

Présentée à l'Université Paris-Est Créteil  
en vue de l'obtention du titre de

**Docteur de l'Université Paris-Est**  
Spécialité : Science, Ingénierie et Environnement

En cotutelle avec l'Université de Batna 1 en Algérie

---

## **ETUDE, A L'ECHELLE DU MUR, DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES DANS LES COMPOSITES BIOSOURCES**

---

par :

**Tarek ALIOUA**

Soutenue le 03/12/2020, devant la commission d'examen :

### **Rapporteurs**

M. BELARBI Rafik

Professeur, Université de la Rochelle

M. LACHI Mohammed

Professeur, Université de Reims

### **Examineurs**

M<sup>me</sup>. CHAKER Abla

Professeur, Université Constantine 1, Algérie

M. KHALDI Fouad

Professeur, Université Batna 1, Algérie

M. MAALOUF Chadi

Maitre de Conférences HDR, Université de Reims

### **Directeurs de thèse**

M. BOUDENNE Abderrahim

Professeur, Université Paris-Est Créteil

M. AGOUDJIL Boudjema

Professeur, Université Batna 1, Algérie



## **Remerciements**

*Je tiens à présenter mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué, de manière directe ou indirecte, à la réussite de ce travail.*

*Je tiens à remercier Madame Abla CHAKER, Professeur à l'Université Constantine 1, présidente du jury, pour toute l'attention qu'elle a porté à mon travail. Je souhaite également présenter mes remerciements à l'ensemble des membres du jury, pour leurs propositions et remarques constructives. J'adresse un remerciement particulier à Monsieur Rafik BELARBI, Professeur à l'Université de La Rochelle, et Monsieur Mohamed LACHI, Professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardenne, pour avoir accepté le rôle de rapporteurs de ces travaux de thèse.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux messieurs Boudjemaa AGOUDJIL et Abderrahim BOUDENNE, mes directeurs de thèse pour avoir encadré ce travail. Leurs conseils, aides, et remarques pertinentes ont été d'un apport considérable.*

*Je souhaite remercier également Madame Evelyne GEHIN, directrice du Laboratoire CERTES à l'Université Paris-Est Créteil, pour son assistance et aide durant toute la durée de la thèse. Mes remerciements vont aussi à tous les membres du Laboratoire CERTES.*

*Un très grand merci à Monsieur Karim BENZARTI, chercheur à l'Université Gustave Eiffel, pour toute sa contribution à mon travail ; ce fut un grand plaisir de travailler ensemble.*

*Ces travaux de thèse ne pouvaient être possibles sans le soutien financier du projet PHC TASSILI 16MDU976 et du Programme National Exceptionnel (PNE) du ministère algérien de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Pour cela, je remercie tous les responsables de ces projets.*

*Je voudrais aussi remercier Nawal et Bourhaneddine, mes collègues du Laboratoire LPEA de l'Université Batna 1 pour les échanges et la convivialité de l'ambiance de travail.*

*Enfin, mes dernières reconnaissances vont à mon père et tous mes proches, famille et amis, pour leur soutien et leur complicité. A tous, Merci infiniment.*



## Table des matières

Nomenclature .....	vi
Introduction générale.....	9
Références .....	12
Chapitre I : Contexte environnemental et scientifique.....	13
I. Introduction.....	14
II. Problématique énergétique .....	14
II.1. Consommation énergétique dans le bâtiment.....	14
II.2. Enjeux environnementaux .....	15
III. Matériaux biosourcés .....	15
III.1. Définition des matériaux biosourcés .....	15
III.2. Propriétés et grandeurs caractéristiques des matériaux biosourcés.....	16
III.2.1. Hygroscopicité .....	16
III.2.2. Porosité.....	16
III.2.3. Teneur en eau .....	16
III.2.4. Perméabilité.....	17
III.2.5. Courbe de sorption .....	17
III.2.6. Conductivité thermique .....	18
III.2.7. Capacité thermique massique.....	18
III.2.8. Succion capillaire .....	18
III.2.9. Saturation libre .....	19
III.2.10. Capacité tampon hydrique MBV.....	19
IV. Phénomène d’hystérésis.....	20
V. Les matériaux biosourcés les plus utilisés.....	21
V.1. Béton de chanvre .....	21
V.2. Construction en paille.....	23
VI. Bois de palmier dattier .....	24
VII. Composites à base de fibres de bois de palmier dattier .....	27
VII.1. Composite à base de gypse .....	29
VII.2. Composite à base de polymère .....	30
VII.3. Béton de bois de palmier dattier (Date Palm Concrete, DPC) .....	31

VII.3.1. Propriétés du DPC à 15% de fibres de bois de palmier dattier.....	31
VIII. Etat de l’art des travaux sur les matériaux hygroscopiques de construction.....	34
VIII.1. Echelle matériau .....	35
VIII.2. Echelle paroi (ou composant ou système) .....	38
VIII.3. Echelle bâtiment .....	42
IX. Conclusion .....	45
Références .....	47
Chapitre II : Modélisation des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction .....	50
I. Introduction.....	51
II. Etat de l’art sur les modèles hygrothermiques.....	51
II.1.1. Modèle de Phillip et De Vries .....	51
II.1.2. Modèle de Luikov .....	52
II.1.3. Modèle de Kunzel .....	53
II.1.4. Modèle de Mendes .....	54
III. Hypothèses .....	54
IV. Transfert de masse .....	55
IV.1. Transfer d’eau (liquide et vapeur).....	56
IV.1.1. Approche de Kunzel .....	56
IV.1.2. Approche de Mendes .....	59
IV.1.3. Sous gradient de pression de succion.....	60
IV.2. Transfert d’air .....	61
IV.3. Advection de vapeur .....	62
V. Transfert de chaleur.....	63
V.1. Conduction .....	63
V.2. Enthalpie de la masse migrante .....	63
V.2.1. Chaleur transportée par diffusion .....	63
V.2.2. Chaleur transportée par advection .....	64
V.3. Chaleur latente.....	64
VI. Equations de conservation .....	65
VI.1. Equation de conservation de masse de l’eau (vapeur et liquide) .....	65
VI.1.1. Approche de Kunzel.....	65

VI.1.2. Approche de Mendes .....	67
VI.2. Equation de conservation pour l'air .....	67
VI.2.1. Terme instationnaire .....	67
VI.2.2. Terme transport .....	67
VI.2.3. Terme source .....	68
VI.2.4. Bilan global de la masse d'air .....	68
VI.3. Equation de conservation pour la chaleur .....	68
VI.3.1. Terme instationnaire .....	68
VI.3.2. Bilan selon l'approche de Kunzel .....	70
VI.3.3. Bilan selon l'approche de Mendes .....	71
VI.4. Modèles simplifiés .....	72
VII. Méthodes de résolution numérique .....	73
VII.1.1. Wufi® .....	73
VII.1.2. COMSOL Multiphysics® .....	73
VII.1.3. Matlab® .....	74
VII.1.4. SPARK® .....	74
VII.1.5. TRNSYS® .....	75
VIII. Implémentation et validation .....	75
VIII.1. Implémentation sous COMSOL .....	75
VIII.2. Validation .....	79
VIII.2.1. Principe de l'étude .....	79
VIII.2.2. Conditions aux limites .....	79
VIII.2.3. Matériau de l'étude .....	80
VIII.2.4. Simulation et résultats .....	81
IX. Conclusion .....	84
Références .....	86
Chapitre III : Application à un mur en béton de bois de palmier dattier .....	88
I. Introduction .....	89
II. Partie expérimentale .....	89
II.1. Dispositif expérimental .....	89
II.2. Caractéristiques de la paroi en DPC .....	90

II.3. Mesures et acquisition des données .....	91
II.4. Principe et description du dispositif expérimental .....	92
II.5. Scénarios de sollicitations hygrothermique appliqués.....	93
III. Partie numérique .....	96
III.1. Modèles étudiés.....	96
III.1.1. Conditions aux limites.....	97
IV. Validation.....	97
IV.1. Travaux antérieurs.....	97
IV.2. Conditions de simulation .....	99
IV.3. Impact du maillage sur les résultats numériques .....	100
IV.4. Scénario 1 : créneau de température à 50% HR.....	103
IV.5. Scénario 2 : état d'équilibre thermique à 50% RH (régime permanent).....	105
IV.6. Scénario 3 : Créneau d'humidité relative à 23 °C .....	107
IV.7. L'influence de l'effet d'hystérésis .....	109
IV.7.1. Modélisation du phénomène d'hystérésis .....	109
IV.7.2. Différences entre les modèles d'hystérésis .....	115
IV.7.3. Choix du modèle et implémentation .....	117
IV.7.4. Résultats .....	118
V. Comparaison de la performance du DPC avec un matériau classique .....	119
V.1. Choix et propriétés du béton classique.....	119
V.2. Scénarios étudiés .....	120
V.3. Comportement thermique.....	121
V.4. Comportement hydrique.....	123
VI. Conclusion .....	125
Références .....	126
Chapitre IV : Etude de sensibilité des modèles hygrothermiques.....	129
I. Introduction.....	130
II. Conditions expérimentales .....	130
1 Modèle mathématique .....	131
III. Etat de l'art sur la sensibilité des modèles hygrothermiques .....	132
IV. Etude de sensibilité paramétrique .....	134



IV.1. Solution de référence .....	137
IV.2. Sensibilité en fonction du temps .....	138
IV.3. Comparaison des sensibilités aux différents paramètres.....	144
V. Effet des conditions initiales .....	148
VI. Effet de la position des capteurs .....	151
VII. Modèles simplifiés.....	153
VII.1.1. Modèle de conduction pure .....	153
VII.1.2. Transfert de liquide négligé .....	154
VIII. Conclusion.....	156
References .....	157
Conclusion générale et perspectives .....	158
Annexes.....	162

## Nomenclature

### Caractères latins

$A_c$	Coefficient d'absorption d'eau ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ )
$b$	Supplément d'humidité de la conductivité thermique (-)
$B$	Largeur du mur (m)
$C$	Concentration molaire ( $\text{mol.m}^{-3}$ )
$C_G$	Paramètre d'ajustement du modèle GAB
$C_{p_0}$	Chaleur spécifique du matériau à l'état sec ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$C_{p_a}$	Chaleur spécifique de l'air ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$C_{p_l}$	Chaleur spécifique de l'eau ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$D_l$	Coefficient de conduction liquide sous gradient d'humidité relative ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ )
$D_{l,ws}$	Coefficient de transfert par succion capillaire ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ )
$D_{l,\varphi}$	Coefficient de conduction liquide dans la région hygroscopique ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ )
$D_T$	Coefficient de transfert de masse sous gradient de température ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$D_{T,v}$	Coefficient de transfert de vapeur sous gradient de température ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$D_{T,l}$	Coefficient de transfert de liquide sous gradient de température ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$D_\theta$	Coefficient de transfert de masse sous gradient de teneur en eau ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$D_{\theta,v}$	Coefficient de transfert de vapeur sous gradient de teneur en eau ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$D_{\theta,l}$	Coefficient de transfert de liquide sous gradient de teneur en eau ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$g$	Densité de flux massique ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )
$G_\Omega$	Flux de vapeur aux limites ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )
$E$	Épaisseur du mur (m)
$h$	Coefficient d'échange thermique aux limites
$H$	Enthalpie ( $\text{J.m}^{-3}$ )
$h_c$	Coefficient d'échange convectif ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
$i$	Position du point d'inversion
$I$	Hauteur du mur (m)
$k$	Paramètre d'ajustement du modèle GAB
$K$	Perméabilité du matériau à l'eau liquide ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ )

$k_a$	Perméabilité effective de l'air ( $m^2$ )
$l_v$	Chaleur latente de vaporisation ( $J.kg^{-1}$ )
$m$	Masse (kg)
$M$	Masse molaire ( $kg.mol^{-1}$ )
$n$	Nombre de moles (mol)
$p_{sat}$	Pression de vapeur saturante (Pa)
$p_v$	Pression de vapeur (Pa)
$q$	Densité de flux de chaleur ( $W.m^{-2}$ )
$Q_\Omega$	Flux de chaleur aux limites ( $W.m^{-2}$ )
$R$	Constante des gaz parfaits ( $8.314 J.mol^{-1}.K^{-1}$ )
$s$	Sensibilité relative (%)
$S$	Terme source (-)
$t$	Temps (s)
$T$	Température (K)
$u$	Teneur en eau massique ( $kg.kg^{-1}$ )
$u_m$	Teneur en eau monomoléculaire ( $kg.kg^{-1}$ )
$v$	Vitesse ( $m.s^{-1}$ )
$V$	Volume du mur ( $m^3$ )
$w$	Teneur massique en eau par unité de volume ( $kg.m^{-3}$ )
$X$	Fraction molaire (-)

*Caractères grecs*

$\beta$	Coefficient de transfert de vapeur d'eau aux limites ( $kg.m^{-2}.s^{-1}.Pa^{-1}$ )
$\delta$	Perméabilité du matériau à la diffusion de vapeur ( $kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$ )
$\delta_{v,a}$	Perméabilité de l'air à la diffusion de vapeur ( $kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$ )
$\delta_a$	Perméabilité du matériau à la diffusion d'air ( $kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$ )
$\xi_\varphi$	Capacité de sorption ( $kg.m^{-3}$ )
$\theta$	Teneur en eau volumique ( $m^3.m^{-3}$ )
$\lambda$	Conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$\mu$	Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur dans des conditions sèches (- )

$\mu^*$	Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur dans des conditions humides (-)
$\mu_a$	Viscosité dynamique de l'air (Pa.s)
$\rho_0$	Masse volumique à l'état sec ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$\rho_l$	Masse volumique de l'eau ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$\varphi$	Humidité relative (-)
$\psi$	Quantité physique par unité de volume (-)

*Indices*

0	À l'état sec
<i>ads</i>	En phase d'adsorption
<i>adv</i>	Relatif à l'advection
<i>amb</i>	Ambiant
<i>cond</i>	Relatif à la conduction
<i>des</i>	En phase de désorption
<i>diff</i>	Relatif à la diffusion
<i>hys</i>	Relatif au phénomène d'hystérésis
<i>l</i>	Liquide
<i>mass</i>	Massique
<i>mol</i>	Molaire
<i>sat</i>	Relatif à la saturation
<i>tot</i>	Total
<i>v</i>	Vapeur
$\Omega$	Aux limites

# **Introduction générale**

L'énorme consommation de l'énergie dans le secteur de l'habitat est devenue l'une des préoccupations majeures pour les pouvoirs publics ainsi que pour les chercheurs en la matière, cette consommation de l'énergie est proportionnellement liée à la croissance de la population. La non adéquation de l'isolation thermique dans les enveloppes des bâtiments est classée parmi les causes principales de cette consommation excessive qui entraîne l'augmentation de la production de l'énergie, ce qui signifie automatiquement l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> [1].

D'autre part, le confort hygrothermique a gagné une importance significative dans la conception des bâtiments, car l'humidité et la température influencent le bien-être et la santé des occupants dans l'environnement intérieur [2]. Une humidité relative inférieure à 40% augmente la concentration des produits chimiques nocifs dans l'air, ce qui expose les gens aux infections respiratoires et aux maladies de peau. En revanche, une humidité relative supérieure à 60% modifie la perception de la température dans la pièce et fournit des conditions pour la prolifération des virus et des spores de moisissure [3]. De plus, Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC) et les dispositifs de contrôle d'humidité ont été développés pour offrir un confort thermique optimal et maintenir l'humidité relative à des niveaux idéaux, par contre ils nécessitent une énergie supplémentaire [4].

Certains matériaux, décrits comme hygroscopiques, ont la capacité de réguler passivement le climat intérieur, en réduisant ainsi l'énergie opérationnelle. Ces matériaux ont la capacité d'adsorber et de désorber l'humidité, dans un processus appelé tampon d'humidité (moisture buffering) [5]. La qualité de l'air intérieur et le confort hygrothermique s'améliorent considérablement lorsque des matériaux perméables et hygroscopiques sont appliqués sur la surface intérieure [6]. De même, ce type de matériaux possède une inertie thermique et des propriétés d'isolation très importantes permettant de réduire les pertes d'énergie à travers les enveloppes tout en gardant une faible empreinte en carbone.

L'Algérie est l'un des pays qui se distingue, notamment ces deux dernières décennies, par l'émergence d'un nouveau type de matériaux biosourcés à base de fibres de bois de palmier dattier, qui sont extraites des déchets des palmiers, dont la production annuelle est estimée à 210 000 tonnes de pétioles, 73 000 tonnes de folioles et 52 000 tonnes de grappes [7]. L'utilisation de ces déchets, qui est très minime et souvent sont brûlés, commencent à être valorisés par les chercheurs et les investisseurs en procédant à les utiliser progressivement dans

la production de plusieurs composites pour l'isolation thermique et la régulation d'humidité dans les constructions. Ce nouveau matériau fait l'objet de plusieurs thématiques et projets de recherche tels que la thématique MTH (Matériaux et thermique de l'Habitât) qui a pour objectif de développer de nouveaux matériaux composites à base de fibres naturelles pour des applications d'isolation thermique notamment dans le secteur de l'habitat. Le présent travail rentre dans le cadre d'un nouveau projet intitulé : Développement de nouveaux matériaux biosourcés à base de bois de palmier dattier pour l'Isolation thermique dans l'Habitât (IsolHab), qui est financé par le Projet bilatéral Hubert Curien (PHC) Tassili (16MDU976). Ce projet est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire LPEA (Laboratoire de Physique Energétique Appliqué) de l'université Batna-1 et le laboratoire CERTES (Centre d'Etudes et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes) de l'université Paris-Est Créteil et également avec l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) de l'université Gustave Eiffel (ex-institut de l'université de Paris-Est).

L'objectif principal de cette thèse est de modéliser les phénomènes de transfert de chaleur et d'humidité dans le béton de bois de palmier dattier pour des études numériques à grandes échelles.

Le premier chapitre porte sur le contexte énergétique, environnemental et scientifique du développement des matériaux biosourcés. Dans un premier temps, nous allons définir les matériaux biosourcés ainsi que leurs propriétés et leurs avantages. Par la suite, nous exposons l'état de l'art sur les composites à base de fibres de bois de palmier dattier. Dans la dernière partie, nous présentons une recherche bibliographique sur les modèles mathématiques hygrothermiques et les outils numériques de résolution qui servent à la modélisation des phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans ce type de matériaux.

Dans le second chapitre, la modélisation des phénomènes de transfert sera effectuée. Les modèles seront établis en partant des équations de conservation d'énergie et de masse selon l'approche de Kunzel et de Mendes. Les différents modes de transport sont évoqués en mettant en évidence toute simplification possible. En outre, le phénomène d'hystérésis sera également modélisé avec différents modèles de la littérature.

Le troisième chapitre se focalise sur la validation des modèles développés dans le deuxième chapitre. L'étude commence par l'optimisation du maillage afin de réduire le temps de calcul tout en ayant une meilleure précision des résultats. Dans un deuxième temps, des simulations

seront effectuées et les résultats sont comparés avec des données expérimentales. Dans cette partie, le phénomène d'hystérésis est pris en compte et son effet sur les résultats est mis en évidence. Finalement, une étude numérique comparative est réalisée pour évaluer la performance d'un mur en béton de bois de palmier dattier par rapport un mur construit avec un isolant classique.

Le dernier chapitre de cette thèse met l'accent sur les paramètres supposés connus dans les modèles hygrothermiques et leur impact sur les résultats numériques. Dans cette partie, nous étudions la sensibilité des modèles à différentes sources d'erreurs (*e.g.* conditions aux limites et initiales, propriétés des matériaux, coefficients de transfert... etc.). Les résultats sont discutés par rapport au temps, la profondeur dans le mur et le pourcentage de variation des paramètres où les principaux paramètres qui influent les résultats sont mis en exergue.

