2008.
- [23] S. Elfordy, F. Lucas, F., Tancrét, *et al.* Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hemcrete") manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, 2008, vol. 22, no 10, p. 2116-2123.
- [24] T. Seni. Bétons légers à base de déchets cellulósiques. 2001. *Thèse de doctorat*.
- [25] K.Hamid. Matériaux argileux stabilisés au ciment et renforcés de fibres végétales: formulation pour extrusion. 2012. *Thèse de doctorat. Lorient*.
- [26] M.Éric. Mise au point d'un composite ciment-bois dont les variations dimensionnelles vis-à-vis des variations d'humidité sont contrôlées. 1992. *Thèse de doctorat*.
- [27] A. L. Beraldo, Ultrasonic speed wave: cure type influence on wood-cement composite compression strength. *Proceedings of the NDTISS*, 1999, vol. 99, p. 86-90.
- [28] L.Ali. Contribution a l'etude d'un beton de bois mise au point d'un procede de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois. 1997. *Thèse de doctorat*.
- [29] C.Pascale, J.Raoul, et R.Frank. Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and building Materials*, 2006, vol. 20, no 9, p. 776-781.
- [30] M.Bederina, L.Marmoret, L. Mezreb, Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*, 2007, vol. 21, no 3, p. 662-668.
- [31] S.Kermit , N.Michael et M. George W. Composite shingle having shading zones in different planes. *U.S. Patent No 5,426,902*, 27 juin 1995.

- [32] E-B, Abderrahman, E.Hassan, A.Taïb, *et al* .Etude thermomecanique du beton allège avec du liege et du beton allège avec des grignons d'olive. *12èmes Journées Internationales de Thermique*, 2005, p. 307-310.
- [33] A.Moreira, J. António, and A. Tadeu. "Lightweight Screed Containing Cork Granules: Mechanical and Hygrothermal Characterization." *Cement and Concrete Composites* 49 (May): 1– 8. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.01.012.
- [34] M.Chadi , M.Tala , B.Hocine , L.Mohammed, B.Azzedine," Etude expérimentale et numérique d'un composite à base de ciment-liège", *Conférence IBPSA France – Marne-la-Vallée – 2016*
- [35] P.Sylvie, C.Florence, G.Patrick, *et al*. Variation des propriétés thermiques de bétons de chanvre en fonction de la formulation. *Congrès français de thermique-Efficacité énergétique*, Vannes, 2009, vol. 2, p. 865-870.
- [36] A.Marie-Ange, B.Ketty, et A. Ouensanga, Etude d'un matériau composite ciment/fibre de bagasse de canne à sucre. *Revue Composites et Matériaux Avancés*, 2001, vol. 11, no 1-2.
- [37] B.Pascal. Elaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté. Amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqués en gypse. 2002. *Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*.
- [38] S.Ouattara, BOFFOUE, M. O., ASSANDE, A. A., *et al*. Use of Vegetable Fibers as Reinforcement in the Structure of Compressed Ground Bricks: Influence of Sawdust on the Rheological Properties of Compressed Clay Brick. *American Journal of Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 4, no 1, p. 13-19.
- [39] M. Dahli et R. Toubal, Matériau isolant thermique à base de déchets ménagers et oléicoles. *Revue des Energies Renouvelables*, 2010, vol. 13, no 2, p. 339-346.
- [40] P. D. Evans, Wood-cement composites in the Asia-Pacific region. 2002.
- [41] A. A. Moslemi, et H.Margaret. Fiber and particleboards bonded with inorganic binders. *Forest Products Research Society*, 1989
- [42] R.S.P. Coutts, and V. Ridikas, Refined wood-fibre- cement products. *Appita*, 35, 395–400 .1982.
- [43] M. Tachi, J. Tange, W. Nagadomi, , Y.Suzuki, N. Terashima, and S. Yasuda, 1989. Manufacture of wood-cement boards IV. Cement-hardening inhibitory components of the Malaysian fast-growing tree, *Acacia mangium*. *Journal of the Japan Wood Research Society*, 35, 731–735.
- [44] H.M.'Hamed et A. Moslemi, Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. *Forest products journal (USA)*, 1989.

- [37] K .Al Rim, A.Ledhem, O .Douzane, *et al.* Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. *Cement and Concrete Composites*, 1999, vol. 21, no 4, p. 269-276.
- [45] M.Eric, B.Antonio Ludovico, et Z.Andre. Controlled dimensional variations of a wood-cement composite. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 1995, vol. 49, no 5, p. 471-477.
- [46] A.Ledhem, R. M. Dheilily, M., Benmalek, *et al.* Minimisation de la sensibilité à l'eau de composites cimentaires argile-schistes-bois. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, vol. 27, no 1, p. 101-111.
- [47] A. Bouguerra, , A. Ledhemde, F.Barquin, *et al.* Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. *Cement and concrete research*, 1998, vol. 28, no 8, p. 1179-1190.
- [48] YOUSSEF, Alice, PICANDET, Vincent, LECOMPTE, Thibaut, *et al.* Comportement du béton de chanvre en compression simple et cisaillement. In : *Rencontres Universitaires de Génie Civil*. 2015.
- [49] A.O; Yacine. Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre. 2013. *Thèse de doctorat. Rennes, INSA*.
- [50] L. Arnaud, Mechanical and thermal properties of hemp mortars and wools: experimental and theoretical approaches, Bioresources Hemp 2000 & other fibre crops, Wolfburg. Nova Institut, Hürth, Germany, 2000.
- [51] C. Florence. Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux. *INSA Rennes*, 2004.
- [52] C. Véronique. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. 2005. *Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat*.
- [53] E.Arnaud. 2006. Sorption behavior of lime-hemp concrete and its relation to indoor comfort and energy demand. *23rd Conference on passive and low energy architecture, Geneva*.
- [54] E. Gourlay, P. GLÉ, L.Arnaud, *et al.* Propriétés multiphysiques des bétons de chanvre. *Matériaux & Techniques*, 2011, vol. 99, no 6, p. 625-631.
- [55] C. Julien. Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation. 2013. *Thèse de doctorat. INSA de Rennes*.
- [56] S.Driss. Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique. 2008. *Thèse de doctorat. INSA Lyon*.

- [57] L. Anh Dung Tran. Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (sous titre: simulation numérique et approche expérimentale). 2010. *Thèse de doctorat. Université de Reims-Champagne Ardenne*.
- [58] B. Zdeněk P. et O. Byung , Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et construction*, 1983, vol. 16, no 3, p. 155-177.
- [59] H. Schorn, et U. Rode, Numerical simulation of crack propagation from microcracking to fracture. *Cement and Concrete Composites*, 1991, vol. 13, no 2, p. 87-94.
- [60] E. Schlangen, et J. G. M. Van Mier, Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures. *Materials and Structures*, 1992, vol. 25, no 9, p. 534-542.
- [61] T. Whiteman, D. D. Lichti, et I. Chandler, Measurement of deflections in concrete beams by close-range digital photogrammetry. In : *Proceedings of the Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*. 2002. p. 9-12.
- [62] F. Mohammed Yacine, B. Rafik, et L. Karim. Effect of hygrothermal transfer on multilayer walls behavior, assessment of condensation risk. In : *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications, 2014. p. 647-655.
- [63] V. Géraldine, B. Véronique, K. Carmen, *et al.* Mesure de la perméabilité aux gaz en fonction du taux de saturation des bétons. *Revue française de génie civil*, 2001, vol. 5, no 2-3, p. 251-268.
- [64] A. Kamilia. Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux de construction. 2012. *Thèse de doctorat. La Rochelle*.
- [65] A. Kozłowska, , R. Kozłowski, *et al.* Analysis of water adsorption by wood using the Guggenheim-Anderson-de Boer equation. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2012, vol. 70, no 4, p. 445-451.
- [66] S. Brunauer, P. H., Emmett, E. Et Teller, BET Equation. *Journal American Society*, 1938, vol. 60, p. 809-815.
- [67] M. Seddik, D. Frédéric, et P. Christophe. Modélisation des hystérésis de sorption dans les matériaux hygroscopiques. *Comptes Rendus Mécanique*, 2009, vol. 337, no 1, p. 34-39.
- [68] IUPAC, (1985). Reporting Physisorption data for Gas/solid Systems. , Vol. 57, pp. 603-619.
- [69] A. Abdessamad. Bétons de granulats de bois: étude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles. 2014. *Thèse de doctorat. Paris Est*.
- [70] S. Whitaker (1977). Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying. In *Advances in Heat Transfer*. Elsevier, pp. 119-203.