## Références

- [1] T. Alioua, B. Agoudjil, N. Chennouf, A. Boudenne et K. Benzarti, «Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect,» *Building and Environment*, vol. 163, 2019.
- [2] J. Xiong, Z. Lian, X. Zhou, J. You et Y. Lin, «Effects of temperature steps on human health and thermal comfort,» *Building and Environment*, vol. 94, pp. 144-154, 2015.
- [3] A. V. Arundel, E. M. Sterling, J. H. Biggin et T. D. Sterling, «Indirect health effects of relative humidity in indoor environments,» *Environmental health perspectives*, vol. 65, pp. 351-361, 1986.
- [4] M. Y. Ferroukhi, Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments: Evaluation des désordres causés par l'humidité, La Rochelle: Thèse de doctorat, 2015.
- [5] V. Cascione, D. Maskell, A. Shea et P. Walker, «A review of moisture buffering capacity: From laboratory testing to full-scale measurement,» *Construction and Building Materials*, vol. 200, pp. 333-343, 2019.
- [6] C. J. Simonson, M. Salonvaara et T. Ojanen, «Heat and mass transfer between indoor air and a permeable and hygroscopic building envelope: Part I—field measurements,» *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 28, n° %11, pp. 63-101, 2004.
- [7] N. Benmansour, Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat, Batna: thèse de doctorat, 2015.



# **Chapitre I : Contexte environnemental et scientifique**

## **I. Introduction**

Dans ce premier chapitre de thèse, nous présentons l'état de l'art sur les matériaux biosourcés de construction et les défis rencontrés. Dans un premier temps, le contexte énergétique et environnemental sur le plan mondial est présenté où les matériaux biosourcés sont proposés comme une solution respectueuse de l'environnement assurant plus d'efficacité énergétique dans les bâtiments. Ensuite, les matériaux biosourcés seront définis en parlant de leurs avantages et leurs propriétés physiques. Dans la partie qui suit, nous présentons une étude bibliographique sur les composites à base de bois de palmier dattier étudiés par notre groupe de recherche. Dans la dernière partie, les différentes échelles d'étude sur le comportement hygrothermique des matériaux sont définies en faisant un état de l'art sur les principaux travaux réalisés sur les matériaux hygroscopiques à chaque échelle.

## **II. Problématique énergétique**

### **II.1. Consommation énergétique dans le bâtiment**

Depuis le milieu vingtième siècle, la terre peut être considérée comme un organisme dont la santé dépend de la santé de toutes ses parties. Les activités humaines ont un impact sur l'environnement avec des conséquences potentiellement graves sur les écosystèmes terrestres, tant au niveau local qu'au niveau mondial : qualité de l'air et de l'eau, biodiversité naturelle, égalité sociale... Nous sommes entrés dans une nouvelle ère de développement, mais un effort énorme pour un développement durable est encore nécessaire.

De nos jours, l'industrie, les transports et les bâtiments sont les trois principaux consommateurs d'énergie. Les bâtiments et le secteur de la construction sont très énergivores, représentant près de 40% de la consommation totale d'énergie et 36% des émissions totales de dioxyde de carbone [1]. Les exigences du confort thermique intérieur, nécessitent de plus en plus la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment par les systèmes énergétiques assurant les services de chauffage, de ventilation et de climatisation. L'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments est l'un des moyens les plus efficaces pour réaliser des économies d'énergie, grâce à la réduction des pertes de chaleur ou de froid à travers les enveloppes des bâtiments. Cependant, de nombreux matériaux de construction traditionnels n'ont pas de bonnes propriétés d'isolation thermique. Ainsi, de nombreux types de matériaux d'isolation thermique supplémentaire, tels

que les panneaux solides, les particules, les sandwiches, etc. sont utilisés dans de nombreuses parties des bâtiments, tels que les murs extérieurs, les toits, les planchers et les portes extérieures, afin d'améliorer la performance énergétique de ces bâtiments.

## **II.2. Enjeux environnementaux**

Avec le développement de la société et la conscience écologique de l'humanité, un environnement intérieur sain et durable attire de plus en plus l'attention du public. Les isolants thermiques dans les bâtiments confrontent directement les humains, étant toujours appliqués comme revêtements intérieurs ou extérieurs. Ainsi, leurs performances environnementales attirent beaucoup d'attention non seulement dans le processus de production mais également au cours de leur durée de vie. Quant aux isolants thermiques constitués de roches (*e.g.* laine de roche, perlite, vermiculite, etc.), ils n'ont généralement pas de performances environnementales satisfaisantes car divers polluants ( $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , les composés organiques volatils et les matières particulaires) sont émis pendant leur processus de production énergivore [2]. De plus, la plupart des matériaux isolants existants ne sont pas renouvelables (*e.g.* ceux dérivés de produits pétrochimiques). Ainsi, des matériaux d'isolation renouvelables, respectueux de l'environnement, à faible coût et à haute résistance thermique sont très demandés.

## **III. Matériaux biosourcés**

Récemment, il y a un intérêt croissant pour les isolants thermiques à base de biomasses, souvent appelées "isolants biosourcés" ou "bio-isolants". Les pailles agricoles, telles que les pailles de blé, de maïs ou de riz, sous forme brute (*e.g.* les ballots de paille) sont utilisées depuis longtemps comme matériaux d'isolation dans les constructions en raison de leur structure creuse, de leur faible coût, de leur faible masse volumique et de leur faible conductivité thermique. Jusqu'à présent, les isolants biosourcés ont une définition beaucoup plus large, qui incluent les matériaux biologiques, tels que le chanvre [3], le lin [4], le palmier dattier [5], les tiges de coton [6]...etc.

### **III.1. Définition des matériaux biosourcés**

Les matériaux de construction biosourcés sont des matériaux qui intègrent une partie de la biomasse, d'origine végétale ou animale, dans leur composition. Ces matériaux ont pour but principal d'améliorer l'isolation thermique dans le secteur de l'habitat afin de réduire la consommation énergétique des constructions. Les matériaux biosourcés ont une variété

d'applications dans la construction, ils peuvent servir en tant que bétons, composites, mortiers, isolants ...etc. On s'intéresse essentiellement dans cette thèse aux matériaux d'origine végétale tels que le béton de bois de palmier dattier, le béton de chanvre, la construction en paille ... etc.

## III.2. Propriétés et grandeurs caractéristiques des matériaux biosourcés

### III.2.1. Hygroscopicité

Un matériau hygroscopique est un matériau qui a tendance à fixer et stocker de l'humidité présente dans l'air environnant par absorption ou adsorption. Cela peut être évalué expérimentalement en suivant l'évolution de la masse du matériau soumis à des variations d'humidité relative. C'est une propriété qui caractérise souvent les matériaux poreux où les pores sont très fins (inférieurs à 100 nm).

### III.2.2. Porosité

La porosité  $\varepsilon$  (%) est le paramètre le plus connu quand il s'agit de l'étude d'un milieu poreux. C'est une grandeur physique qui mesure le volume du vide dans un matériau, ce qui signifie qu'elle a une influence directe sur le transfert de chaleur et de masse dans ce matériau. On distingue deux types de porosité en prenant en compte ou pas les pores fermés (non accessibles) :

Porosité totale : elle mesure le pourcentage du volume de tous les pores (ouverts et fermés) par rapport au volume total apparent du matériau selon la relation suivante [7] :

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume total} - \text{Volume solide}}{\text{Volume total}}$$

Porosité ouverte : elle mesure le pourcentage du volume des pores ouverts seulement, par rapport au volume apparent du matériau comme suit [7] :

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume des pores ouverts}}{\text{Volume total}}$$

### III.2.3. Teneur en eau

La teneur en eau mesure la quantité d'eau présente dans un matériau sous forme liquide, vapeur ou solide. C'est un paramètre indispensable pour la caractérisation des matériaux biosourcés, où elle est utilisée pour décrire la courbe de sorption, l'évolution des coefficients de transfert,

l'évolution de la conductivité thermique ...etc. On trouve souvent trois types de teneur en eau selon l'unité de mesure utilisée :

Teneur massique (kg.kg<sup>-1</sup>) :

Elle représente le rapport de la masse d'eau sur la masse du matériau à l'état sec :  $u = \frac{m_{eau}}{m_0}$

Teneur massique par unité de volume (kg.m<sup>-3</sup>) :

Elle représente le rapport de la masse d'eau sur le volume du matériau à l'état sec :  $w = \frac{m_{eau}}{V_0}$

Teneur volumique (m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>) :

Elle représente le rapport du volume d'eau sur le volume du matériau à l'état sec :  $\theta = \frac{V_{eau}}{V_0}$

#### III.2.4. Perméabilité

La perméabilité à la diffusion de vapeur d'eau  $\delta$  (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>) caractérise la capacité d'un matériau à permettre le transfert de vapeur sous gradient d'humidité relative. On peut définir également le facteur de résistance à la diffusion de vapeur  $\mu$  (-) comme étant le rapport de la perméabilité de l'air sur la perméabilité du matériau à la diffusion de vapeur [7] :  $\mu = \frac{\delta_a}{\delta}$ .

#### III.2.5. Courbe de sorption

La courbe isotherme de sorption décrit l'évolution de la quantité d'eau retenue (teneur en eau) dans un matériau en équilibre avec son ambiance à différents niveaux d'humidité relative. Si on part d'un état sec vers un état saturé, on parle d'un processus d'adsorption. Dans le cas inverse on obtient la courbe de désorption (Figure I-1). Elle est appelée isotherme car elle est déterminée à une température donnée. La figure I-1 représente la forme générale des courbes d'adsorption/désorption. On peut distinguer trois régions selon le taux de saturation du matériau :

Région hygroscopique : pour une humidité relative de (0% <  $\varphi$  < 95%)

Région capillaire : pour une humidité relative de (95% <  $\varphi$  < 100%)

La saturation maximale : à ( $\varphi = 100\%$ )

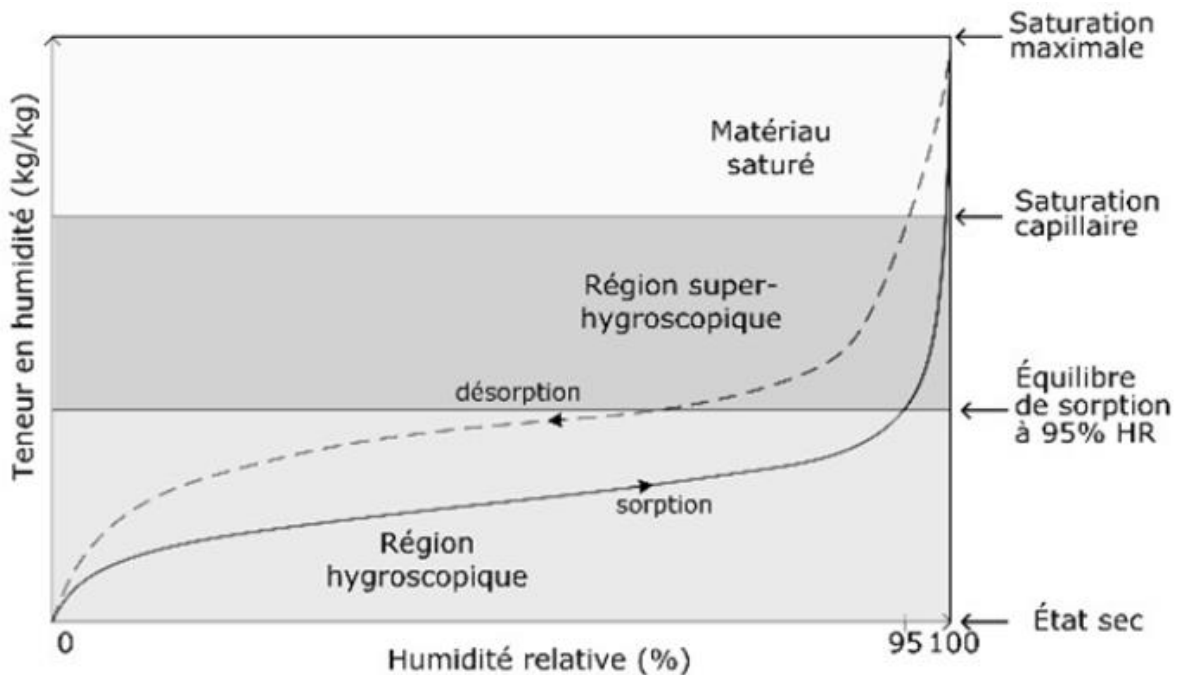


Figure I-1. Forme générale de l'isotherme de sorption [8]

### III.2.6. Conductivité thermique

La conductivité thermique  $\lambda$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) d'un matériau est une mesure de sa capacité à transmettre un flux de chaleur par conduction. Dans les milieux poreux, elle dépend fortement de la teneur en eau en plus de sa dépendance de la température.

### III.2.7. Capacité thermique massique

La capacité thermique massique  $C_p$  ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) d'un matériau quantifie la quantité de chaleur à fournir ou à extraire d'1 kg d'un matériau pour changer sa température d'un degré Celsius ou Kelvin.

### III.2.8. Succion capillaire

C'est la capacité d'un matériau poreux à absorber de l'eau liquide sans l'aide ou même en opposition à des forces externes comme la gravité. Ce phénomène apparaît quand une partie du matériau poreux est en contact avec une surface liquide (e.g. la pluie) et on peut l'observer essentiellement dans la région capillaire ( $95\% < \varphi < 100\%$ ) présentée sur la figure I-1 [9].

### III.2.9. Saturation libre

C'est la quantité maximale d'eau qu'un matériau peut contenir. C'est la valeur de la teneur en eau atteinte après de l'immersion totale d'un échantillon dans l'eau liquide [10]. Cette valeur caractérise le comportement du matériau dans la région de la saturation maximale ( $\varphi = 100\%$ ) qui simule les cas où le matériau se met en contact avec une grande surface d'eau.

### III.2.10. Capacité tampon hydrique MBV

Lorsque les matériaux de construction sont en contact avec l'air intérieur, ils ont un certain effet pour modérer les variations d'humidité intérieure dans les bâtiments occupés [11]. La capacité tampon hydrique MBV (Moisture Buffer Value) est une quantité standardisée par un projet nordique pour évaluer la capacité tampon hydrique des matériaux à l'aide du protocole NORDTEST. Cette valeur représente la quantité d'eau absorbée ou restituée par un matériau subit des variations cycliques d'humidité relative. En d'autres termes, elle estime la capacité des matériaux à réguler les variations externes d'humidité relative. Selon cette valeur, les matériaux se classifient en : négligeables, limités, modérés, bons ou excellents modérateurs des variations d'humidité relative (Figure I-2).

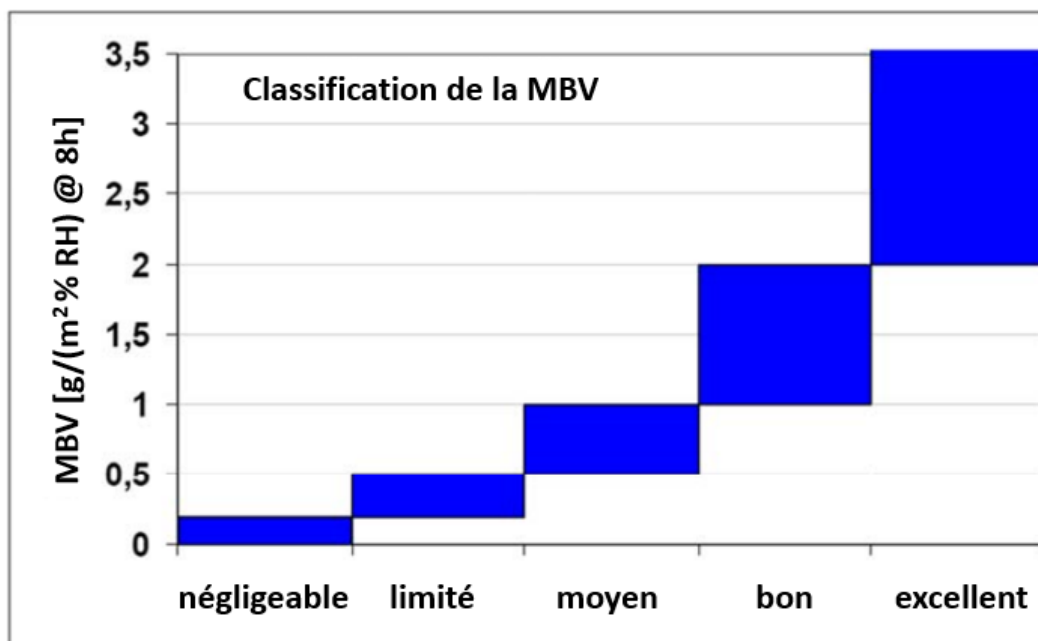


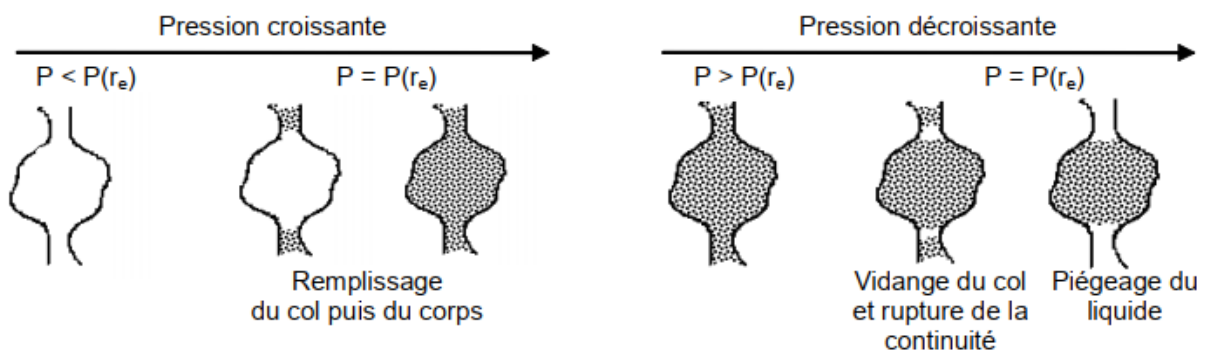
Figure I-2. Présentation graphique des classes pratiques de la MBV [11]

#### IV. Phénomène d'hystérésis

On peut remarquer sur la figure I-1 que l'évolution de la teneur en eau dans un matériau poreux ne suit pas le même chemin pendant les phases d'adsorption et de désorption. Pour une humidité relative donnée, la teneur en eau du matériau dans un processus de désorption est supérieure que celle d'un processus d'adsorption. Ce phénomène d'hystérésis dû à la rétention d'une quantité d'eau dans le matériau, représente une caractéristique très importante pour les matériaux biosourcés.

Ce phénomène s'explique par deux raisons principales : l'effet bouteille d'encre et la modification de l'angle de contact.

Le remplissage des pores de forme « bouteille d'encre » se fait lorsque la pression atteint une certaine valeur  $P(r_e)$  nécessaire pour remplir le col du pore de rayon  $r_e$ . Dans le processus inverse (la vidange) et lorsque la pression atteint de nouveau cette valeur  $P(r_e)$ , le ménisque qui remplit le col se sèche en premier en causant une discontinuité dans la phase d'eau où la quantité à l'intérieur reste piégée [12] (Figure I-3).



**Figure I-3.** Effet bouteille d'encre [12]

De plus, l'interface vapeur/liquide forme un angle de contact avec le matériau solide. Cet angle est défini par la différence de pression entre le liquide et la vapeur (loi de Laplace). Il existe un écart d'angle de contact selon la phase (adsorption ou désorption) ce qui empêche la vidange des pores de la même manière que leur remplissage pendant l'adsorption ce qui contribue également au piégeage de l'eau dans le pore [13].

Finalement, on peut dire que dans les deux cas le phénomène d'hystérésis résulte de la capillarité, où il a été observé expérimentalement que les courbes d'adsorption et de désorption sont confondues à des humidités relatives faibles. C'est la région où presque tous les phénomènes de condensation capillaire sont absents [14].



La modélisation de ce phénomène et la prise en compte de son effet dans les calculs numériques du transfert de chaleur et de masse sera faite dans le chapitre II à l'aide de plusieurs modèles de la littérature.

## **V. Les matériaux biosourcés les plus utilisés**

### **V.1. Béton de chanvre**

Le chanvre (*Cannabis Sativa*) est une plante annuelle (renouvelable) à feuilles palmées cultivée pour sa tige. La culture chanvrière fournit deux matériaux utilisés dans le génie civil. En effet, par procédés de séchage et de traitement mécanique (défibrage ou teillage), la tige se décompose en chènevotte, forme granulaire du chanvre (65 à 70 % de la masse de la tige) et en filasse ou étoupe, forme fibreuse du chanvre (30 à 35 % de la masse de la tige) [12].