- [71] J.B.Keller, (1977). Effective behavior of heterogeneous media. *Statistical Mechanics and statistical Method in theory and Application*, U. Landman, ed. New York. Plenum, pp. 631-644.
- [72] O. Millet, A. Ait-Mokhtar et O. Amiri,(2008). Determination of the macroscopic chloride diffusivity in cementitious porous materials by coupling periodic homogenization of Nernst-Planck equation with experimental protocol. *International Journal of Multiphysics*, 2 , Vol. 17, pp. 129-145
- [73] T. Bénédicte. Transferts par capillarité et évaporation dans des roches—rôle des structures de porosité. 2001. *Thèse de doctorat. Rapport de thèse, Université Louis Pasteur, le 09 Juillet.*
- [74] N.Benoît. Elaboration, caractérisation et modélisation de matériaux poreux: Influence de la structure poreuse sur la conductivité thermique effective. 2005. *Thèse de doctorat. Université de Limoges. Faculté des sciences et techniques.*
- [75] P.Thanh Hung, F.Julien, P.Vincent, *et al.* Etude expérimentale et numérique de la conductivité thermique d'un composite chaux-chanvre. *XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie*, 2012, vol. 6.
- [76] Y.Xu, K.Yagi, Automatic FEM model generation for evaluating thermal conductivity of composite with random materials arrangement. *Computational Materials Science* 2004, 30, 242-250.
- [77] B. Michel. Morphologie microstructurale et comportement mécanique; caractérisations expérimentales, approches par bornes et estimations auto cohérentes généralisées. 1996. *Thèse de doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées.*
- [78] M.Nadjiba. Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide. 2016. *Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider de Biskra.*
- [79] D. Sarra, E. Anissa, C. Sabine, *et al.* Investigation expérimentale et modélisation multi-échelle des propriétés thermiques des bétons incorporant des Matériaux à Changement de Phase (MCP). In : *Annales du Bâtiment et des travaux publics*. Editions ESKA, 2013. p. 33.
- [80] C. Florence et P. Sylvie. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and building materials*, 2014, vol. 65, p. 612-619.
- [81] M.,Bederina, Marmoret, L., Mezreb, K., *Et al.* Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*, 2007, vol. 21, no 3, p. 662-668.
- [82] D.C.Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, *3rd edn, vol 1, et 2, chap, 9, vol 1, article 314, Dover, New York, 1954.*
- [83] R.L.Hamilton, O.K.Crosser, thermal conductivity of heterogeneous systems, *Ind.Engng Chem, vol 1 (3), 1969, pp 187-191.*

- [84] T. Lewis, Et L. Nielsen, Ribbon-reinforced composites. *U.S. Patent No 3,790,438*, 5 févr. 1974.
- [85] S. Nassima. Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation. *Univ. Mentouri-Constantine*, 2010.
- [86] M. Z., BESSENOUCI, TRIKI, EN Bibi, KHELLADI, S., *et al.* Approches théoriques de la conductivité thermique apparente du béton de pouzzolane à l'aide d'une modélisation des matériaux poreux. *Revue des Energies Renouvelables*, 2011, vol. 14, no 3, p. 427-440.
- [87] J. Lux , A. Ahmadi ,C. Gobbe ,C. Delisée , Macroscopic thermal properties of real fibrous materials : volume averaging method and 3D image analysis, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Volume 49, Issues 11- 12, (June 2006), pp. 1958-1973.
- [88] E.Walther, R.Bennacer et C. Desa, (2014). Lattice Boltzmann method applied to diffusion in restructured heterogeneous media. In *Defect and Diffusion Forum* (Vol. 354, pp. 237-242). Trans Tech Publications.
- [89] M.BOGDAN, E.ROUBIN, J. B.COLLIAT, *et al.* Morphological modeling of cement based materials and hydration process. In : *Conference proceedings, Microdurability*. 2012.
- [90] T.C. Powers, & T.L. Brownyard, Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. *J. Am. Concr. Inst.* (1947) **43**:101-132,249-336,469-505,845-880,933-992
- [91] P.Wriggers, & S. O. Moftah, (2006). Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour. *Finite elements in analysis and design*, 42(7), 623-636.
- [92] E-S.Rayane, L.Jérôme, et S.Patrick. Caractérisation et prédiction des propriétés thermiques de laines de chanvre à l'aide d'images tomographiques.
- [93] W.Jun Feng et H.Wook Ryol. Permeability prediction of fibrous porous media in a bi-periodic domain. *Journal of composite materials*, 2008, vol. 42, no 9, p. 909-929.
- [94] L.Elodie. Etude expérimentale des roches à très faible perméabilité par la mise en œuvre d'un perméamètre de précision. 2002. *Thèse de doctorat. Université Montpellier II*.
- [95] P.Vincent. Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons. 2001. *Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes*.
- [96] H.Ameur El Amine. Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires. 2009. *Thèse de doctorat. Université de La Rochelle*.
- [97] L.Bertrand. Influence des déformations d'un renfort fibreux sur sa perméabilité: modélisations et expériences. 2008. *Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech*.