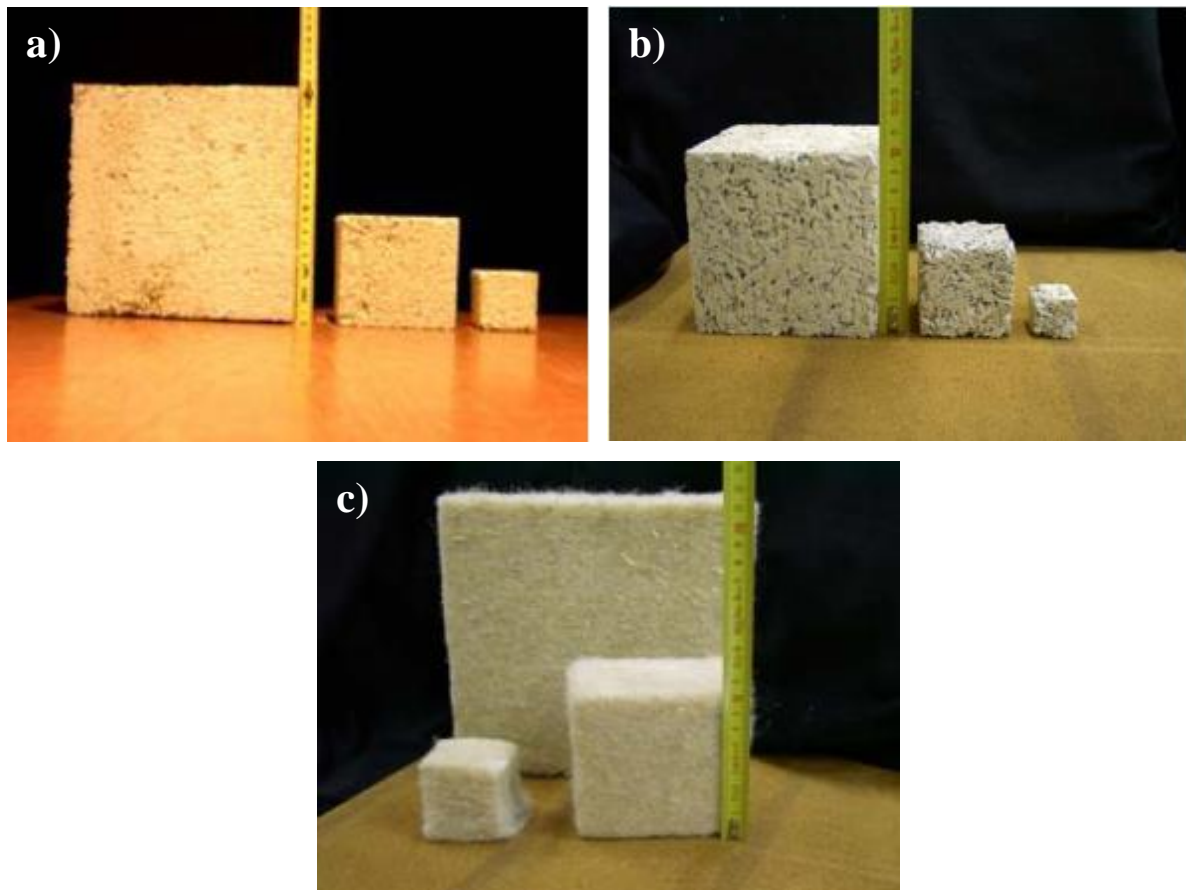
Actuellement, environ 5000 tonnes de chanvre sont utilisées chaque année dans la construction en France (Figure I-4), le pays qui a commencé à se développer dans les matériaux d'isolation à base de chanvre au début des années 90, suivi par d'autres pays européens et se développant au cours des 15 dernières années vers un intérêt mondial. En 2003, la France produisait 61% de la production totale européenne du chanvre [15].

Le béton de chanvre est de plus en plus recommandé par les éco-constructeurs pour un développement durable. Ce matériau végétal a un faible impact environnemental.

Jusqu'à ce jour, plusieurs types de matériaux à base de chanvre (Figure I-5) ont été étudiés à différentes échelles (échantillon, paroi et bâtiment). Ces études, expérimentales et numériques, ont montré que les performances de ces nouveaux matériaux sont similaires ou meilleures à celles des matériaux d'isolation usuels et avec un impact environnemental faible [12, 16].



**Figure I-4.** Une maison construite avec le béton chaux-chanvre située à Périgueux en sud-ouest de France [17]



**Figure I-5.** Des échantillons à base de chanvre : a) enduit chaux/chanvre b) béton de chanvre c) laine de chanvre [12]

## V.2. Construction en paille

En plus de représenter un sous-produit agricole essentiellement utilisé pour l'alimentation animale ou la litière, la paille peut être repoussée chaque année et peut être considérée comme un matériau local de construction avec très peu d'étapes de transformation et un faible apport d'engrais. Au cours des vingt dernières années, l'intérêt scientifique pour la paille comme matériau de construction a augmenté pour développer ce matériau d'un point de vue architectural et scientifique [18].

La paille a été utilisée dans la construction tout au long du 20<sup>ème</sup> siècle et, au cours des dix dernières années, les avantages de ce matériau ont été reconnus, tels qu'une excellente isolation thermique et acoustique, un processus de fabrication économe d'énergie et la réduction du dioxyde de carbone dans l'atmosphère due à la photosynthèse de la paille [19].

Les constructions à base de ballots de paille (Figure I-6) représentent une faible consommation d'énergie, une durabilité et une attraction, et elles peuvent être résistantes à diverses attaques grâce à un bon choix du système de construction [19].

Les travaux de recherche expérimentales et numériques sur les matériaux de construction à base de paille à différentes échelles ont montré des performances très intéressantes, que ce soit pour l'isolation thermique et la réduction de la consommation énergétique, ou pour le confort hygrothermique ressenti par les habitants [19-20].



**Figure I-6.** Une maison construite en ballots de paille située à Voyennes dans le nord de la France [19]

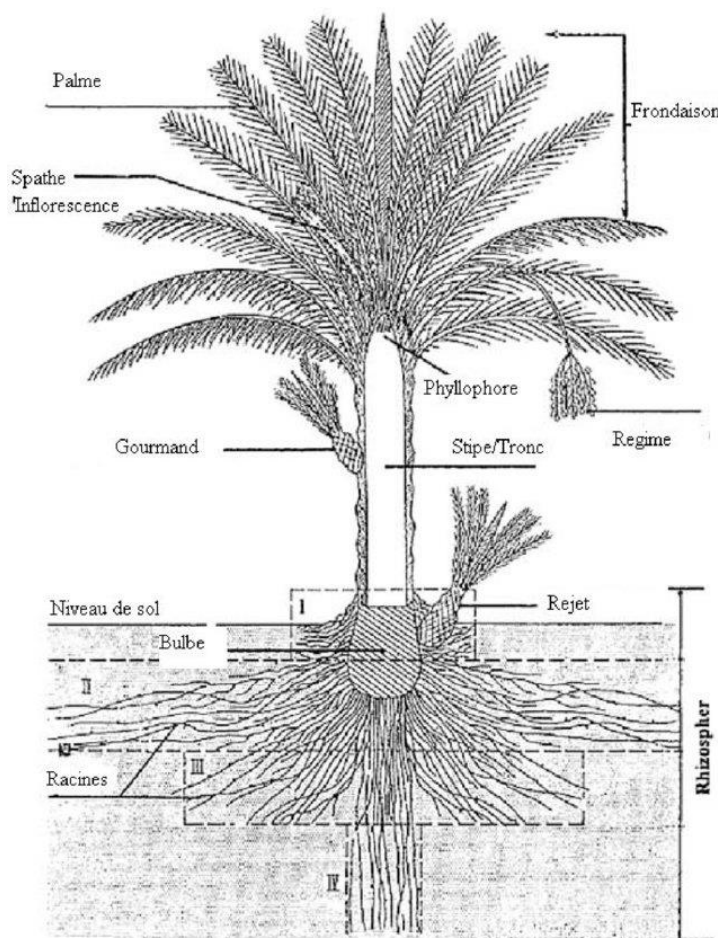


**Figure I-7.** Exemple de l'aspect général des pailles d'orge utilisées dans la construction : a) Pailles tubulaires, b) Pailles brisées [20]

## VI. Bois de palmier dattier

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L., 1753) (Figure I-8) est depuis longtemps l'une des cultures fruitières les plus importantes dans les régions arides de la péninsule arabique, de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Les palmiers dattiers nécessitent un été long et intensément chaud avec peu de pluie et une humidité très faible pendant la période allant de la pollinisation à la récolte, mais avec une eau souterraine abondante près de la surface ou de l'irrigation. Ils résistent à des températures allant jusqu'à 50 °C. Les dattes sont largement cultivées dans les régions arides entre 15 °N et 35 °N, du Maroc à l'ouest à l'Inde à l'est [21]. La production mondiale de dattes a augmenté de 1.8 Mt en 1962 à 8.46 Mt en 2016 [21, 22].

Le palmier dattier donne chaque année des quantités considérables de déchets pouvant être intégrés dans les matériaux de construction.

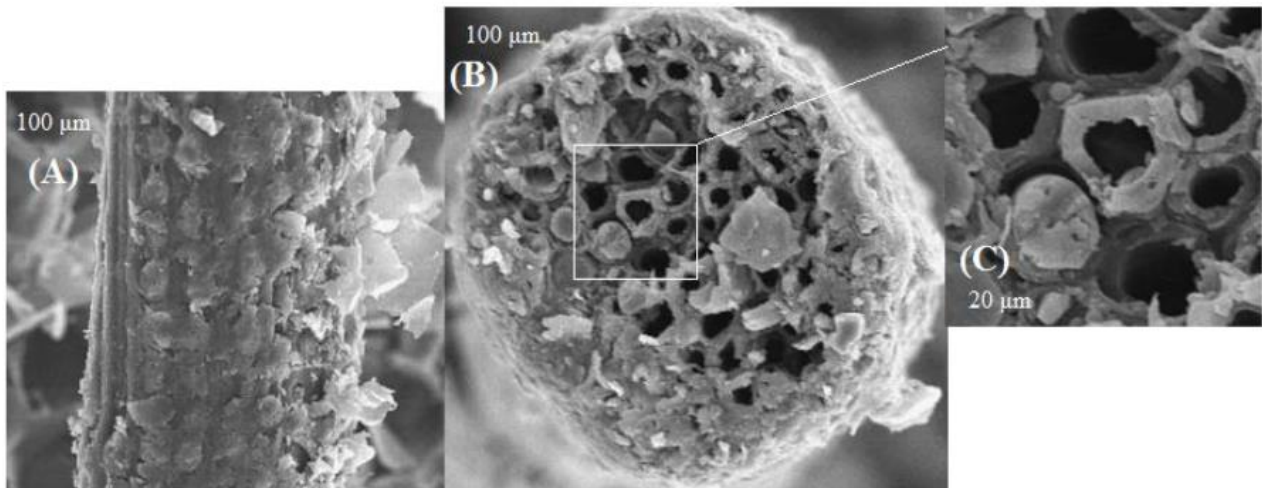


**Figure I-8.** Schéma d'un palmier dattier [23]

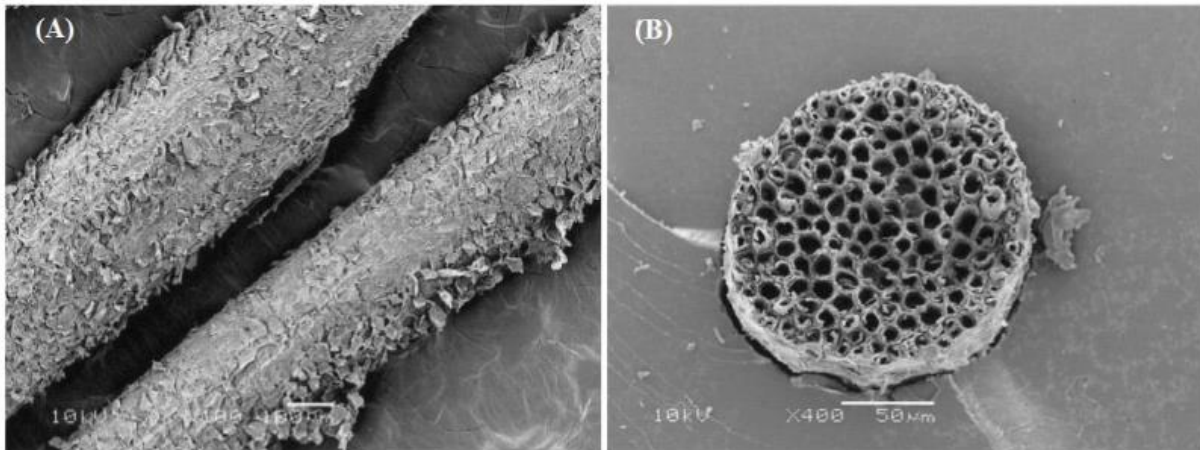
En Algérie, selon les statistiques récentes (2015) du Ministère Algérien de l'Agriculture et du Développement Rural, le palmier dattier (composé d'environ 1000 cultivars) occupe une superficie évaluée à 167 279 hectares équivalente à une production de 10 255 000 qx (1 quintaux à l'hectare = 100 kg/ha) pour un nombre de palmier estimé à plus de 18.6 millions d'unités. Les régions phoenicoles se situent généralement au sud de l'atlas saharien et couvrent 16 wilayas. Les wilayas de Biskra et d'El Oued sont les premières régions phoenicoles avec respectivement 27.4% et 22% de la superficie totale, et respectivement 23.1% et 22.4% du nombre total de palmiers dattiers. Le palmier dattier peut vivre jusqu'à un âge d'environ 200 ans, et peut atteindre une hauteur de plus de 80 pieds (environ 24 mètres). Les opérations de nettoyage des palmiers dattiers consistent principalement à éliminer les organes végétatifs qui ne sont plus fonctionnels, en particulier les palmes sèches. Le nombre

des palmes peut atteindre 50 à 200 chez un arbre adulte, avec une durée de vie de trois à sept ans, selon la variété et le mode de culture [10].

Le bois de palmier dattier est d'une structure fibreuse. Les images MEB d'une fibre de pétiole montrent une surface cylindrique irrégulière avec de nombreuses impuretés, cellules et pores (Figure I-9). Pour un autre type de fibres (fibres entourant la tige de palmier dattier), l'analyse de la structure et de la morphologie surligne des résultats similaires (Figure I-10). La forme de la fibre de palmier dattier est cylindrique. L'image MEB montre aussi que la surface extérieure est rugueuse et recouverte d'impuretés artificielles (sable et poussière) et de la lignine résiduelle. De plus, à partir de la vue transversale on remarque que la fibre de palmier dattier représente une collection de fibres multicellulaires où chaque fibre contient un vide central (lumen). Le diamètre de ces fibres est d'environ 2-5  $\mu\text{m}$ .



**Figure I-9.** Images MEB d'une fibre de bois de palmier dattier : vue longitudinale (A), vue transversale (B), zoom de la vue transversale (C) [5]



**Figure I-10.** Images MEB d'une fibre de bois de palmier dattier : vue longitudinale (A), vue transversale dans une matrice polymère (B) [24]

## VII. Composites à base de fibres de bois de palmier dattier

Les composites par définition sont des matériaux constitués d'au moins deux matériaux non miscibles ayant des propriétés différentes pour former un matériau à des performances améliorées. Les fibres de bois de palmier dattier ont été incorporées dans différents types de matrices afin de développer un nouveau composite ayant une capacité d'isolation thermique meilleure (une conductivité thermique et une masse volumique faibles).

Le bois de palmier dattier utilisé pour produire les fibres a été récolté des oasis de Laghrou (Biskra, Algérie). Il a subi différents processus pour obtenir les fibres à intégrer dans les composites :

Processus de broyage mécanique : le but de cette étape est de produire des fibres de petites dimensions à l'aide de la machine de broyage présentée dans la figure I-11. Les fibres sont obtenues après avoir effectué deux niveaux successifs de broyage sur le bois : le concassage (il permet d'avoir des tailles de particules inférieures à 1 cm) et le broyage grossier (une taille de particules de l'ordre de 1 mm).



**Figure I-11.** *Processus de broyage du bois de palmier dattier [25]*

Analyse granulométrique : cette analyse permet de séparer et de classer les fibres obtenues selon leurs diamètres à l'aide de l'appareil de tamisage présenté dans la figure I-12. Deux types de fibres ont été obtenus selon leurs diamètres : un diamètre moyen de 3 mm et un diamètre moyen de 6 mm (Figure I-13).



**Figure I-12.** *Appareil de tamisage des fibres [25]*





**Figure I-13.** Les différentes tailles de fibres obtenues après le processus de tamisage [26]

### **VII.1. Composite à base de gypse**

Il s'agit d'un biocomposite composé de fibres de palmier dattier intégrées dans une matrice de gypse. Chikhi et *al.* [25] ont étudié les propriétés mécaniques et thermophysiques de ce type de composite pour différents pourcentages et différentes tailles de fibres de bois de palmier dattier. L'étude mécanique a montré que l'ajout des fibres réduit la résistance à la compression et la résistance à la flexion (Figure I-14). Il a été conclu également que les valeurs de ces résistances sont plus élevées pour des fibres plus fines.

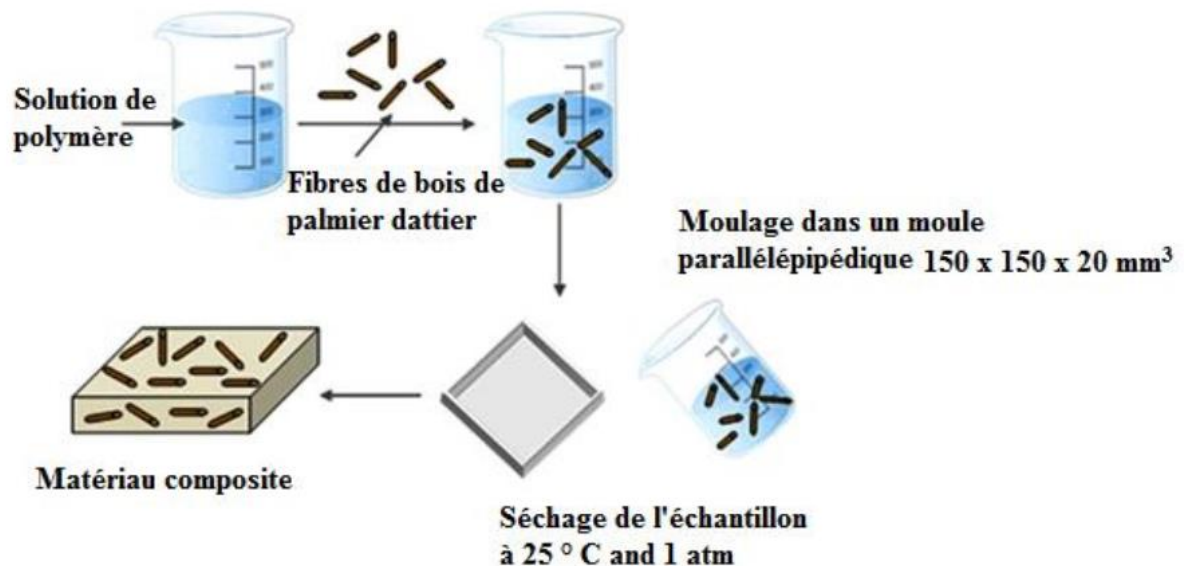
D'autre part, l'étude thermophysique a révélé que l'augmentation du pourcentage des fibres dans le composite résulte en une conductivité thermique et une masse volumique beaucoup plus faibles. Cet effet est plus remarquable que l'effet de la taille des fibres où les valeurs étaient relativement proches.



**Figure I-14.** Echantillons du composite gypse/fibre de palmier dattier après l'essai de flexion [25]

## VII.2. Composite à base de polymère

Il s'agit d'une matrice polymère préparée avec de la colle de résine vinylique blanche, chargée de fibres de palmier dattier pour l'isolation (Figure I-15). Haddadi *et al.* [27] ont étudié expérimentalement et numériquement la conductivité thermique ainsi que le comportement d'absorption d'eau du composite à base de fibres de palmier dattier.