- [98] P. Carman, (1937), Fluid flow through a granular bed, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **15**, 150–167.
- [99] A. Katz and A. Thompson (1985), Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation, *Phys. Rev. Lett.*, **54**, 1325–1328
- [100] A. AÏT–MOKHTAR, A.Ouali, et S. Sammartinot, Analytic modelling and experimental study of the porosity and permeability of a porous medium—application to cement mortars and granitic rock. *Magazine of Concrete Research*, 1999, vol. 51, no 6, p. 391-396.
- [101] V. Klaas. Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials. *TU Delft, Delft University of Technology*, 1991.
- [102] C. PIGNAT, P. NAVI, et K. SCRIVENER, Simulation of cement paste microstructure hydration, pore space characterization and permeability determination. *Materials and structures*, 2005, vol. 38, no 4, p. 459-466.
- [103] P. Dale BENTZ, Three-Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development. *Journal of the American Ceramic Society*, 1997, vol. 80, no 1, p. 3-21.
- [104] D.Hans P. *et al.* Histologic Observations in Human Hepatitis Non-A, Non-B. *Hepatology*, 1982, vol. 2, no 5.
- [105] K. Scott. The nature of percolation ‘channels’. *Solid State Communications*, 1973, vol. 12, no 12, p. 1279-1283.
- [106] ZHU, Baolong, CHEN, Tony HH, et LI, Paul H. Activation of two osmotin-like protein genes by abiotic stimuli and fungal pathogen in transgenic potato plants. *Plant Physiology*, 1995, vol. 108, no 3, p. 929-937.
- [107] B.Serge. Natural convection in porous media. In : *Advances in transport phenomena in porous media*. Springer Netherlands, 1987. p. 77-141.
- [108] B.Alain, Q.Michel, et W.Stephen. Éléments de comparaison entre la méthode d’homogénéisation et la méthode de prise de moyenne avec fermeture. 1988.
- [109] B. David J. Les méthodes de l’homogénéisation: théorie et applications en physique. *Eyrolles*, 1985.
- [110] F.Mohammed Yacine, D.Rabah, L.Karim, *et al.* Hygrothermal behavior modeling of the hygroscopic envelopes of buildings: A dynamic co-simulation approach. In : *Building Simulation*. Tsinghua University Press. p. 1-12.

- [111] U.Benitha Sandrine. Élaboration et caractérisation d'un agromatériau chanvre-amidon pour le Bâtiment. 2014. *Thèse de doctorat. Reims.*
- [112] L.Jen Y. et S.Cheng. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, vol. 34, no 7, p. 1747-1754.
- [113] G.Abdellah, A.Sami Ben, et B.Xavier. Transferts par sorption dans les tissus vestimentaires Sorptivetransfersthrough textile fabricsduring wear. *Int. J. Therm. Sci*, 2002, vol. 41, p. 303-313
- [114] M.Slimane. Étude théorique et expérimentale des transferts thermiques dans les milieux poreux granulaires pour l'isolation thermique. 1996. *Thèse de doctorat.*
- [115] D.Jean-François et L.Jean-Paul. Structure poreuse et transport d'humidité dans les roches. *Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement,(INPG, UJF, CNRS URA 1512), Grenoble, France*, 1995.
- [116] A.Kamilia, B. Rafik, T.Abelkrim. Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfer in porous building materials. *Build Environ* 2011;46:1354-1360.
- [117] M.Seddik, D.Frédéric, P. Christophe, *et al.* Couplage hydromécanique dans le processus de transfert de masse sous contrainte dans le bois.
- [118] C.Florence. Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux. *INSA Rennes*, 2004.
- [119] E.Pierre. *Modélisation polycristalline du comportement élastoplastique d'un acier inoxydable austéno-ferritique*. 2008. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille.
- [120] B.Rafik, Q.Menghao, A-M.Abelkarim, *et al.* Experimental and theoretical investigation of non-isothermal transfer in hygroscopic building materials. *Building and Environment*, 2008, vol. 43, no 12, p. 2154-2162.
- [121] L. Qinru, R.Jiwu, et F.Paul. Development of HAM tool for building envelope analysis. *Building and environment*, 2009, vol. 44, no 5, p. 1065-1073.
- [122] Z.Atika. Etude du comportement thermohydrique de matériaux «chanvre-chaux» lors de la phase de séchage–Estimation par technique inverse des propriétés hydriques. 2011. *Thèse de doctorat. Université de Bretagne Sud.*
- [123] P.Floran. Traitement thermique du bois en vue de sa valorisation énergétique: effet de l'intensité de traitement sur la composition chimique, les propriétés énergétiques et la résilience mécanique. 2011. *Thèse de doctorat. AgroParisTech.*

- [124] A. Tadeu, N. Simões, and F. Branco, "Steady-state moisture diffusion in curved walls, in the absence of condensate flow, via the BEM: a practical Civil Engineering approach (Glaser method)," *Building and Environment*, vol. 38, pp. 677-688, 2003.
- [125] M. Steeman, M. De Paepe, and A. Janssens, "Impact of whole-building hygrothermal modelling on the assessment of indoor climate in a library building," *Building and Environment*, vol. 45, pp. 1641-1652, 2010.
- [126] MERAKEB, Seddik, DUBOIS, Frédéric, PETIT, Christophe, *et al.* Couplage hygromécanique dans le processus de diffusion dans le bois. *Revue européenne de génie civil*, 2006, vol. 10, no 2, p. 225-251.
- [127] . A. Kameche, F. Ghomari, M. Choinska, and A. Khelidj, "Assessment of liquid water and gas permeabilities of partially saturated ordinary concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 551-565, 2014.
- [128] F. Sarce Thomann, M. R. Hall, W. Sangchoom, and R. Mokaya, "A hygrothermal modelling approach to water vapour sorption isotherm design for mesoporous humidity buffers," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 211, pp. 113-123, 2015.
- [129] M. Funk, K. Ghazi Wakili, Driving Potentials of Heat and Mass Transport in Porous Building Materials: A Comparison Between General Linear, Thermodynamic and Micromechanical Derivation Schemes, *Transp Porous Med*, pp. 273–294, 2008.
- [130] J. R. Philip et D. A. De vries, Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1957, vol. 38, no 2, p. 222-232.
- [131] R. Farhang et D. Frédéric. Discrete-element modeling of granular materials. *Wiley-Iste*, 2011.
- [132] P. Milly, D. Christopher, Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matric head-based formulation and a numerical model. *Water Resources Research*, 1982, vol. 18, no 3, p. 489-498.
- [133] A. V. Luikov, Application of irreversible thermodynamics methods to investigation of heat and mass transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1966, vol. 9, no 2, p. 139-152.
- [134] L. Aissani, N. Attaf, et E. Mezaache, Etude de l'évolution de l'humidité et de la température lors du séchage d'un milieu poreux: le bois. *Revue des Energies Renouvelables CISM*, vol. 8, p. 1-12.
- [135] B. E . Farkas, R. P. Singh, et T. R. Rumsey, Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I, model development. *Journal of food Engineering*, 1996, vol. 29, no 2, p. 211-226.

- [136] R. Lewis & W.J Ferguson. A partially nonlinear finite element analysis of heat and mass transfer in a capillary-porous body under the influence of a pressure gradient. (1993) *Applied Mathematical Modeling*, rub. Vol. 17
- [137] L. Fengzhi, L.Yi , L. Yingxi & L.Zhongxuan (2004). Numerical simulation of coupled heat and mass transfer in hygroscopic porous materials considering the influence of atmospheric pressure. *Fundamentals: An International Journal of Computation and Methodology*, 45(3), pp.249.
- [138] W .Chang, C. Weng, An analytical solution to coupled heat and moisture diffusion transfer in porous materials. *Int J Heat Mass Tran* 2000;43:3621-3632.
- [139] H. Thomas, R. Lewis & K. Morgan, (1980). An Application of the Finite Element Method to the Drying of Timber. *Wood and Fiber Science*, 11(4), pp.237-243.
- [140]] P. Crausse, J. P. Laurent, and B. Perrin, "Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux: Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrique de parois de bâtiment," *Revue Générale de Thermique*, vol. 35, pp. 95-106, 1996
- [141] N. Mendes and P. C. Philippi, "A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradients," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 37-51, 2005.
- [142] N. Mendes, F. C. Winkelmann, R. Lamberts, and P. C. Philippi, "Moisture effects on conduction loads," *Energy and Buildings*, vol. 35, pp. 631-644, 2003.
- [143] S. A. Al-Sanea, M. F. Zedan, and S. A. Al-Ajlan, "Effect of electricity tariff on the optimum insulation-thickness in building walls as determined by a dynamic heat-transfer model," *Applied Energy*, vol. 82, pp. 313-330, 2005
- [144] P. Talukdar, S. O. Olutmayin, O. F. Osanyintola, and 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*, vol. 50, pp. 4527-4539, 2007
- [145] O. F. Osanyintola and C. J. Simonson, "Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact," *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 1270-1282, 2006.
- [146] A. V. Luikov, "Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review)," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 18, pp. 1-14, 1975.