**Figure I-15.** Schéma illustrant les étapes de préparation du composite rempli de fibres de palmier dattier [27]

Comme pour le composte à base de gypse, l'augmentation du pourcentage des fibres de palmier dattier dans la matrice polymère donne des conductivités thermiques plus faibles. De plus, l'ajout des fibres augmente aussi la capacité d'absorption d'eau du composite.

### **VII.3. Béton de bois de palmier dattier (Date Palm Concrete, DPC)**

Benmansour *et al.* [28] ont étudié un nouveau composite à base de béton fabriqué en mélangeant du ciment, du sable et de l'eau avec des fibres de bois de palmier dattier. L'étude consiste à évaluer l'effet de la taille et du pourcentage des fibres allant de 0% jusqu'à 30% (en poids) (Figure I-13). Les paramètres étudiés sont la résistance à la compression, l'absorption d'eau et la conductivité thermique. Les résultats montrent encore une fois que l'augmentation du pourcentage des fibres réduit la conductivité thermique, la masse volumique et la résistance à la compression. Il a été mis en évidence également que la conductivité thermique augmente proportionnellement avec l'augmentation de la teneur en eau dans le matériau. Finalement, il a été conclu, en se basant sur la classification RILEM [29], que le pourcentage optimal de fibres pour les isolants structuraux et porteurs est compris entre 5% et 15%.

#### **VII.3.1. Propriétés du DPC à 15% de fibres de bois de palmier dattier**

En se basant sur les travaux de Benmansour *et al.* [28], les propriétés thermiques et hydriques du béton de DPC à 15% de fibres (une porosité totale de 64% et une porosité ouverte de 58%) ont été étudiées pour des applications d'isolation thermique et de régulation hydrique dans les bâtiments.

#### *Facteurs de résistance à la vapeur*

La perméabilité à la vapeur d'eau caractérise la capacité du DPC à permettre le transfert de vapeur sous des gradients d'humidité relative. Deux tests ont été réalisés par Chennouf *et al.* [30] pour déterminer les facteurs de résistance à la diffusion de vapeur : coupelle sèche et coupelle humide (EN ISO 12572) correspondant à des plages d'humidité relative de : 0% à 50% RH et 50% à 90% RH respectivement. Le principe de ce test est de créer des gradients d'humidité relative entre les deux surfaces de l'échantillon scellé latéralement ; ensuite, la variation de masse quotidienne est mesurée jusqu'à ce qu'elle devienne constante.

### *Succion capillaire et saturation libre*

Le test de succion capillaire vise à déterminer le coefficient d'absorption d'eau dans le processus de succion. Cet essai consiste (conformément à la norme ISO 15148) à plonger dans de l'eau le fond d'un échantillon cubique, puis à suivre l'évolution de l'augmentation de la masse en fonction de la racine carrée du temps. Le coefficient d'absorption d'eau représente la pente de la courbe obtenue [31]. La saturation libre est nécessaire pour savoir la quantité d'eau qu'un matériau peut retenir lorsqu'il est mis en contact avec une grande surface d'eau. Cette valeur est obtenue par l'immersion totale d'un échantillon dans l'eau distillée jusqu'à atteindre l'état de saturation [31].

### *Conductivité thermique, capacité thermique et masse volumique*

La conductivité thermique varie en fonction de la température et de la teneur en eau [31] ; sa dépendance de la teneur en eau est plus importante dans le cas des matériaux poreux en raison de leur grande capacité de stockage d'eau [32]. Dans ce travail, l'expression suivante, qui définit la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau, a été utilisée [9]:

$$\lambda(w) = \lambda_0 \left( 1 + b \cdot \frac{w}{\rho_0} \right) \quad (\text{I-1})$$

$\lambda(w)$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) est la conductivité thermique du matériau en fonction de la teneur en eau,  $\lambda_0$  est la conductivité du matériau à l'état sec,  $b$  (-) est le supplément d'humidité de la conductivité thermique,  $w$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) est la teneur en eau du matériau et  $\rho_0$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) est sa masse volumique à l'état sec.

Les paramètres  $\lambda_0$  et  $b$  sont estimés à partir des valeurs de la conductivité thermique mesurées par Haba et al. [31] pour des échantillons de DPC dans une chambre climatique à l'état sec et à l'état humide (80% HR) et à différentes températures. Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, diffusivité thermique et capacité thermique volumétrique) ont été mesurées à l'aide du dispositif ISOMET (Applied Precision, Ltd.), basé sur une méthode de mesure dynamique permettant de réduire le temps de mesure de la conductivité thermique à 10-16 minutes. Cette méthode repose sur l'analyse de la réponse en température des échantillons de DPC aux impulsions de flux de chaleur.

### Isotherme de sorption

L'isotherme de sorption des matériaux biosourcés est une caractéristique très importante, compte tenu de la grande porosité résultant des fibres végétales. Dans le cas du DPC, les isothermes de sorption (phases d'adsorption et de désorption) ont été obtenues expérimentalement (EN ISO 12571) par Chennouf *et al.* [30] en utilisant une chambre climatique. Les courbes expérimentales obtenues à 23 °C (Figure I-16) ont été ajustées avec le modèle GAB, défini par l'expression suivante :

$$\frac{u}{u_m} = \frac{C_G \cdot k \cdot \varphi}{(1 - k \cdot \varphi)(1 - k \cdot \varphi + C_G \cdot k \cdot \varphi)} \quad (I-2)$$

Où  $u$  est la teneur en eau massique du matériau,  $u_m$  est la teneur en eau monomoléculaire,  $C_G$  et  $k$  sont des paramètres de fit et  $\varphi$  (%) est l'humidité relative.

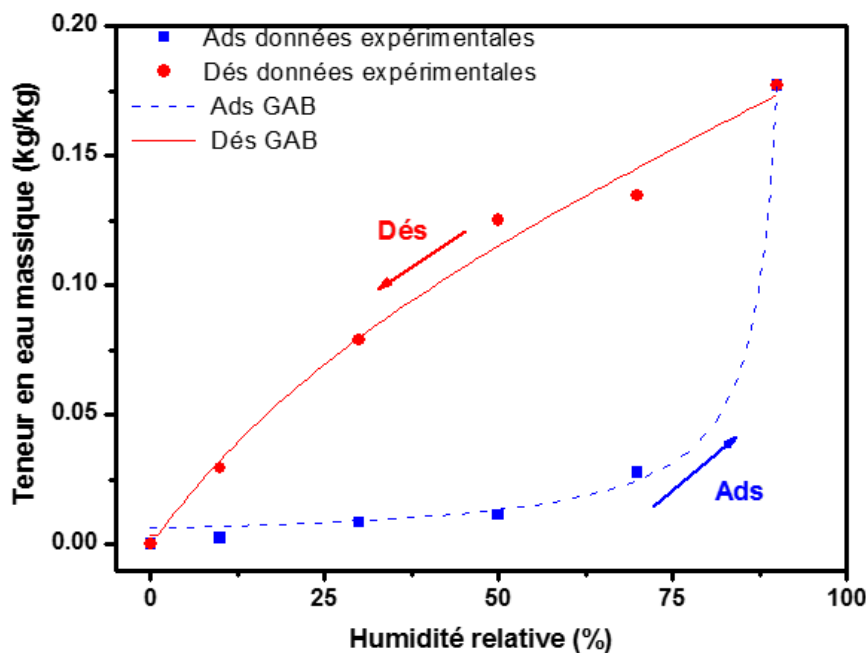


Figure I-16. Isothermes de sorption du DPC à 23°C [30]

Comme on peut le voir sur la figure I-16, le DPC présente un phénomène d'hystérésis très important entre les phases d'adsorption et de désorption, en particulier dans la plage d'humidité relative moyenne (50% HR). Ce phénomène est une propriété commune pour les matériaux biosourcés et son influence sur le calcul des transferts de chaleur et d'humidité doit être étudiée.

Le tableau I-1 résume les valeurs de toutes les propriétés du DPC 15% (décrites dans le paragraphe VII.3.1) :

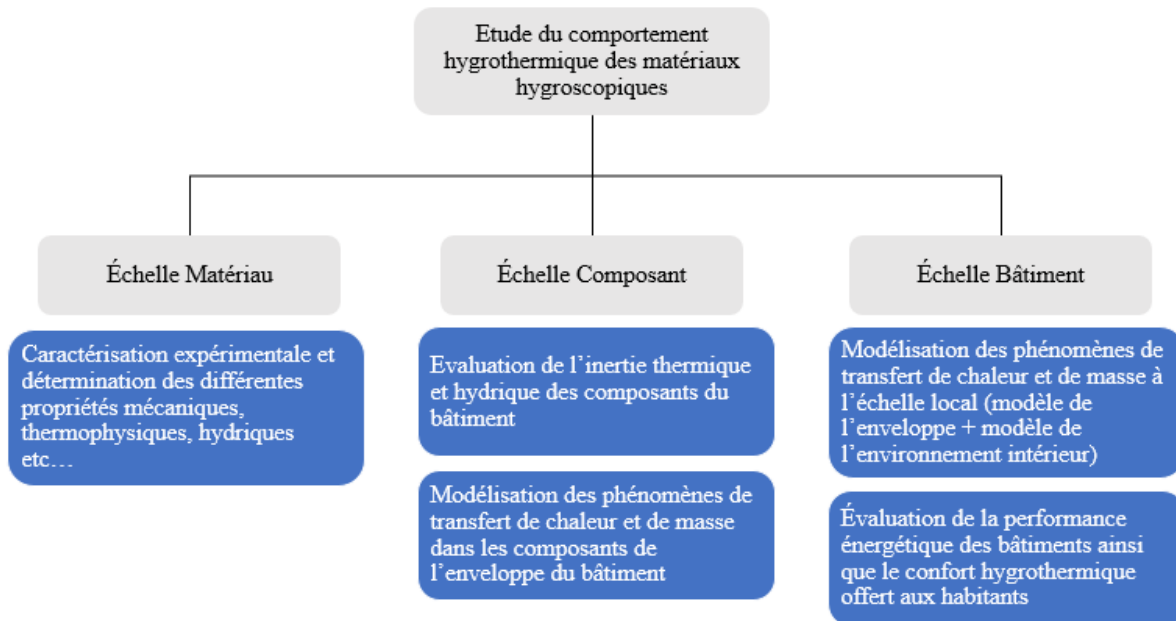
**Tableau I-1 : Propriétés du DPC15%**

Propriété	Valeur	Référence	Propriété	Valeur	Référence
Masse volumique à l'état sec [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	954	[31]	Capacité thermique à l'état sec [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]	1500	[28]
Conductivité thermique à l'état sec [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]	0.185	[31]	Supplément d'humidité de la conductivité thermique [-]	10.190	[31]
Facteur de résistance à la vapeur d'eau (Coupelle sèche) [-]	6.310	[30]	Facteur de résistance à la vapeur d'eau (Coupelle humide) [-]	5.570	[30]
Coefficient d'absorption d'eau [ $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-0.5}$ ]	0.165	[31]	Teneur en eau à la saturation libre [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	429	[31]

L'aspect expérimental était dominant sur tous les travaux réalisés jusqu'à présent sur le béton de bois de palmier dattier, qui est une étape indispensable pour caractériser un nouveau matériau en termes de sa résistance mécanique, ses propriétés physiques, thermiques, hydriques ...etc. Cependant, pour bien valoriser ces propriétés, le matériau doit être étudié dans des conditions proches de la réalité à travers des études expérimentales et numériques aux échelles mur et bâtiment.

## VIII. Etat de l'art des travaux sur les matériaux hygroscopiques de construction

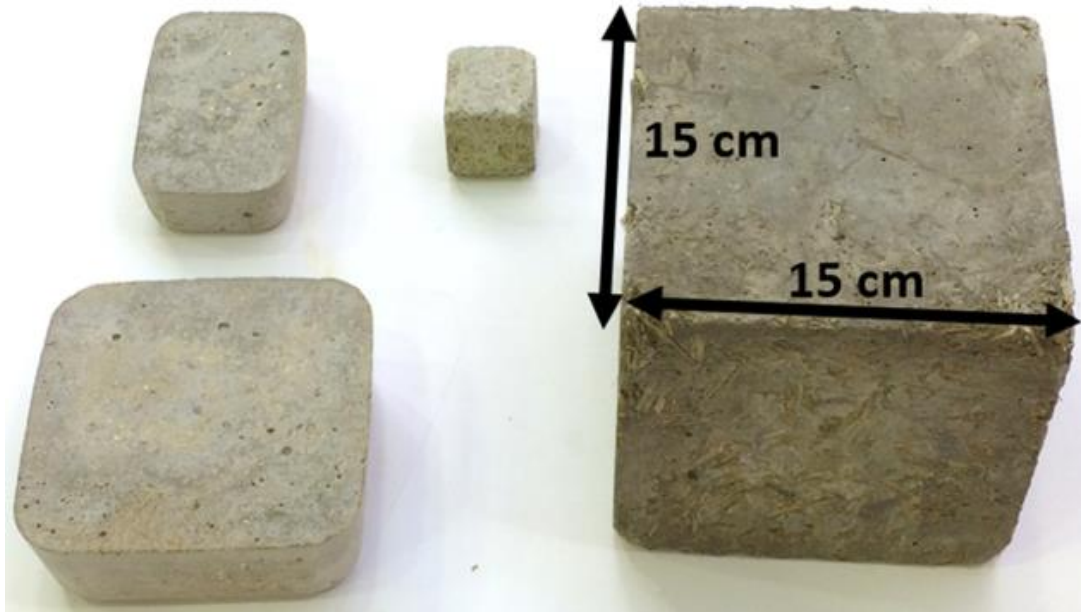
Dans cette partie, on présente une synthèse de quelques travaux antérieurs les plus importants sur les matériaux hygroscopiques et biosourcés. Les études sur le comportement hygrothermique des matériaux de construction partent généralement de l'échelle matériau où on caractérise les différentes propriétés mécaniques, thermophysiques, hydriques etc. Ces propriétés servent par la suite à alimenter les modèles hygrothermiques pour des études numériques à plus grandes échelles. L'échelle la plus représentative de la réalité est l'échelle bâtiment (ou local) où la performance des matériaux peut être évaluée en termes de la consommation énergétique et du confort hygrothermique offert par les bâtiments construits avec ces matériaux. La figure I-17 montre les différentes échelles d'étude du comportement hygrothermique des matériaux de construction avec les principaux points abordés à chaque échelle.



**Figure I-17.** Organigramme montrant les différentes échelles d'étude sur les matériaux biosourcés

### VIII.1. Echelle matériau

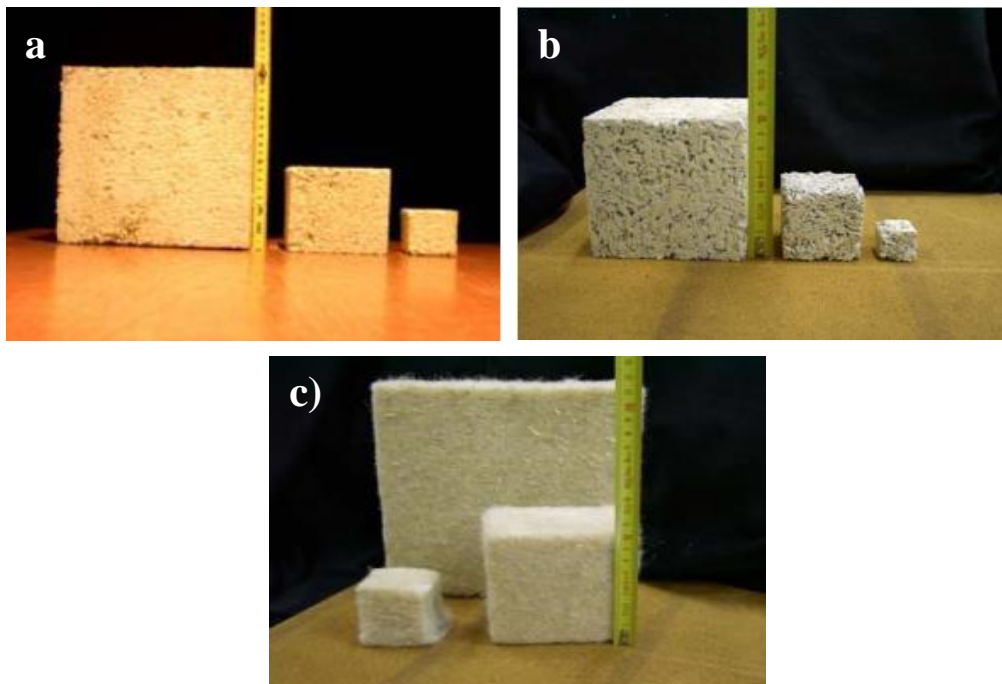
L'échelle matériau représente la plus petite échelle et le premier niveau d'étude quand il s'agit d'étudier les matériaux de construction. A ce niveau, les différentes propriétés thermophysiques et hydriques sont déterminées expérimentalement. La caractérisation se fait sur des échantillons de petites dimensions qu'on subit à différents tests et différentes contraintes : mécanique, thermique, hydrique etc. (Figure I-18). Les études à cette échelle permettent d'avoir une première évaluation des performances des nouveaux matériaux qui sont comparées avec celles des matériaux classiques avant de passer à une échelle plus grande. Ces propriétés servent également comme des paramètres d'entrée pour les différents modèles mathématiques utilisés pour étudier numériquement le comportement des matériaux sous différentes conditions.



**Figure I-18.** Des échantillons du béton de bois de palmier dattier pour la caractérisation expérimentale à l'échelle matériau [30]

Travaux de collet [12] :

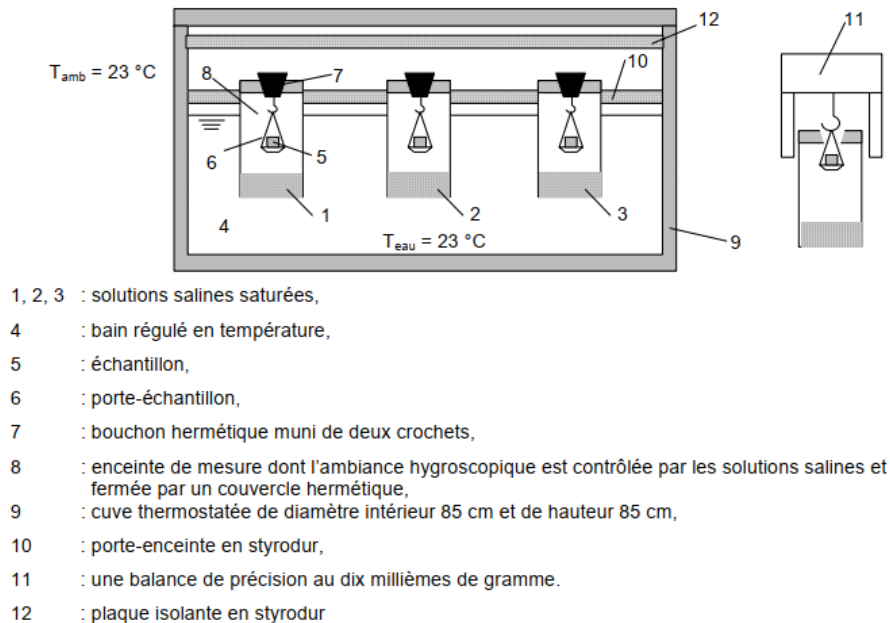
Son travail de thèse porte sur la caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux : la bauge (matériau à base d'argile), l'enduit chaux/chanvre, le béton de chanvre et la laine de chanvre (Figure I-19).



**Figure I-19.** Des échantillons à base de chanvre : a) enduit chaux/chanvre b) béton de chanvre c) laine de chanvre [12]



Ce travail s'est intéressé dans un premier temps par l'étude des caractéristiques physiques structurelles des matériaux. La recherche d'un volume représentatif a été menée et le réseau poreux a été exploré au porosimètre à mercure. De plus, les isothermes d'adsorption/désorption des matériaux étudiés sont déterminées à l'aide du dispositif expérimental montré sur la figure I-20. Les courbes de sorption ont été ensuite lissées avec le modèle GAB. Ces résultats couplés aux mesures de perméabilité à la vapeur ont conduit à la détermination du coefficient de diffusion hydrique isotherme en phase vapeur.