- [147] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, and A. Seigneurin, "An analytical method to calculate the coupled heat and moisture transfer in building materials," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 33, pp. 39-48, 2006.
- [148] Y. A.Oumeziane, M. Bart, S.Moissette, C.Lanos, C. "Modélisation du transfert d'air, de masse et de chaleur aux travers de parois multicouches". In *Xème Colloque Interuniversitaire Franco-québécois sur la Thermique des Systèmes*.
- [149] H.M .Kunzel « Simultaneous heat and moisture transport in building components », *Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart*, ISBN 3-8167-4103-7, (1995)
- [150] C-E. Hagentoft, « Final report : Methodology of HAM-modeling », Dept. of Building Physics, Chalmers University of Technology, December 2002.
- [151] S.Moissette, M.Bart « Validation d'un modèle numérique 1D de transfert de masse et de chaleur », *LGCGM, INSA Rennes*, AUGC 03/40, 2009.
- [152] A. Holm, & H. M. Künzle, (2003). Two-dimensional transient heat and moisture simulations of rising damp with WUFI 2d. In *Research in Building Physics: Proceedings of the 2nd International Conference on Building Physics*, 14–18 September 2003, Antwerp, Belgium (pp. 363-67).
- [153] A. W. M. Van Schijndel, (2003). Modeling and solving building physics problems with FemLab. *Building and Environment*, 38(2), 319-327.
- [154] R. Younsi, D. Kocaefe & Y. Kocaefe, (2006). Three-dimensional simulation of heat and moisture transfer in wood. *Applied Thermal Engineering*, 26(11-12), pp.1274-1285.
- [155] A. V. Luikov, V. A. Bubnov, et I. A. SOLOVIEV, On wave solutions of the heat-conduction equation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1976, vol. 19, no 3, p. 245-248.
- [156] Q.Menghao, B.Rafik, A. Abdelkarim, *et al.* Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials. *Construction and building materials*, 2009, vol. 23, no 2, p. 967-975.
- [157] A. Trabelsi, (2010). Etude numerique et experimentale des transferts hygrothermiques dans les materiaux poreux de construction. *These de doctorat, Universite de La Rochelle*.
- [158] COMSOL Multiphysics User's Guide © COPYRIGHT 1994-2007 by COMSOL AB.
- [159] Y. Kedowide, A.Piot, M.Woloszyn, N. Le Pierres, T. Bejat "Experimental investigations of highly hygroscopic and vapour permeable walls exposed to real climate". *10th Nordic Symposium on Building Physics*, NSB 2014, 15-19 June 2014, Lund, Sweden.

- [160] C.Pereira, et al. La Grande Région, région transfrontalière européenne. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia*, 2012, no 16.
- [161] L.Yvette, E. Moustier, et al. Le développement durable: du concept à la mesure. 2008.
- [162] A. Marc Olivier et M. Kátia Cordeiro. Moisture performance of building materials: From material characterization to building simulation using the Moisture Buffer Value concept. *Building and Environment*, 2009, vol. 44, no 2, p. 388-401.
- [163] T. Nicolaj. Field investigations of moisture problems: The nordtest procedures. *Building Research and Information*, 1987, vol. 15, no 1-6, p. 88-92.
- [164] Rode C., Moisture Buffering of Building Materials. Nordisk Innovations center, BYG R-126, ISSN 1601-2917, ISBN 87-7877-195-1.2005.
- [165] C. Rode, R. Peuhkuri, B. Time, K. Svennberg & T. Ojanen (2007). Moisture buffer value of building materials. *Journal of ASTM International*, Vol. 4, No 5.
- [166] B. Wunsch and N. Chawla, Serial Sectioning for 3D Visualization and Modeling of SiC Particle Reinforced Aluminum Composites, *Paper Contest Winner 2003 Undergraduate Division, Arizona State University*.
- [167] G. François. Application des liens multi-modèles à la conception mécanique. *Université de Sherbrooke*, 2002.
- [168] A. Mohamed-Raed. Reconstruction stochastique 3D d'un matériau céramique poreux à partir d'images expérimentales et évaluation de sa conductivité thermique et de sa perméabilité. 2010. *Thèse de doctorat. Université de Limoges*.
- [169] G.Jean Louis et T.Christian. Tomographie à rayons X. Ed. *Techniques Ingénieur*, 2002.
- [170] H. Adnan. Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires: caractérisation et modélisation chimio-hydro-mécanique du retrait. 2007. *Thèse de doctorat. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan*.
- [171] N. Burlion, T. Rougelot, D. Bernrad, et al. Apport de la microtomographie pour l'étude de la fissuration des matériaux cimentaires sous lixiviation. *25e rencontre de l'AUGC Bordeaux*, 23-25 mai, 2007.
- [172] D-R. Sabine Rolland. Contribution à la quantification 3D de réseaux fibreux par microtomographie au rayonnement synchrotron: applications aux papiers. 2007. *Thèse de doctorat*.
- [173] M. Pierre. Développement d'une technique de tomographie par découpage optique rotatif pour la mesure résolue en temps de champs cinématiques 3D par corrélation d'images volumiques. 2014. *Thèse de doctorat Poitiers*.
- [174] C.Jacques et D.Jacques. Tomographie à rayons X.Techniques de l'ingénieur. *Analyse et caractérisation*, 1992, vol. 7, no P950, p. P950. 1-P950. 14.