**Figure I-20.** Dispositif expérimental mis en place pour la détermination des isothermes d'adsorption/désorption [12]

Dans la deuxième partie de ce travail, les caractéristiques thermiques des matériaux ont été mesurées à trois teneurs en eau différentes. Par la suite, les propriétés déterminées ont été utilisées pour simuler la performance énergétique d'un bâtiment dont les parois sont constituées des matériaux étudiés et qui a été comparée avec celle d'un bâtiment dont les parois sont en parpaings isolés. Les résultats ont montré que les besoins énergétiques sont similaires, pour des impacts environnementaux plus faibles à la construction et en fin de vie du bâtiment.

### Travaux de Medjelekh [33] :

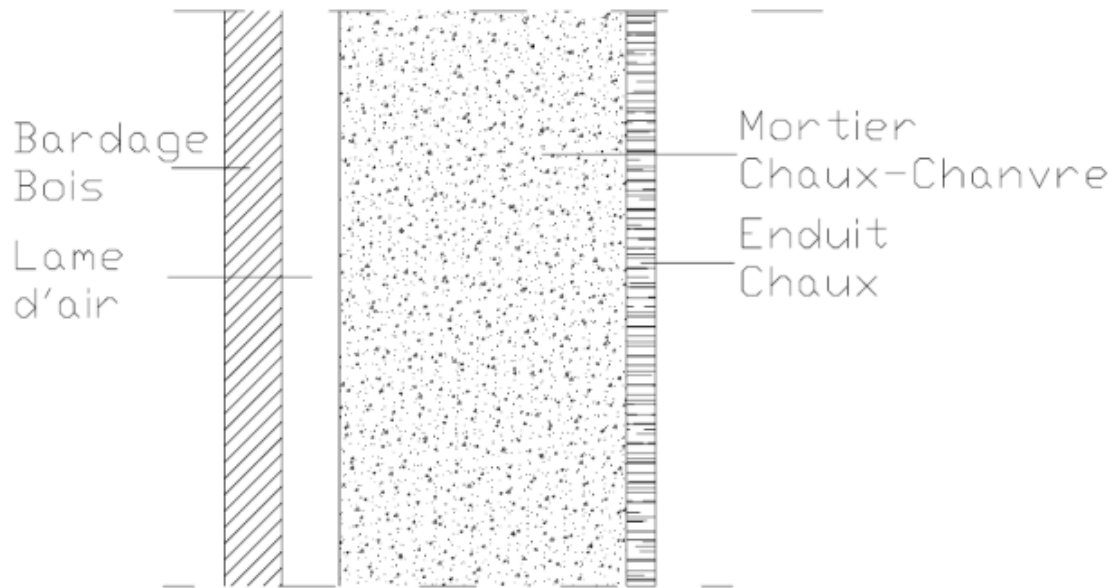
Dans ce récent travail, une approche expérimentale et numérique du comportement hygrothermique des enveloppes hygroscopiques a été menée avec une caractérisation multi-échelle. L'étude à l'échelle du matériau a permis de déterminer les propriétés liées aux transferts de chaleur et de masse. Les mesures de la conductivité thermique, la capacité thermique, la diffusion hydrique et les isothermes de sorption ont été effectuées pour plusieurs matériaux : le béton de bois, la terre comprimée, le travertin et la plaque de plâtre (Figure I-21). Les propriétés de tampon hydrique « MBV » ont été aussi évoquées dans ce travail. Les implémentations différences finies et éléments finis ont abouti à une analyse fine des transferts à l'échelle de cellule-test avec un travail de réduction d'ordre nécessaire pour limiter le temps de calcul. L'accent a été mis sur les effets de l'humidité apportés dans les ambiances intérieures afin de valider un outil numérique développé dans ce travail. Les enveloppes hygroscopiques choisies sont composées de matériaux biosourcés tels que le bois massif, le béton de bois, la terre et la paille. Les enveloppes de travertin et de plaques de plâtre ont été également étudiées.



**Figure I-21.** *Éprouvettes des matériaux étudiés [33]*

### VIII.2. Echelle paroi (ou composant ou système)

L'échelle système représente le deuxième niveau d'étude et de recherche sur le comportement hygrothermique des matériaux poreux de construction. Les composants étudiés sont souvent soit des parois simples (monocouche), soit des systèmes de mur (multicouche). La paroi simple concerne une paroi sans revêtement, tandis que le système de mur représente une paroi recouverte d'une ou plusieurs couches de revêtement, il s'agit d'un système complexe (voir la figure I-22).



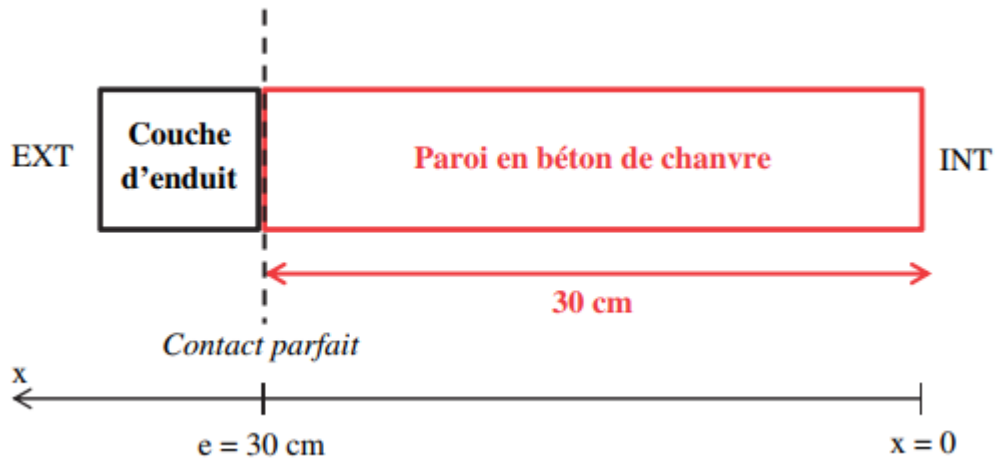
**Figure I-22.** Coupe transversale d'un mur biosourcé à base de chanvre [34]

*Travaux de Oumeziane [35] :*

L'objectif principal de ces travaux est d'évaluer la réponse hygrothermique du béton de chanvre aux sollicitations climatiques. Dans une première partie, un modèle numérique de transferts hygrothermiques a été développé. Afin d'alimenter ce modèle, l'étude a par ailleurs été focalisée sur la modélisation des propriétés thermiques et hydriques du béton de chanvre en s'appuyant sur les résultats de différents essais de caractérisation. Cette modélisation a permis également d'évaluer l'effet de la variation de la masse volumique du béton de chanvre sur ses propriétés. Les résultats numériques du modèle ont été confrontés aux mesures expérimentales réalisées sur une paroi en béton de chanvre soumise à différentes conditions climatiques à l'aide d'une enceinte biclimatique. Une analyse de sensibilité aux paramètres a montré que le transfert hygrothermique est très sensible à la teneur en eau.

Dans une deuxième partie, les auteurs de ce travail ont étudié l'effet d'hystérésis thermo dépendant qui influe sur la capacité de stockage hydrique et le transfert de chaleur et de masse. Les résultats de cette partie ont montré que cet effet est nécessaire pour bien prédire le comportement du matériau. La prise en compte de ce phénomène a produit ainsi des résultats numériques pertinents en accord avec les mesures expérimentales obtenues sous sollicitations hydriques et thermiques cycliques.

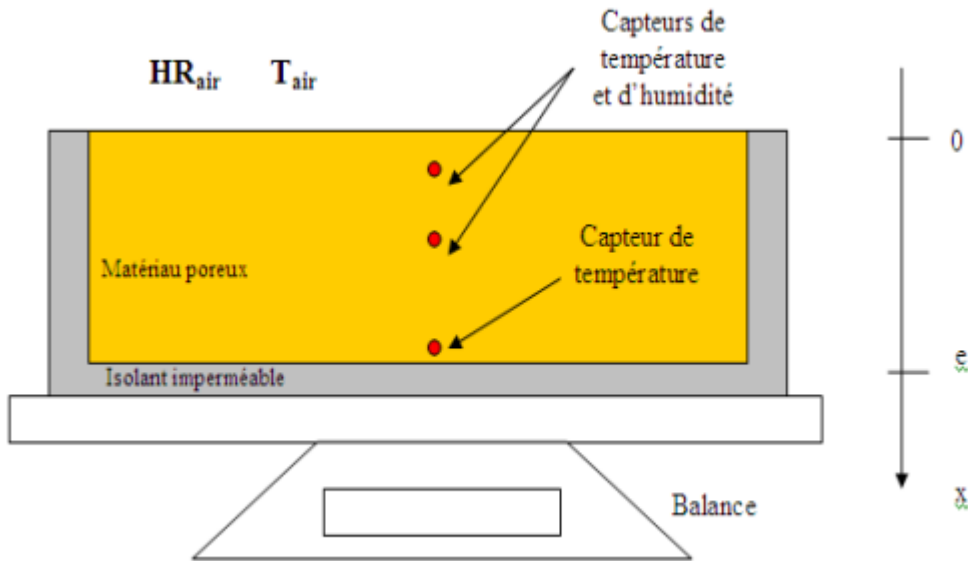
Finalement, le travail a été étendu à une étude numérique de l'influence de la nature et de l'épaisseur d'une couche d'enduit apposée sur les surfaces externes de la paroi en béton de chanvre (Figure I-23).



*Figure I-23. Configuration du mur étudié [35]*

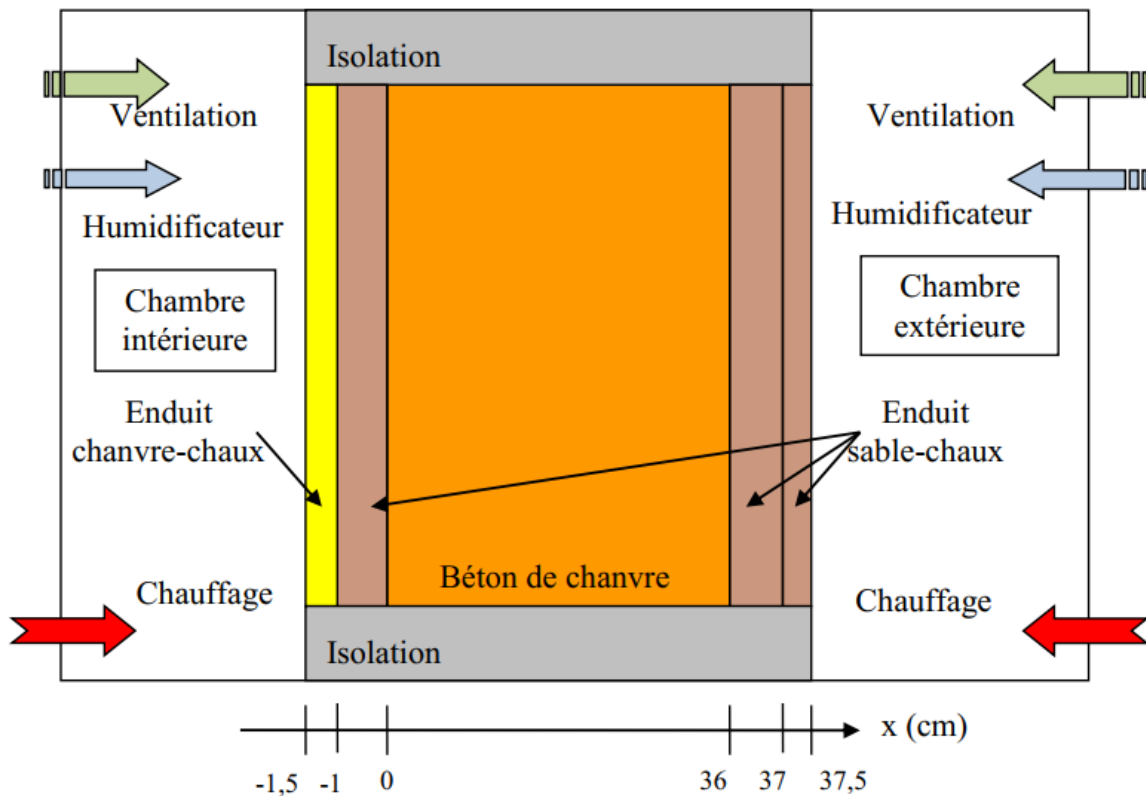
*Travaux de Lelièvre [36] :*

Les travaux de cette thèse portent sur l'étude expérimentale et numérique du comportement hygrothermique d'une paroi multicouche composée de matériaux biosourcés : un mur de béton de chanvre, recouvert de plusieurs couches d'enduit (chanvre-chaux et sable-chaux). Premièrement, un modèle numérique 1D a été développé sur le logiciel COMSOL Multiphysics® en s'appuyant sur l'approche macroscopique développée par Whitaker. A ce modèle, des simplifications ont été apportées et évaluées et de même plusieurs modèles d'hystérésis ont été testés et la différence entre eux a été mise en évidence. Deuxièmement, des expérimentations et des simulations ont été effectuées sur des plaques planes (monocouches) fabriquées avec les trois matériaux afin d'étudier leur comportement hygrothermique (Figure I-24).



**Figure I-24.** Schéma du dispositif expérimental utilisé pour étudier les plaques de matériaux [36]

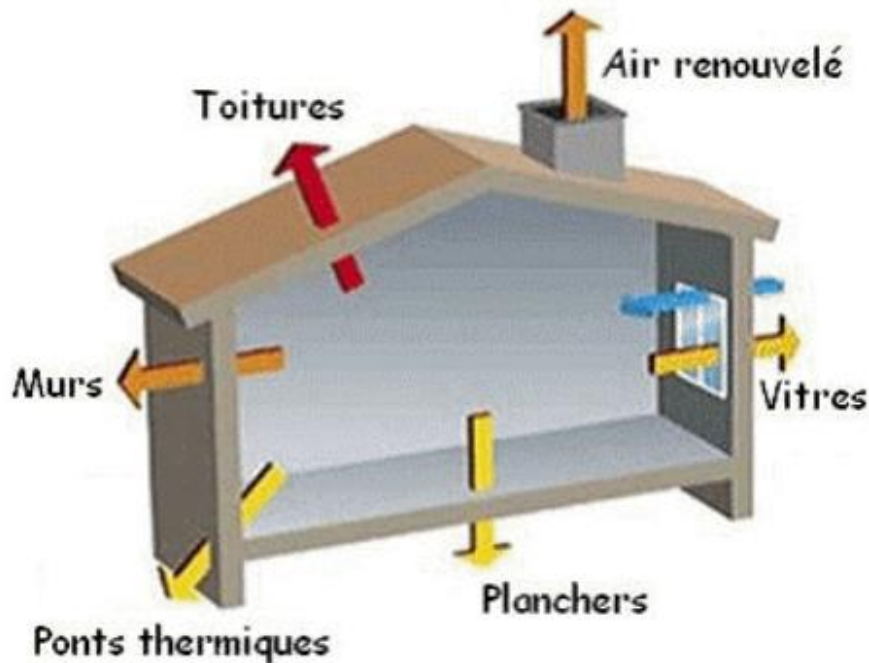
La dernière partie de ce travail se focalise sur l'étude expérimentale et numérique du comportement hygrothermique d'une paroi multicouche (une paroi recouverte d'enduits, figure I-25). Deux cas ont été étudiés qui représentent des configurations de parois monocouche et multicouche afin de mettre en évidence l'effet des différents enduits. De plus, des comparaisons entre les simulations et l'expérimental ont été effectuées et la fiabilité du modèle développé a été mise en exergue.



*Figure I-25. Schéma du dispositif expérimental de la paroi de chanvre avec enduits [36]*

### VIII.3. Echelle bâtiment

A l'échelle bâtiment, le but est de faire le lien entre les propriétés des matériaux, déterminées aux échelles inférieures (matériau et composant), et les performances hygrothermiques et énergétiques des enveloppes des bâtiments. Par conséquent, les études à cette échelle sont plus importantes et significatives, particulièrement pour le développement de l'ensemble de la filière et l'application des matériaux hygroscopiques à une échelle qui est plus représentative de la réalité. A ce niveau, les études expérimentales et numériques peuvent être réalisées d'une manière similaire qu'à l'échelle composant. Pour les simulations, les calculs se basent toujours sur des modèles de transfert de chaleur et de masse établis à l'échelle composant. Les conditions aux limites sont établies aux interfaces entre l'enveloppe du bâtiment et l'ambiance intérieure ou extérieure, entre les couches des composants multicouches, et en certains cas à l'intérieur du bâtiment (ventilation, sources d'humidité et de chaleur, etc). En ce qui concerne l'étude expérimentale, elle peut se faire in situ, dans des bâtiments réels occupés ou dans des cellules construites particulièrement pour l'étude.



*Figure I-26. Schéma montrant un exemple d'une enveloppe à étudier à l'échelle de bâtiment*

*Travaux de Tariku [37] :*

Dans ce travail de recherche, un modèle hygrothermique a été développé pour le bâtiment entier, qui considère le bâtiment comme un système et traite les interactions dynamiques de chaleur, d'air et d'humidité (HAM : Heat, Air and Moisture) entre les composants de l'enveloppe du bâtiment, l'environnement intérieur et les systèmes mécaniques (Figure-27). Le modèle prend en compte les trois transferts interdépendants et couplés et évalue la température et l'humidité relatives intérieures, la performance hydrique de l'enceinte du bâtiment et l'efficacité énergétique du bâtiment de manière intégrée sur une seule plateforme. Le modèle avec deux modèles principaux, à savoir un modèle de l'enveloppe du bâtiment et un modèle de l'intérieur, ont été comparés avec des tests analytiques, numériques et expérimentaux publiés au niveau international. Après une analyse comparative réussie, son utilité dans des applications pratiques a été démontrée par la modélisation de l'humidité intérieure d'un bâtiment existant et par l'évaluation des options de rénovation ultérieures pour atteindre une humidité intérieure favorable au confort et à la santé des occupants et en même temps à haute efficacité énergétique avec une bonne durabilité. L'analyse thermique et hydrique du bâtiment dans son intégralité qui a été réalisée dans ce travail de recherche souligne l'importance d'une approche de conception

intégrée dans la conception de nouveaux bâtiments ou la rénovation des bâtiments existants afin d'atteindre une performance de bâtiment optimisée.