- [175] H. Hélène, H. François, R. Stéphane, La tomographie en sciences et mécanique des matériaux : voyage aux centres des matériaux, 2014, *Document technique*, ENS Cachan.
- [176] B. Alban. Numérisation 3D de surfaces métalliques spéculaires par imagerie infrarouge. 2012. *Thèse de doctorat*. Université de Bourgogne.
- [177] N. Limodin, J. Réthoré, J.-Y. Buffière, A. Gravouil, F. Hild, S. Roux. Crack closure and stress intensity factor measurements in nodular graphite cast iron using 3D correlation of laboratory X ray microtomography images. *Acta Materialia* (2009), volume 57, pp. 4090-4101
- [178] C. Bruno. Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire: essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse. 2001. *Thèse de doctorat*. ENGREF (AgroParisTech).
- [179] S. Dalpont, F. Meftah, et B. Schrefler, Modeling concrete under severe conditions as a multiphase material. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, vol. 241, no 3, p. 562-572.
- [180] B. Maurice. General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of applied physics*, 1941, vol. 12, no 2, p. 155-164.
- [181] T. Clifford et T. Richard. The classical field theories. In : Principles of Classical Mechanics and Field Theory/Prinzipien der Klassischen Mechanik und Feldtheorie. Springer Berlin Heidelberg, 1960. p. 226-858.
- [182] W. Robert, W. Jeffrey, P. Margaret, et al. Predicting obesity in young adulthood from childhood and parental obesity. *New England Journal of Medicine*, 1997, vol. 337, no 13, p. 869-873.
- [183] P. Suhas. Numerical heat transfer and fluid flow. CRC press, 1980.
- [184] R. Omar, Contribution à l'étude de la convection thermosolutale dans des enceintes contenant des couches poreuses. 2013.
- [185] L. Brian P. A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 1979, vol. 19, no 1, p. 59-98.
- [186] T. Mori, & K. Tanaka, Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta metallurgica*, 21(5), 571-574. 1973.
- [187] E. Walther, R. Bennacer, & C. Desa, Lattice Boltzmann method applied to diffusion in restructured heterogeneous media. In *Defect and Diffusion Forum* (Vol. 354, pp. 237-242). 2014.
- [188] L. Yohann. Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques. 2009. Université de Toulouse

- [189] H. Schoeller, Hydrogéologie. *École Nationale Supérieure du Pétrole, Technip, Paris*, 2 vol, 443 p, 1955
- [190] A. Bouguerra, Temperature and moisture dependence on the thermal conductivity of wood-cement-based composite: experimental and theoretical analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32(21), 2797. 1999.
- [191] N. Epstein, On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media, *Chem. Eng. Sci.*,44(3), 777–779. 1989
- [192] M. Bornert, T. Bretheau, P. Gilormini, Homogénéisation en mécanique des matériaux, *Tome 1 : Matériaux aléatoires élastiques et milieux périodiques*, Hermès Science, 2001
- [193] A. Abdessamad . B'etons de granulats de bois : 'etude exp'erimentale et th'eorique des propri'et'es thermo-hydro-m'ecaniques par des approches multi-'echelles. *Mat'eriaux. Universit'e Paris-Est*, 2014.
- [194] R. Singh, The saturated permeability of composite pulp fiber and filler mats. *Faculty of Paper and Bioprocess Engeneering*. 2007

Annexes

Annexe II.1: Sélection des éco-matériaux susceptibles d'être analysés dans un contexte transfrontalier

Choix des éco-matériaux

Le choix d'un matériau de construction doit se faire en fonction de plusieurs critères d'impact environnemental, et sur la santé, s'il veut être assimilé à la catégorie des « éco-matériaux » :

- origine : matières premières naturelles (végétales, animales ou minérales), issus de l'agriculture biologique ;
- disponibilité des ressources: renouvelables et locales de préférence ;
- consommation d'eau : à minimiser ;
- énergie grise (renouvelable ou non): à minimiser sur l'ensemble du cycle de vie du matériau, traitement en fin de vie inclus ;
- impact sur la santé de l'homme : matériau sain, éviter l'émission de vapeurs nocives (COV, solvants toxiques) et les pollutions électromagnétiques lors de la fabrication et pendant la mise en œuvre ;
- potentiel de recyclage élevé lors de la phase de déconstruction ;
- non toxique pour l'environnement : éviter l'émission de polluants (gaz à effet de serre, gaz acidifiant, etc.) sur l'ensemble de son cycle de vie.