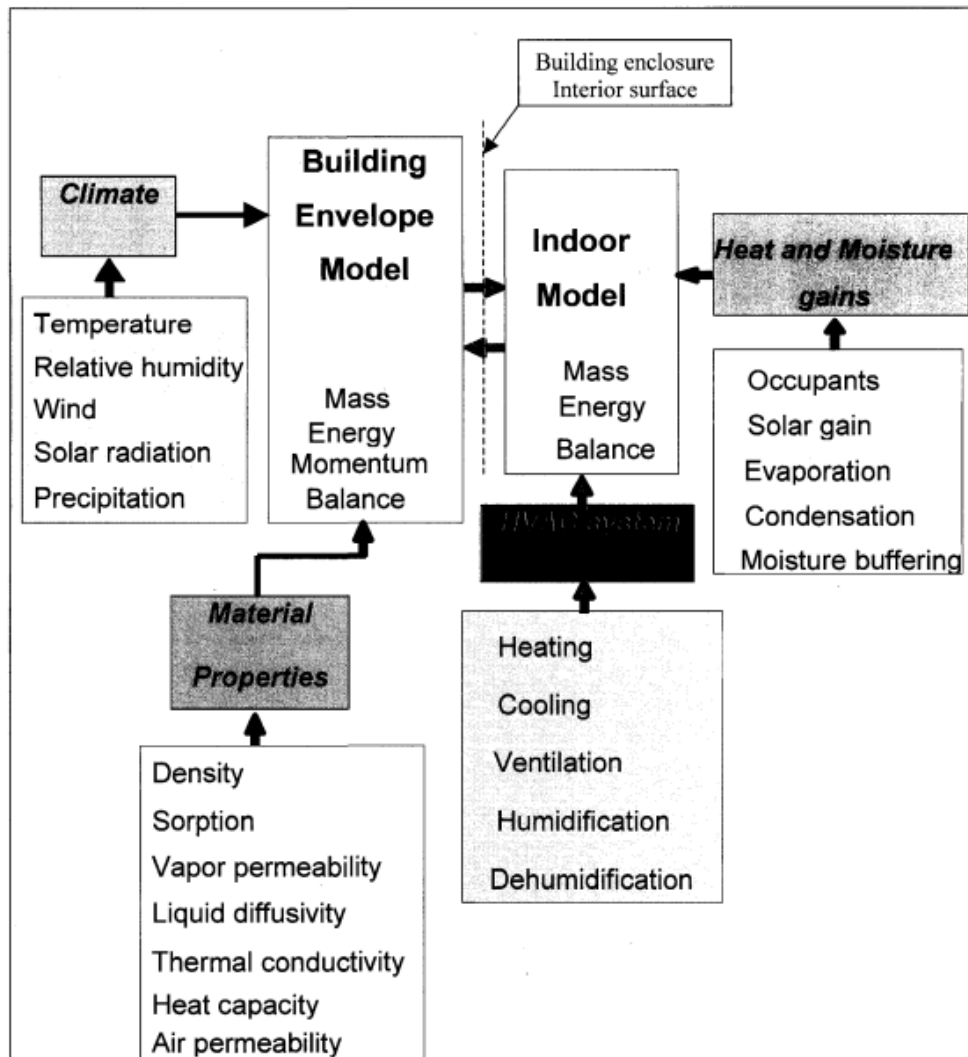


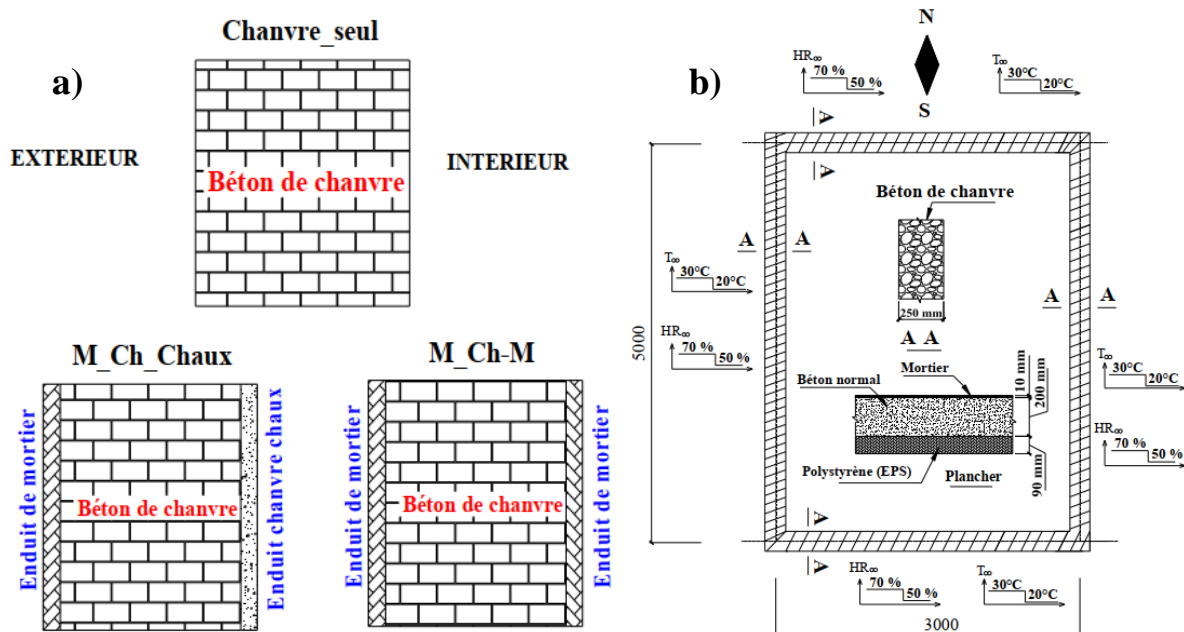
Figure I-27. Diagramme schématique du modèle développé [37]

Travaux de Tran le [38] :

Les travaux de cette thèse s'intéressent par l'étude du comportement hygrothermique du béton de chanvre à la fois à l'échelle paroi et à l'échelle bâtiment. Dans ce travail, qui est majoritairement numérique, un environnement de simulation appelé SPARK (Simulation Problem Analysis and Research Kernel) a été utilisé pour résoudre le système d'équations du modèle hygrothermique. Cet outil numérique a été premièrement validé avec des données de la littérature aux différentes échelles d'étude. Par la suite, les auteurs de ce travail ont étudié le comportement hygrothermique d'une paroi et d'un local en béton de chanvre sous des conditions climatiques statique et dynamique (Figure I-28). Les résultats obtenus pour les



conditions hivernales réelles ont montré que la combinaison de la ventilation hygroréglable avec la capacité de sorption des parois en béton de chanvre permet de réduire d'environ 12% les besoins énergétiques par rapport à une ventilation classique.



**Figure I-28.** Configurations étudiées à l'échelle paroi (a), Plan du local étudié à l'échelle bâtiment (b) [38]

Enfin, la dernière partie de ce travail a été consacrée à une étude préliminaire, expérimentale et numérique, d'un nouveau matériau 100% végétal à base d'une matrice d'amidon de blé et de chènevotte. Sa performance hygrothermique dans le bâtiment a été mise en évidence pour les conditions climatiques de Nancy. Les résultats ont montré les propriétés très prometteuses de ce nouveau matériau, comparables à celles des composites à base de chanvre étudiés dans la première partie.

## IX. Conclusion

L'utilisation de nouveaux matériaux de construction, dits éco-matériaux renouvelables, est devenue indispensable en raison de leurs nombreux avantages par rapport aux matériaux de construction classiques. Le béton de chanvre, la paille, les composites à base de bois de palmier dattier ...etc., sont des matériaux respectueux de l'environnement qui montrent des performances hygrothermiques très prometteuses. Le développement des composites à base de déchets de bois de palmier dattier a permis d'avoir plusieurs types de matériaux pour différentes applications dans le secteur de l'habitat. Leurs propriétés importantes d'isolation thermique et

de régulation des climats intérieurs conduit à minimiser la consommation énergétique des bâtiments en offrant un confort hygrothermique meilleur. De plus, ces matériaux nécessitent une mise en œuvre relativement simple et qui consomme moins d'énergie par rapport aux matériaux de construction usuels.

En se basant sur cette recherche bibliographique, nous focalisons dans la suite du travail sur la modélisation des phénomènes de transfert hygrothermique dans le béton de bois de palmier dattier et la simulation de son comportement hygrothermique à grande échelle.

## Références

- [1] N. Delgarm, B. Sajadi, S. Delgarm et F. Kowsary, «A novel approach for the simulation-based optimization of the buildings energy consumption using NSGA-II: Case study in Iran,» *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 552-560, 2016.
- [2] L. Liu, H. Li, A. Lazzaretto, G. Manente, C. Tong, Q. Liu et N. Li, «The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 912-932, 2017.
- [3] M. Rahim, O. Douzane, A. T. Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre et T. Langlet, «Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity,» *Energy and Buildings*, vol. 88, p. 91–99, 2015.
- [4] J. Lazko, B. Dupré, R. M. Dheilily et M. Quéneudec, «Biocomposites based on flax short fibres and linseed oil,» *Industrial crops and products*, vol. 33, pp. 317-324, 2011.
- [5] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos et M. Fois, «Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood,» *Energy and buildings*, vol. 43, n° % 12-3, pp. 491-497, 2011.
- [6] X. Y. Zhou, F. Zheng, H. G. Li et C. L. Lu, «An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers,» *Energy and Buildings*, vol. 42, n° % 17, pp. 1070-1074, 2010.
- [7] S. H. Hens, *Building physics-heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises*, John Wiley & Sons, 2017.
- [8] A. Piot, *Hygrothermique du bâtiment: expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique*, Thèse de doctorat, 2009.
- [9] H. M. Künzeli, *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*, Stuttgart: IRB-Verlag, 1995.
- [10] B. Haba, *Etude in-situ des performances énergétiques et mécaniques des matériaux biosourcés et locaux*, Batna: Thèse de doctorat, 2017.
- [11] C. Rode, R. Peuhkuri, B. Time, K. Svennberg et T. Ojanen, «Moisture buffer value of building materials,» *Journal of ASTM International*, vol. 4, n° % 15, pp. 1-12, 2007.
- [12] F. Collet, *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*, Rennes: Thèse de doctorat, 2004.
- [13] F. Bennai, *Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé*, La Rochelle: Thèse de doctorat, 2017.
- [14] J. F. Daian, *Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau meso et macroporeux: étude expérimentale du mortier de ciment*, Grenoble: Thèse de doctorat, 1986.

- [15] M. Brummer, P. Sáez-Pérez et J. D. Suárez, «Hemp Concrete: A High Performance Material for Green-Building and Retrofitting,» *Urban Next: New York*, 2018. [En ligne]. Available: <https://urbannext.net/hemp-concrete/>.
- [16] A. T. Le, C. Maalouf, T. H. Mai, E. Wurtz et F. Collet, «Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope,» *Energy and buildings*, vol. 42, pp. 1797-1806, 2010.
- [17] B. Moujalled, Y. A. Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, C. Lanos et D. Samri, «Experimental and numerical evaluation of the hygrothermal performance of a hemp lime concrete building: A long term case study,» *Building and Environment*, vol. 136, pp. 11-27, 2018.
- [18] T. Lecompte et A. Le Duigou, «Mechanics of straw bales for building applications,» *Journal of Building Engineering*, vol. 9, pp. 84-90, 2017.
- [19] O. Douzane, G. Promis, J. M. Roucoult, A. D. T. Le et T. Langlet, «Hygrothermal performance of a straw bale building: in situ and laboratory investigations,» *Journal of Building Engineering*, vol. 8, pp. 91-98, 2016.
- [20] B. Belhadj, M. Bederina, Z. Makhloufi, A. Goullieux et M. Quéneudec, «Study of the thermal performances of an exterior wall of barley straw sand concrete in an arid environment,» *Energy and Buildings*, vol. 87, pp. 166-175, 2015.
- [21] C. T. Chao et R. R. Krueger, «The date palm (*Phoenix dactylifera* L.): overview of biology, uses, and cultivation,» *HortScience*, vol. 42, n° 15, pp. 1077-1082, 2007.
- [22] FAO, «FAO Statistics,» FAO, 2016. [En ligne]. Available: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.
- [23] Munier et P, *Le palmier dattier-techniques agricoles et productions tropicales*, Maisonneuve et Larousse, 1973.
- [24] A. Al-Khanbashi, K. Al-Kaabi et A. Hammami, «Date palm fibers as polymeric matrix reinforcement: fiber characterization,» *Polymer composites*, vol. 26, n° 14, pp. 486-497, 2005.
- [25] M. Chikhi, *Métrieologie et modélisation des transferts dans les composites naturels à faible cout pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires*, Batna: Thèse de doctorat, 2013.
- [26] N. Benmansour, *Developpement et caracterisation de composites naturels locaux adaptes a l'isolation thermique dans l'habitat*, Batna: thèse de doctorat, 2015.
- [27] M. Haddadi, B. Agoudjil, N. Benmansour, A. Boudenne et B. Garnier, «Experimental and modeling study of effective thermal conductivity of polymer filled with date palm fibers,» *Polymer Composites*, vol. 38, p. 1712–1719, 2015.
- [28] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche et A. Boudenne, «Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building,» *Energy and Buildings*, vol. 81, p. 98–104, 2014.

- [29] L. C. Rilem, «Functional classification of lightweight concrete,» *Mater. Struct.*, vol. 11, pp. 281-283, 1978.
- [30] N. Chennouf, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti et F. Bouras, «Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers,» *Construction and Building Materials*, vol. 192, p. Construction and Building Materials, 2018.
- [31] B. Haba, B. Agoudjil, A. Boudenne et K. Benzarti, «Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material,» *Construction and Building Materials*, vol. 154, p. 963–971, 2017.
- [32] M. Palumbo, A. M. Lacasta, N. Holcroft, A. Shea et P. Walker, «Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials,» *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 269-275, 2016.
- [33] D. Medjelekh, Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygroscopiques, Thèse de doctorat, 2015.
- [34] C&B, «Etat des lieux des connaissances actuelles sur le Fonctionnement Hygrothermique des matériaux biosourcés,» CONSTRUCTIONS & BIORESSOURCES, MAILLOT, 2012.
- [35] Y. A. Oumeziane, Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre, Doctoral dissertation, 2013.
- [36] D. Lelièvre, Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés, Lorient: Thèse de doctorat, 2015.
- [37] F. Tariku, Whole building heat and moisture analysis, Montréal: Thèse de doctorat, 2008.
- [38] A. T. Le, Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment, Reims: Thèse de doctorat, 2010.

**Chapitre II : Modélisation  
des transferts  
hygrothermiques dans les  
matériaux poreux de  
construction**

## I. Introduction

Le présent chapitre consiste à faire la modélisation des phénomènes de transfert hygrothermique dans les matériaux poreux de construction, et à mettre en évidence les simplifications qui sont souvent apportées par les auteurs sur les modèles. Pour cette raison, le développement des modèles mathématiques va se faire en suivant les deux approches les plus adoptées durant ces deux dernières décennies :

- Approche de Kunzel
- Approche de Mendes

Ensuite, les méthodes numériques de résolution ainsi que les codes de calcul utilisés dans le domaine des matériaux biosourcés seront présentés. Dans la dernière partie de ce chapitre, les modèles développés seront implémentés dans un code de calcul pour réaliser une première validation par rapport à un logiciel commercial.

## II. Etat de l'art sur les modèles hygrothermiques

L'évolution rapide des recherches sur les matériaux poreux de construction a conduit au développement des outils de simulation permettant d'étudier le comportement de ces matériaux dans diverses conditions climatiques et à différentes échelles. Ces outils de simulation permettent de prédire les profils de température et d'humidité relative à l'aide de modèles mathématiques décrivant le transfert de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux. Ces modèles ont été développés à partir des équations de conservation de masse et d'énergie. La différence majeure entre ces modèles réside dans les potentiels de calculs choisis et les hypothèses simplificatrices adoptées.

### II.1.1. Modèle de Phillip et De Vries [1]

L'histoire de l'émergence et du développement des modèles hygrothermiques remonte à la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. En 1957, Phillip et De Vries ont développé un modèle de transfert de chaleur et d'humidité basé sur leur théorie du mouvement d'humidité dans le sol sous des gradients de température. Les potentiels moteurs du transfert sont la teneur en eau volumique  $\theta$  ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ) et la température  $T$  (K). Leur modèle est décrit par les équations de transfert de masse et d'énergie suivantes :

Bilan pour le transfert d'humidité ; où les modes responsables du transfert sont la diffusion de vapeur et de liquide sous gradient de teneur en eau et sous gradient de température :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D_{\theta} \nabla \theta + D_T \nabla T) + \nabla K \quad (\text{II-1})$$

Bilan pour le transfert de chaleur ; où les modes responsables du transfert sont la conduction et le changement de phase :

$$(\rho_0 c_0 + \rho_l c_l \theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + l_v \nabla(D_{\theta,v} \nabla \theta + D_{T,v} \nabla T) \quad (\text{II-2})$$

Où  $D_{\theta}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) et  $D_T$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) sont les coefficients de transfert de masse sous gradients de teneur en eau et de température respectivement et  $D_{\theta,v}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) est le coefficient de transfert de vapeur sous gradient de teneur en eau.  $K$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) est la conductivité hydraulique insaturée.  $\rho_0$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) et  $c_0$  ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) sont respectivement la masse volumique et la capacité thermique du matériau à l'état sec,  $\lambda$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) est la conductivité thermique du matériau,  $c_l$  est la capacité thermique de l'eau et  $l_v$  ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) est la chaleur latente de vaporisation.

### II.1.2. Modèle de Luikov [2]

En 1966, Luikov a développé son propre modèle pour la prédiction du transfert de chaleur et de masse dans les matériaux poreux de construction. Le modèle a été basé sur la thermodynamique des processus irréversibles pour des conditions isothermes et non isothermes. Les potentiels moteurs du transfert sont la teneur en eau massique  $\theta$  ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) et la température  $T$  (K).

Les équations de transfert d'humidité et de chaleur s'écrivent de la manière suivante [3] :

Bilan pour le transfert d'humidité ; où les modes responsables du transfert sont la thermodiffusion et la diffusion de vapeur et de liquide sous gradient de teneur en eau massique :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (D_m \nabla u + \delta_s \nabla T) \quad (\text{II-3})$$



Bilan pour le transfert de chaleur ; où les modes responsables du transfert sont la conduction et le changement de phase :

$$\left(\rho_0 c_{p_0}\right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D_T \nabla T) + l_v \varepsilon \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{II-4})$$

Où  $u$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) est la teneur en eau massique,  $D_m$  ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ) est le coefficient de diffusion de masse isotherme totale (vapeur et liquide),  $\delta_s$  (-) est le coefficient de termodiffusion,  $D_T$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) est le coefficient de diffusion de chaleur (conduction) et  $\varepsilon$  (-) représente le rapport entre le flux de vapeur et le flux massique total.

### II.1.3. Modèle de Kunzel [4]

En 1995, Kunzel a mené une étude approfondie du transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux et il a développé un modèle dédié aux applications dans le bâtiment en se basant sur le modèle de Kießl [5]. Son étude s'appuie sur un grand nombre de travaux expérimentaux dans le but de simplifier les modèles ainsi que la détermination des coefficients de transfert. Kunzel utilise comme potentiels moteurs l'humidité relative  $\varphi$  (-) et la température  $T$  (K). Son modèle est décrit par les équations de transfert d'humidité et de chaleur suivantes, respectivement :

Bilan pour le transfert d'humidité ; où les modes responsables du transfert sont la diffusion de vapeur et la diffusion de liquide :

$$\xi_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla (\delta_p \nabla p_{sat} \varphi + D_{l,\varphi} \nabla \varphi) \quad (\text{II-5})$$

Bilan pour le transfert de chaleur ; où les modes responsables du transfert sont la conduction et le changement de phase :

$$(\rho_0 c_0 + c_l w) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + l_v \nabla (\delta_p \nabla p_{sat} \varphi) \quad (\text{II-6})$$

Où  $\xi_\varphi$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) et la capacité de sorption,  $\delta$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ) est la perméabilité du matériau à la vapeur d'eau,  $D_l$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) est le coefficient de transfert d'eau liquide sous gradient d'humidité relative,  $p_{sat}$  est la pression de saturation en (Pa) et  $w$  est la teneur en eau en ( $\text{kg.m}^{-3}$ ).

#### II.1.4. Modèle de Mendes [6] :

En 1999, Mendes [6] a développé le programme PC Umidus en se basant sur la théorie de Phillip et De Vries pour des applications sur les composants du bâtiment. Ce modèle a pu couvrir certains cas de configurations complexes telles que les murs multicouches. En outre, Mendes a effectué une analyse de sensibilité du modèle développé [7] et il a proposé des sous-modèles à utiliser en cas de manque de données sur les coefficients de transfert. Le modèle est représenté comme suit :

Bilan pour le transfert d'humidité ; où les modes responsables du transfert sont la diffusion de vapeur et de liquide sous gradient de teneur en eau et sous gradient de température :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D_{\theta} \nabla \theta + D_T \nabla T) \quad (\text{II-7})$$

Bilan pour le transfert de chaleur ; où les modes responsables du transfert sont la conduction et le changement de phase :

$$(\rho_0 c_0 + \rho_l c_l \theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + l_v \nabla(D_{\theta, v} \nabla \theta + D_T \nabla T) \quad (\text{II-8})$$

Dans la partie suivante, la modélisation des phénomènes de transfert de chaleur, d'air et d'humidité (HAM : Heat, Air and Moisture) dans les matériaux poreux de construction, sera réalisée étape par étape en suivant deux approches selon les deux modèles les plus utilisés dans le domaine des matériaux biosourcés :

- Approche de Kunzel
- Approche de Mendes

### III. Hypothèses

En raison de la grande complexité des équations qui interviennent lors de la description des transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux, plusieurs hypothèses sont autorisées [8-10]. Ces hypothèses peuvent être résumées dans les points suivants :

- Matériau considéré comme un milieu continu et isotrope (soit un volume de matériau dix fois plus grand de la taille de la plus grande fibre).
- Les trois phases (matériau, air humide, liquide) sont en équilibre thermodynamique.

- L'air humide est considéré comme un mélange de gaz parfaits incompressible ( $\rho_a = \text{constante}$ ).

Ce qui nous permet d'utiliser la loi de Dalton :

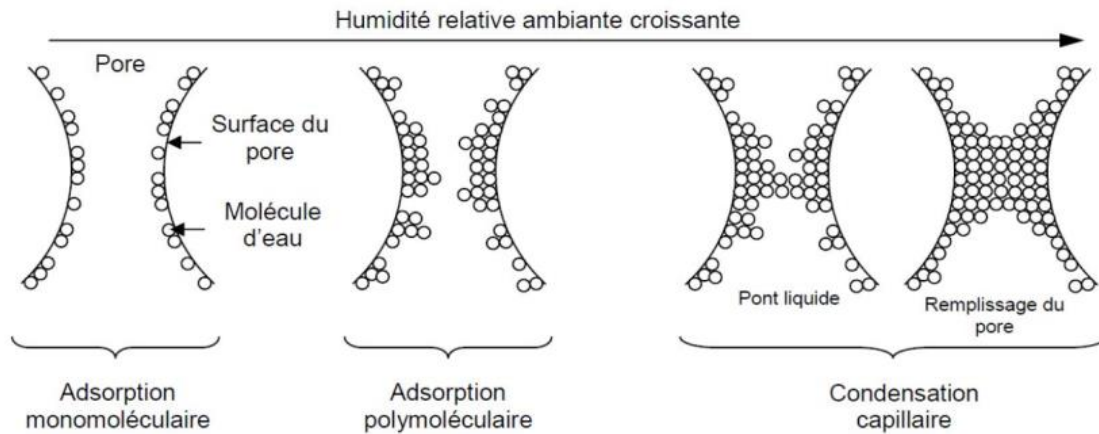
$$\frac{n_v}{n_{tot}} = \frac{p_v}{p_{tot}} \quad (\text{II-9})$$

Où  $n_v$  (mol) est le nombre de moles de l'eau vapeur,  $n_{tot}$  (mol) est le nombre de moles total du mélange,  $p_v$  (Pa) est la pression partielle de vapeur et  $p_{tot}$  (Pa) est la pression totale du mélange.

- Les transferts de chaleur par rayonnement et les réactions chimiques à l'intérieur du matériau sont négligés.
- L'effet de la gravité est négligé.
- L'étude se fait dans un domaine de température supérieur à zéro.
- A noter que les potentiels moteurs des transferts sont : la température  $T$ , l'humidité relative  $\varphi$  (approche de Kunzel) ou la teneur en eau  $\theta$  (approche de Mendes) et la pression totale de l'air  $P_a$ .

#### IV. Transfert de masse

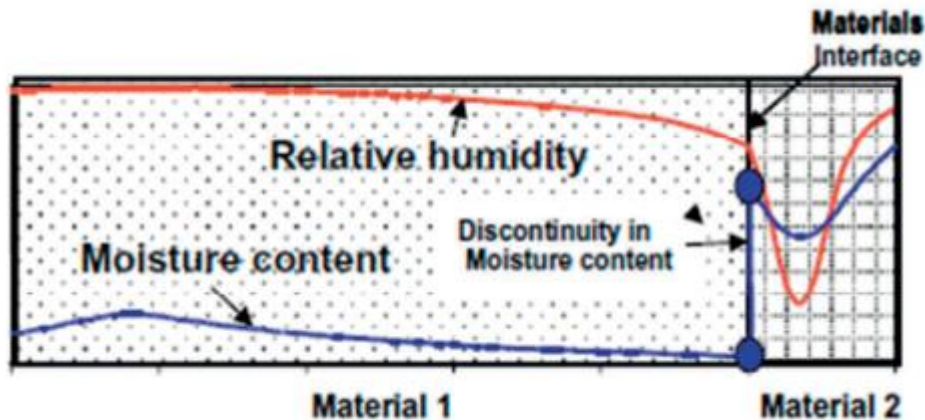
Les matériaux de construction sont caractérisés par une structure fortement poreuse. Ces pores ont la capacité de stocker de l'humidité selon les conditions ambiantes (Figure II-1). Ils représentent le milieu où se passent les phénomènes de transfert d'humidité à l'aide de plusieurs modes tels que la diffusion et l'advection de vapeur, d'air et de liquide.



**Figure II-1.** Schéma représentant l'état hydrique des pores en fonction de l'humidité relative externe [11]

#### IV.1. Transfer d'eau (liquide et vapeur)

Le modèle de Mendes, basé sur le modèle de Phillip et De Vries [1], utilise la teneur en eau comme potentiel moteur du transfert d'humidité. Par contre, Kunzel choisit l'humidité relative en raison de sa continuité aux interfaces (Figure II-2). La différence entre les deux approches dans la description du transfert d'eau (vapeur et liquide) réside dans les phénomènes pris ou pas en compte dans les expressions des flux massiques :



**Figure II-2.** Profils d'humidité relative et de teneur en eau à l'interface entre deux matériaux différents [9]

##### IV.1.1. Approche de Kunzel [4]

Dans son travail, Kunzel met l'accent sur différents phénomènes qui contribuent dans le transfert d'eau dans les trois régions d'humidité (hygroscopique, capillaire et saturation maximale ; définies dans le chapitre I section III.2.5).

### 1.1.1.1 Diffusion de vapeur

La diffusion de la vapeur dans les milieux poreux se fait sous l'effet de deux gradients : de température (thermodiffusion) et de fraction massique (Diffusion de Fick), c'est-à-dire, la densité de flux diffusif de vapeur  $\mathbf{g}_{v,diff}$  est égale à la somme des flux dus aux gradients molaire  $\nabla X_{mol}$  et thermique  $\nabla T$ .

$$\mathbf{g}_{v,diff} = (D_m \nabla X_{mol} + D_T \nabla T) \quad (\text{II-10})$$

$\mathbf{g}_{v,diff}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) : densité de flux diffusif de vapeur,  $D_m$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) : coefficient de diffusion de masse,  $D_T$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) : coefficient de thermodiffusion,  $X_{mol}$  (-) : fraction molaire de la vapeur dans l'air.

En raison des faibles gradients thermiques dans le domaine des bâtiments, le transfert de vapeur par thermodiffusion (effet Soret) est négligeable devant la diffusion de Fick.

En utilisant l'hypothèse de gaz parfait (équation II-9), la densité de flux diffusif de vapeur s'écrit de cette façon :

$$\mathbf{g}_{v,diff} = D_m \nabla \frac{C_v}{C_{tot}} = D_m \nabla \frac{p_v}{p_a} \quad (\text{II-11})$$

$$\mathbf{g}_{v,diff} = -\delta_{v,a} \nabla p_v \quad (\text{II-12})$$

$C_v$  et  $C_{tot}$  ( $\text{mol.m}^{-3}$ ) sont les concentrations molaires.

$\delta_{v,a}$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ) est la perméabilité de l'air à la diffusion de vapeur, elle est exprimée par l'expression suivante :

$$\delta_{v,a} = 2.31 \times 10^{-5} \frac{M_l}{RT} \left( \frac{T}{273.15} \right)^{1.81} \quad (\text{II-13})$$

$M_l$  est la masse molaire de la vapeur ( $M_l = 0,018 \text{ kg.mol}^{-1}$ ) et  $R$  est la constante des gaz parfaits ( $R = 8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

En principe, la diffusion de vapeur se fait dans l'air des pores, cependant la présence de petits pores nous oblige à déterminer un facteur de résistance à la diffusion de vapeur  $\mu$  (-) qui est une caractéristique du matériau :

$$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\delta} \quad (\text{II-14})$$

$\delta$  : la perméabilité du matériau à la diffusion de vapeur.

Le flux de vapeur s'écrit à la fin :

$$\mathbf{g}_{v,diff} = -\frac{\delta_{v,a}}{\mu} \nabla p_v \quad (\text{II-15})$$

### 1.1.1.2 Diffusion d'eau liquide

La diffusion de l'eau sous forme liquide se produit sous l'effet d'un gradient d'humidité relative (la diffusion sous gradient de température est négligeable [4]), ce processus aura lieu essentiellement dans la région capillaire ( $HR > 95\%$ ), mais aussi avant, avec des quantités moins importantes. En se basant sur des travaux expérimentaux, Kunzel [4] propose une loi qui décrit la diffusion d'eau liquide sous gradient d'humidité relative :

La densité de flux diffusif de l'eau liquide  $\mathbf{g}_{l,diff}$  est égale à l'ensemble de phénomènes responsable du transfert du liquide exprimés par le coefficient de transfert  $\mathbf{D}_l$  liés au gradient d'humidité relative  $\nabla \varphi$  :

$$\mathbf{g}_{l,diff} = -\mathbf{D}_l \nabla \varphi \quad (\text{II-16})$$

$\mathbf{g}_{l,diff}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) : densité de flux diffusif de liquide,  $\mathbf{D}_l$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) : coefficient de conduction de liquide sous gradient d'humidité relative et  $\varphi$  (-) : humidité relative.

Le coefficient de diffusion de l'eau liquide  $\mathbf{D}_l$  s'exprime selon la région d'humidité relative (Figure II-3) :

Région hygroscopique ( $0\% < \varphi < 95\%$ )

$$D_{l,\varphi} = P_{sat} \delta_{v,a} \left( \frac{1}{\mu^*(\varphi)} - \frac{1}{\mu} \right) \quad (\text{II-17})$$

Où  $\mu$  (-) et  $\mu^*(\varphi)$  (-) sont les facteurs de résistance à la diffusion de vapeur, dans des conditions sèches et humides respectivement.

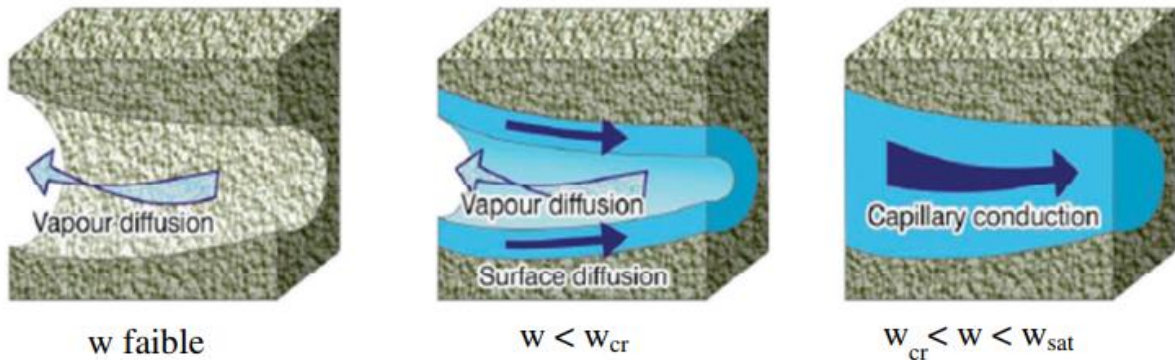
Ce coefficient tient compte à la fois de la diffusion de Fick et la diffusion surfacique.

Région capillaire ( $\varphi > 95\%$ )

$$D_{l,ws} = \left( 3.8 \times \left( \frac{A_c}{W_f} \right)^2 \times 1000^{\frac{w}{w_f} - 1} \right) \xi_\varphi \quad (\text{II-18})$$

Où  $A_c$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-0.5}$ ) est le coefficient d'absorption d'eau liquide,  $W_f$  (ou  $W_{sat}$ ) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) est la teneur en eau de saturation et  $\xi_\varphi$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) est la capacité de sorption (dérivée de la courbe de sorption).

Un autre phénomène est pris en compte par Kunzel dans la région capillaire qui est la redistribution où il estime son coefficient  $D_{l,ww}$  à une puissance décimale sous le coefficient de transfert capillaire  $D_{l,ws}$ .



**Figure II-3.** Mécanismes de transfert de l'eau liquide [9]

#### IV.1.2. Approche de Mendes [6]

Selon l'approche de Mendes, le transfert d'humidité dans les milieux poreux sous gradient de température est important et doit être pris en compte. La diffusion de vapeur et de liquide sont exprimées ensemble dans un même flux sous l'effet d'un gradient de teneur en eau et de température :

$$\mathbf{g}_{eau,diff} = -\mathbf{D}_\theta \nabla \theta - \mathbf{D}_T \nabla T \quad (\text{II-19})$$

$\mathbf{D}_\theta$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) et  $\mathbf{D}_T$  ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) sont la somme des coefficients de vapeur et de liquide :

$$\mathbf{D}_\theta = \mathbf{D}_{\theta,v} + \mathbf{D}_{\theta,l} = \delta P_{sat} \frac{d\varphi}{d\theta} = \frac{\delta P_{sat}}{\xi_\varphi} \quad (\text{II-20})$$

$$\mathbf{D}_T = \mathbf{D}_{T,v} + \mathbf{D}_{T,l} \quad (\text{II-21})$$

$\mathbf{D}_{\theta,v}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) : coefficient de transfert de vapeur sous gradient de teneur en eau,  $\mathbf{D}_{\theta,l}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) : coefficient de transfert de liquide sous gradient de teneur en eau,  $\mathbf{D}_{T,v}$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) : coefficient de transfert de vapeur sous gradient de température,  $\mathbf{D}_{T,l}$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) : coefficient de transfert de liquide sous gradient de température,  $\theta$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) : la teneur en eau volumique,  $\delta$  : la perméabilité du matériau à la diffusion de vapeur,  $P_{sat}$  : la pression de saturation et  $\xi_\varphi$  : Capacité de sorption.

Le transfert de liquide sous gradient thermique est autant faible que l'on considère négligeable devant le transfert de vapeur sous gradient thermique ( $\mathbf{D}_{T,l} \approx \mathbf{0}$ )

$$\mathbf{D}_T = \mathbf{D}_{T,v} + \mathbf{D}_{T,l} \approx \mathbf{D}_{T,v} = \frac{\delta \varphi}{\rho_l} \frac{dP_{sat}}{dT} \quad (\text{II-22})$$

$\rho_l$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) est la masse volumique de l'eau.

La pression de saturation définit la pression à laquelle la vapeur et le liquide sont en équilibre à une température donnée. Elle a pour expression :

$$P_{sat} = e^{(23.5771 - (4042.9/(T-37.58)))} \quad (\text{II-23})$$

T en Kelvin (K)

#### IV.1.3. Sous gradient de pression de succion

Le processus de succion représente la force exercée sur le liquide suite à une baisse de pression due au retrait de l'air de l'espace des pores. La densité de flux diffusif de liquide peut être décrite à l'aide du gradient de pression de succion [12] :



$$\mathbf{g}_{l,diff} = K \nabla p_{suc} \quad (\text{II-24})$$

Où  $\mathbf{g}_{l,diff}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) : densité de flux diffusif de liquide,  $K$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ) : perméabilité du matériau à l'eau liquide et  $P_{suc}$  (Pa) : pression de succion.

#### IV.2. Transfert d'air

De la même façon que la diffusion de vapeur et de liquide, selon la loi de Fick, la diffusion d'air s'exprime comme suit :

$$\mathbf{g}_{air,diff} = -\delta_a \nabla \rho_a \quad (\text{II-25})$$

$\delta_a$  : perméabilité du matériau à la diffusion d'air,  $\rho_a$  : masse volumique de l'air.

La supposition que l'air est un gaz parfait incompressible implique que sa masse volumique est constante ( $\rho_a = cste$ ) :

$$\mathbf{g}_{air,diff} = -\delta_a \nabla \rho_a \approx \mathbf{0} \quad (\text{II-26})$$

Par conséquent, le seul paramètre responsable du transfert d'air est la variation de la pression totale ( $p_a$ ) qui s'exprime à l'aide de la loi de Darcy :

$$\mathbf{g}_{air} = \rho_a \mathbf{v}_a = -\rho_a \frac{k_a}{\mu_a} \nabla p_a \quad (\text{II-27})$$

Avec

$$\mathbf{v}_a = -\frac{k_a}{\mu_a} \nabla p_a \quad (\text{II-28})$$

$k_a$  ( $\text{m}^2$ ) est la perméabilité effective de l'air,  $\mu_a$  (Pa.s) est la viscosité dynamique de l'air et  $p_a$  (Pa) est sa pression totale.

### IV.3. Advection de vapeur

L'écoulement d'air transporte de la vapeur, le flux de vapeur ainsi produit, dépend de la quantité de vapeur présente dans l'air (la fraction massique) et obéit toujours à la loi de Darcy selon la formule suivante [13] :

$$\mathbf{g}_{v,adv} = \rho_a \mathbf{X}_{mass,v} \mathbf{v}_a \quad (\text{II-29})$$

$\mathbf{g}_{v,adv}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) : densité de flux advectif de vapeur,  $\mathbf{v}_a$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) est la vitesse de l'air et  $\mathbf{X}_{mass,v}$  (-) est la fraction massique de la vapeur dans l'air :

$$\mathbf{X}_{mass,v} = \frac{\mathbf{m}_v}{\mathbf{m}_a} \quad (\text{II-30})$$

Où  $\mathbf{m}_v$  (kg) : masse de vapeur,  $\mathbf{m}_a$  (kg) : masse de l'air.

Dans le but de faire apparaître que les potentiels de calcul, on fait intervenir les nombres de moles qui nous permettent d'utiliser la loi de Dalton (équation II-9). Par conséquence,  $\mathbf{X}_{mass,v}$  se développe comme suit :

$$\mathbf{X}_{mass,v} = \frac{\mathbf{m}_v}{\mathbf{m}_a} = \frac{\mathbf{M}_v \mathbf{n}_v}{\mathbf{M}_a \mathbf{n}_a} = \frac{\mathbf{M}_v \mathbf{P}_v}{\mathbf{M}_a \mathbf{P}_a} \quad (\text{II-31})$$

$$\mathbf{X}_v = \frac{\mathbf{M}_v \mathbf{P}_{sat} \varphi}{\mathbf{M}_a \mathbf{P}_a} \quad (\text{II-32})$$

$\mathbf{M}_v$  ( $\text{kg.mol}^{-1}$ ) : masse molaire de la vapeur d'eau,  $\mathbf{n}_v$  (mol) : nombre de moles de vapeur d'eau,  $\mathbf{M}_a$  : masse molaire de l'air,  $\mathbf{n}_a$  : nombre de moles d'air.

Finalement, en remplaçant  $\mathbf{v}_a$  par son expression, le flux de vapeur advecté aura pour expression :

$$\mathbf{g}_{v,adv} = -\rho_a \frac{\mathbf{M}_v \mathbf{P}_{sat} \mathbf{k}_a \varphi}{\mathbf{M}_a \mu_a \mathbf{p}_a} \nabla \mathbf{p}_a \quad (\text{II-33})$$

On note :

$$D_{v,adv} = \rho_a \frac{M_v p_{sat} k_a}{M_a \mu_a} \quad (\text{II-34})$$

$$g_{v,adv} = -D_{v,adv} \frac{\varphi}{p_a} \nabla p_a \quad (\text{II-35})$$

Dans le domaine de la physique des bâtiments, en raison des faibles vitesses d'air ainsi que sa masse volumique qui est négligeable devant celle de l'eau liquide, ce dernier ne se déplace pas avec le mouvement d'air :

$$g_{l,adv} \approx 0 \quad (\text{II-36})$$

## V. Transfert de chaleur

La présence des pores dans le matériau a un effet direct sur sa masse volumique et par conséquent sur sa conductivité thermique qui est le paramètre principal qui détermine la capacité d'isolation du matériau. Le transfert de chaleur dans les matériaux poreux de construction prend place sous plusieurs modes tels que la conductivité, la chaleur sensible, l'advection, le changement de phase ...etc.

### V.1. Conduction

La diffusion de chaleur dans le matériau est exprimée par la loi de Fourier :

$$q_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (\text{II-37})$$

$q_{cond}$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) : densité de flux de chaleur par conduction,  $\lambda$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) : conductivité thermique du matériau et  $T$  (K) est la température.