Labels écologiques génériques :

o *l'Ecolabel Européen* ou *EU Ecolabel* : certification écologique officielle européenne, ce label concerne des produits qui ont un moindre impact sur l'environnement durant tout leur cycle de vie, sur base de critères environnementaux et de critères de performance (produit au moins aussi performant qu'un produit classique équivalent) ;

o *NF environnement* : écolabel français et marque volontaire de certification basée sur des critères environnementaux et d'aptitude à l'usage (équivalente à celle d'un produit similaire) préétablis ;

o *Le Cygne Blanc (Nordic Swan)* : écolabel officiel scandinave, similaire à l'Ecolabel Européen.

- labels écologiques pour les produits en bois :

o *Ange Bleu (Der Blaue Engel)* : écolabel allemand qui indique que le produit certifié est moins nocif pour l'environnement que ses concurrents. Il certifie entre autres que les émissions de polluants sont basses et que les forêts dont le bois est tiré sont durables ;

o *NaturePlus* : son apposition implique des matériaux constitués d'un minimum de 85 % d'éléments minéraux et/ou renouvelables. Il interdit, entre autres, d'ajouter aux panneaux de bois des produits de préservation du bois, des COV et des retardateurs de flamme de synthèse ou organiques.

Labels écologiques concernant les déchets :

o *Cradle to Cradle (C2C)* : le label Cradle to Cradle (« du berceau au berceau ») certifie qu'un produit fabriqué doit pouvoir, en fin de vie, produire à nouveau le même produit, sans ajout autre qu'énergétique

Annexe II.2: Fiche technique d'un matériau

Nom du matériau (Catégorie du matériau)

1. Synthèse

Domaines d'emploi, qualités remarquables et défauts des matériaux (environnementaux et techniques), possibilités de valorisation, etc.

2. Introduction

Description générale (citer marque de référence sur laquelle on s'est basée si c'est le cas, procédés de fabrication, constitution, labels des produits utilisés, etc.).

3. Check-list

Conseils de production, de pose, de stockage, etc. (environnementaux, protection de la santé, pose sèche ou humide, etc.).

4. Fiche de données

Production	Constituants (avec teneur en % si possible)	
	Epaisseur, en mm	
	Energie primaire, I_{Prim} en MJ/m ³	(source : Public Research Centre Henri Tudor, Base de données de matériaux de construction pour le Luxembourg, v2013-04-1.)
	Impact environnementaux, I_{Env} /m ³	(source : Public Research Centre Henri Tudor, Base de données de matériaux de construction pour le Luxembourg, v2013-04-1.)
	Lieu de production (les plus proches de/dans la Grande Région pour les 3 pays concernés, le transport ayant un impact important sur l'environnement)	
	Constituant(s) présent(s) dans la Grande Région (oui/non : si oui, où? ; si non, origine importation? + quantité présente)	
	Remarques particulières	+ (positif) - (négatif)
Mise en œuvre	Masse volumique en kg/m ³	
	Conductivité thermique, en W/m.K	

	Réaction au feu (selon norme DIN) ⁵⁴	
	Facilité de mise en œuvre (faisable par entreprises d'insertion? + formation nécessaire? + temps requis à la mise en œuvre)	
	Remarques particulières / Substances toxiques	p.ex. mesures de protection nécessaires pour la pose
Utilisation	Domaine d'emploi (+ applicable en rénovation? si oui, mise en œuvre différente?)	
	Durée de vie typique, en années	
	Entretien (main-d'œuvre, fréquence, facilité, produits, degré de dégradation si pas entretenu, etc.)	
	Prix (achat + pose, HTVA) ⁵⁵	Be. : (Bordereau de prix unitaires 2014, de l'Union Professionnelle des Architectes) Fr. : Lux. :
	Remarques particulières / Substances toxiques	
	Climat intérieur (isolation acoustique/thermique, inertie thermique, confort d'été, ondes électromagnétiques, humidité, matériau respirant, antistatique, etc.)	+ (positif) - (négatif)
Fin de vie	Valorisation	<u>réutilisation</u> ou <u>réemploi</u> , <u>recyclage</u> , <u>valorisation énergétique</u> ?