### V.2. Enthalpie de la masse migrante

Chaque transfert de masse entraîne un transfert de chaleur appelé également chaleur sensible. On envisage deux types de chaleur sensible :

#### V.2.1. Chaleur transportée par diffusion

Les phénomènes de diffusion de vapeur et de liquide sont accompagnés par un transfert de chaleur [13] de la manière suivante :

La densité de flux de chaleur transportée par la diffusion massique est égale à la somme des chaleurs sensibles liées à la diffusion de vapeur et de liquide :

$$\mathbf{q}_{diff} = C_{p_v}(T - T_{ref})\mathbf{g}_{v,diff} + C_{p_l}(T - T_{ref})\mathbf{g}_{l,diff} \quad (\text{II-38})$$

$\mathbf{q}_{diff}$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) : densité de flux de chaleur accompagnant la diffusion massique,  $C_{p_v}$  ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) : capacité thermique de la vapeur d'eau,  $C_{p_l}$  : capacité thermique de l'eau liquide,  $\mathbf{g}_{v,diff}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) : densité de flux diffusif de vapeur,  $\mathbf{g}_{l,diff}$  : densité de flux diffusif de liquide et  $T_{ref}$  (K) est la température de référence.

### V.2.2. Chaleur transportée par advection

L'ensemble de l'écoulement d'air et de vapeur advecté entraîne un transfert de chaleur qui obéit à la même loi [13] :

La densité de flux de chaleur transportée par advection est égale à la somme des chaleurs sensibles liées à l'advection de vapeur et d'air :

$$\mathbf{q}_{adv} = C_{p_a}(T - T_{ref})\mathbf{g}_{a,adv} + C_{p_v}(T - T_{ref})\mathbf{g}_{v,adv} \quad (\text{II-39})$$

$\mathbf{q}_{adv}$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) : densité de flux de chaleur par advection,  $C_{p_a}$  : capacité thermique de l'air,  $\mathbf{g}_{a,adv}$  : densité de flux advectif de l'air,  $\mathbf{g}_{v,adv}$  : densité de flux advectif de la vapeur.

### V.3. Chaleur latente

La chaleur latente est générée ou absorbée lors de la transition entre les phases liquide et gazeuse, elle est égale d'après [4, 13] au flux de vapeur multiplié par la chaleur latente de vaporisation :

$$\mathbf{S} = l_v \nabla \mathbf{g}_{v,tot} \quad (\text{II-40})$$

$\mathbf{S}$  ( $\text{J.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$ ) : terme source,  $l_v$  ( $\text{J.kg}^{-1}$ ) : chaleur latente de vaporisation,  $\mathbf{g}_{v,tot}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) : densité de flux de vapeur total.

## VI. Equations de conservation

Dans cette partie, un modèle global sera établi pour chaque approche (Kunzel et Mendes), en prenant en considération tous les phénomènes formulés précédemment et toutes les variations possibles (dépendance des isothermes de sorption de la température, dépendance de l'enthalpie de l'humidité relative (ou de la teneur en eau) ...etc.). Les termes de diffusion de vapeur et de liquide ainsi que la chaleur latente vont être exprimés selon les deux approches introduites au début, dont chaque approche utilise ses propres potentiels de calcul.

Les modèles décrivant le transfert de chaleur et de masse se basent sur le même principe qui est le concept de conservation, représenté par l'équation de continuité, sous forme différentielle, suivante :

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -\nabla(\mathbf{g}) + \mathbf{S} \quad (\text{II-41})$$

$\frac{\partial \psi}{\partial t}$  : Terme instationnaire,  $\psi$  : la quantité physique par unité de volume,  $-\nabla(\mathbf{g})$  : Terme de transport ;  $\mathbf{g}$  : la densité de flux de la quantité physique  $\psi$ ,  $\mathbf{S}$  : Terme source (par unité de volume).

### VI.1. Equation de conservation de masse de l'eau (vapeur et liquide)

#### VI.1.1. Approche de Kunzel

La quantité physique  $\psi$  dans cette partie représente la teneur massique en eau par unité de volume ( $\text{kg m}^{-3}$ ) :

$$\psi = w \quad (\text{II-42})$$

##### 1.1.1.3 Terme instationnaire

Kunzel utilise l'humidité relative comme potentiel de calcul du transfert d'humidité en raison de sa continuité aux interfaces Matériau/Air, Matériau/Enduit...etc.

A cet effet, le terme instationnaire se développe de la manière suivante afin de faire apparaître les potentiels de calcul :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} \frac{d\varphi}{d\varphi} + \frac{\partial w}{\partial t} \frac{dT}{dT} = \frac{dw}{d\varphi} \Big|_T \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{dw}{dT} \Big|_{\varphi} \frac{\partial T}{\partial t} = \xi_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \xi_T \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II-43})$$

$\xi_{\varphi}$  et  $\xi_T$  sont obtenus en dérivant la courbe de sorption du matériau par rapport à l'humidité relative et à la température respectivement,

#### 1.1.1.4 Terme de transport

On regroupe les expressions des densités de flux de vapeur et de liquide développées précédemment, la densité de flux de masse totale égale à la somme des densités de flux diffusif et advectif de vapeur et d'eau liquide :

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}_{v,diff} + \mathbf{g}_{v,adv} + \mathbf{g}_{l,diff} \quad (\text{II-44})$$

$$\mathbf{g} = -\delta \nabla p_{sat} \varphi - D_{l,\varphi} \nabla \varphi - D_{adv,v} \varphi \nabla p_t \quad (\text{II-45})$$

#### 1.1.1.5 Terme source

Dans le matériau, il peut y avoir des phénomènes de condensation/évaporation d'eau. L'évaporation d'eau liquide représente la source de vapeur. Dans le bilan global, ceci se traduit par des termes source qui s'annulent :

$$\mathbf{S}_{vap} = -\mathbf{S}_{liq} \quad (\text{II-46})$$

$$\mathbf{S}_{eau} = \mathbf{S}_{vap} + \mathbf{S}_{liq} = \mathbf{0} \quad (\text{II-47})$$

$\mathbf{S}_{vap}$ ,  $\mathbf{S}_{liq}$  et  $\mathbf{S}_{eau}$  ( $\text{J.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$ ) sont les termes source de vapeur, du liquide et total de l'eau respectivement.

#### 1.1.1.6 Bilan global de la masse d'eau

On regroupe les termes : instationnaire, transport et le terme source en remplaçant par l'expression de chaque terme, on obtient :

$$\xi_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \xi_T \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{\delta_a}{\mu} \nabla p_{sat} \varphi + D_{l,\varphi} \nabla \varphi + D_{adv,v} \varphi \nabla p_t \right) \quad (\text{II-48})$$

### VI.1.2. Approche de Mendes

La quantité physique  $\psi$  dans cette partie représente la teneur en eau volumique ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) :

$$\psi = \theta \quad (\text{II-49})$$

#### 1.1.1.7 Terme instationnaire

Cette approche utilise la teneur en eau volumique comme potentiel de calcul pour le transfert d'humidité et le terme instationnaire s'exprime comme suit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{II-50})$$

#### 1.1.1.8 Terme de transport

De la même manière que l'approche de Kunzel, les densités de flux massique sont additionnées pour avoir la densité de flux total :

$$\mathbf{g} = -D_\theta \nabla \theta - D_T \nabla T \quad (\text{II-51})$$

#### 1.1.1.9 Bilan global de la masse d'eau

Finalement, on obtient l'équation de conservation pour l'eau :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (D_\theta \nabla \theta + D_T \nabla T) \quad (\text{II-52})$$

## VI.2. Equation de conservation pour l'air

### VI.2.1. Terme instationnaire

L'air est considéré incompressible par les hypothèses :

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = 0 \quad (\text{II-53})$$

### VI.2.2. Terme transport

Le terme transport pour l'air se traduit par la densité de flux lié à la variation de la pression totale développée précédemment :

$$\mathbf{g} = -\rho_a \frac{k_a}{\mu_a} \nabla p_a \quad (\text{II-54})$$

### VI.2.3. Terme source

Le terme source pour l'air est nul comme aucune source ou puit d'air ne sont considérés.

### VI.2.4. Bilan global de la masse d'air

Finalement, le seul terme qui décrit le transfert d'air est le terme transport :

$$\nabla \left( \rho_a \frac{k_g}{\mu_g} \nabla p_{tot} \right) = 0 \quad (\text{II-55})$$

## VI.3. Equation de conservation pour la chaleur

L'échange d'énergie sous forme de chaleur dans un matériau s'exprime par l'enthalpie. La quantité physique  $\psi$  dans ce cas représente l'enthalpie du système :

$$\psi = H \quad (\text{II-56})$$

$H$  ( $\text{J.m}^{-3}$ ) : enthalpie du matériau.

### VI.3.1. Terme instationnaire

L'enthalpie du système est définie comme étant la somme des enthalpies de ses composants, dans notre cas elle est égale à la somme de l'enthalpie du matériau à l'état sec plus l'enthalpie de l'eau :

$$H = H_0 + H_l \quad (\text{II-57})$$

Où  $H_0$  et  $H_l$  sont l'enthalpie du matériau à l'état sec et l'enthalpie de l'eau respectivement définies comme suit :

$$H_0 = \rho_0 C_0 (T - T_{ref}) \quad (\text{II-58})$$



$$H_l = wC_l(T - T_{ref}) \quad (\text{II-59})$$

$\rho_0$  et  $C_0$  sont la masse volumique et la capacité thermique du matériau à l'état sec respectivement.  $w$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) est la teneur en eau du matériau.  $C_l$  est la capacité thermique de l'eau et  $T_{ref}$  est la température de référence.

Quand on considère l'humidité relative comme potentiel moteur du transfert d'humidité (le cas de l'approche de Kunzel), le terme instationnaire  $\frac{\partial H}{\partial t}$  se développe mathématiquement de la manière suivante :

Il est égal aux dérivées par rapport aux potentiels de calcul  $T$  et  $\varphi$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial T} \Big|_{\varphi} \frac{dT}{dt} + \frac{dH}{d\varphi} \Big|_T \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{II-60})$$

La dérivée de l'enthalpie par rapport à la température ( $\frac{\partial H}{\partial T} \Big|_{\varphi}$  dans l'équation II-60) est égale à :

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial T} \Big|_{\varphi} &= \frac{\partial (H_0 + H_l)}{\partial T} \Big|_{\varphi} = \frac{\partial (\rho_0 C_0 (T - T_{ref}) + w C_l (T - T_{ref}))}{\partial T} \Big|_{\varphi} \\ &= \rho_0 C_0 + w C_l + C_l (T - T_{ref}) \frac{\partial w}{\partial T} \Big|_{\varphi} \end{aligned} \quad (\text{II-61})$$

La dérivée de l'enthalpie par rapport à l'humidité relative ( $\frac{dH}{d\varphi} \Big|_T$  dans l'équation II-60) est égale à :

$$\frac{dH}{d\varphi} \Big|_T = \frac{\partial (H_0 + H_l)}{\partial \varphi} \Big|_T = \frac{\partial (\rho_0 C_0 (T - T_{ref}) + w C_l (T - T_{ref}))}{\partial \varphi} \Big|_T \quad (\text{II-62})$$

$$= C_l (T - T_{ref}) \frac{dw}{d\varphi} \Big|_T \quad (\text{II-63})$$

Pour avoir à la fin :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \left[ \rho_0 c_0 + w c_l + c_l (T - T_{ref}) \frac{\partial w}{\partial T} \right]_{\varphi} \frac{dT}{dt} + c_l (T - T_{ref}) \frac{dw}{d\varphi} \Big|_T \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{II-64})$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = [\rho_0 c_0 + c_l (w + (T - T_{ref}) \xi_T)] \frac{dT}{dt} + [c_l ((T - T_{ref}) \xi_{\varphi})] \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{II-65})$$

L'équation (II-65) représente le développement du terme instationnaire de l'équation de la chaleur où figurent les potentiels de calcul  $T$  et  $\varphi$ .

Quand il s'agit de la teneur en eau volumique comme grandeur moteur du transfert d'humidité (approche de Mendes) on aura de la même manière le terme instationnaire suivant :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial T} \Big|_{\theta} \frac{dT}{dt} + \frac{dH}{d\theta} \Big|_T \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II-66})$$

$\frac{\partial H}{\partial T} \Big|_{\theta}$  donne le même résultat que  $\frac{\partial H}{\partial T} \Big|_{\varphi}$  (il suffit de remplacer  $w$  par  $\rho_l \theta$ ), et  $\frac{dH}{d\theta} \Big|_T$  donne

l'équation suivante :

$$\frac{dH}{d\theta} \Big|_T = \frac{\partial (H_0 + H_l)}{\partial \theta} \Big|_T = \frac{\partial (\rho_0 c_0 (T - T_{ref}) + w c_l (T - T_{ref}))}{\partial \theta} \Big|_T \quad (\text{II-67})$$

$$= c_l (T - T_0) \frac{dw}{d\theta} \Big|_T \quad (\text{II-68})$$

Pour avoir à la fin :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = [\rho_0 c_0 + c_l (\rho_l \theta + (T - T_{ref}) \xi_T)] \frac{dT}{dt} + \left[ c_l (T - T_{ref}) \frac{dw}{d\theta} \Big|_T \right] \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II-69})$$

Equation II-69 représente le terme instationnaire développé selon l'approche de Mendes où la teneur en eau volumique  $\theta$  remplace l'humidité relative  $\varphi$ .

### VI.3.2. Bilan selon l'approche de Kunzel

On rappelle des expressions des densités de flux et du terme source du transfert de chaleur développées selon l'approche de Kunzel dans la section IV :

## 1.1.1.10 Terme transport

$$\mathbf{g} = \mathbf{q}_{cond} + \mathbf{q}_{adv} + \mathbf{q}_{diff} \quad (\text{II-70})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{g} = & -\lambda \nabla T + C_a(T - T_{ref})\mathbf{g}_{a,adv} + C_v(T - T_{ref})\mathbf{g}_{v,adv} \\ & + C_v(T - T_{ref})\mathbf{g}_{v,diff} + C_l(T - T_{ref})\mathbf{g}_{l,diff} \end{aligned} \quad (\text{II-71})$$

## 1.1.1.11 Terme source

$$\mathbf{S} = -l_v \nabla \mathbf{g}_{v,tot} \quad (\text{II-72})$$

## 1.1.1.12 Bilan global de chaleur

En les regroupant avec le terme instationnaire développé dans cette partie, on aura l'équation finale de la chaleur selon l'approche de kunzel :

$$\begin{aligned} & [\rho_0 c_0 + c_l(\mathbf{w} + (T - T_{ref})\xi_T)] \frac{dT}{dt} + [c_l((T - T_{ref})\xi_\varphi)] \frac{d\varphi}{dt} = \\ & -\nabla[-\lambda \nabla T + C_a(T - T_{ref})\mathbf{g}_{a,adv} + C_v(T - T_{ref})\mathbf{g}_{v,adv} + C_v(T - T_{ref})\mathbf{g}_{v,diff} \\ & + C_l(T - T_{ref})\mathbf{g}_{l,diff}] + l_v \nabla \mathbf{g}_{v,tot} \end{aligned} \quad (\text{II-73})$$

## VI.3.3. Bilan selon l'approche de Mendes

On rappelle des expressions des densités de flux et du terme source du transfert de chaleur développées selon l'approche de Mendes dans la section IV :

Terme transport

$$\mathbf{g} = -\lambda \nabla T + C_a(T - T_{ref})\mathbf{g}_{a,adv} + C_v(T - T_{ref})\mathbf{g}_{v,adv} \quad (\text{II-74})$$

## 1.1.1.13 Terme source

$$\mathbf{S} = -l_v \nabla \mathbf{g}_{v,tot} \quad (\text{II-75})$$

## 1.1.1.14 Bilan global

En les regroupant avec le terme instationnaire développé dans cette partie, on aura l'équation finale de la chaleur selon l'approche de Mendes :

$$\begin{aligned} & [\rho_0 c_0 + c_l(\rho_l \theta + (T - T_{ref}) \xi_T)] \frac{dT}{dt} + \left[ c_l (T - T_{ref}) \frac{dw}{d\theta} \Big|_T \right] \frac{d\theta}{dt} = \\ & -\nabla(-\lambda \nabla T + C_a (T - T_{ref}) \mathbf{g}_{a,adv} + C_v (T - T_{ref}) \mathbf{g}_{v,adv}) + l_v \nabla \mathbf{g}_{v,tot} \quad (\text{II-76}) \end{aligned}$$

#### VI.4. Modèles simplifiés

Les chercheurs effectuent souvent des simplifications supplémentaires justifiées. Le transfert d'air est souvent négligé en raison des faibles gradients de pression totale et par conséquent les termes d'advection de vapeur et de chaleur disparaissent. De plus, les courbes isothermes de sorption sont considérées indépendantes de la température. Ces simplifications permettent d'écrire les modèles de base suivants :

Modèle de Kunzel [4] :

Bilan pour le transfert d'humidité ; où les modes responsables du transfert sont la diffusion de vapeur et la diffusion de liquide :

$$\xi_\varphi \frac{d\varphi}{dt} = \nabla(\delta_p \nabla p_{sat} \varphi + D_{l,\varphi} \nabla \varphi) \quad (\text{II-77})$$

Bilan pour le transfert de chaleur ; où les modes responsables du transfert sont la conduction et le changement de phase :

$$(\rho_0 c_0 + c_l w) \frac{dT}{dt} = \nabla(\lambda \nabla T) + l_v \nabla(\delta_p \nabla p_{sat} \varphi) \quad (\text{II-78})$$

Modèle de Mendes [6] :

Bilan pour le transfert d'humidité ; où les modes responsables du transfert sont la diffusion de vapeur et de liquide sous gradient de teneur en eau et sous gradient de température :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D_\theta \nabla \theta + D_T \nabla T) \quad (\text{II-79})$$

Bilan pour le transfert de chaleur ; où les modes responsables du transfert sont la conduction et le changement de phase :

$$(\rho_0 c_0 + \rho_l c_l \theta) \frac{dT}{dt} = \nabla(\lambda \nabla T) + l_v \nabla(D_{\theta,v} \nabla \theta + D_T \nabla T) \quad (\text{II-80})$$

## VII. Méthodes de résolution numérique

De nombreuses méthodes et outils numériques ont été utilisés ces dernières années pour résoudre les systèmes d'équations précédents afin de déterminer les profils de température et d'humidité relative nécessaires pour décrire le comportement des matériaux de construction. Ces profils vont servir pour évaluer l'inertie thermique et hydrique, le confort hygrothermique, la consommation énergétique, etc. offerts par les enveloppes construites avec ces matériaux.

### VII.1.1. Wufi®

Le logiciel WUFI [14], qui est disponible commercialement pour PC, a été développé et validé par l'Institut Fraunhofer de physique des bâtiments en Allemagne. Le modèle bien établi de WUFI (basé sur le modèle de Kunzel) utilise deux équations couplées ; une pour le transport d'humidité (Eq II-81) et l'autre pour le transfert de chaleur (Eq II-82). Elles sont résolues simultanément et numériquement en utilisant une méthode de discrétisation implicite des volumes finis avec un algorithme à matrice tridiagonale (connu sous le nom d'algorithme de Thomas).

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{l,\varphi} \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (\text{II-81})$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + l_v \nabla \cdot (\delta_p (\varphi p_{sat})) \quad (\text{II-82})$$

Ce logiciel permet le calcul des conditions climatiques internes transitoires et des pertes de chaleur par la combinaison de la simulation énergétique globale d'un bâtiment avec le calcul des transferts hygrothermiques au niveau des composants.

### VII.1.2. COMSOL Multiphysics®

L'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics dans l'étude hygrothermique se base sur la résolution numérique des équations différentielles par la méthode des éléments finis.

L'avantage de ce logiciel réside dans sa grande flexibilité dans le traitement des équations qui peuvent être introduites librement à travers le module « PDE modes » contrairement à la majorité des logiciels habituels qui n'ont pas cette possibilité de modification des équations de transfert, il permet également la résolution des problèmes 1D, 2D et 3D avec efficacité.

De plus, COMSOL consiste en simulations multiphysiques (la possibilité de traiter deux problèmes ensemble, *e.g.* transfert thermique et transfert massique) et la capacité à se relier à l'environnement Matlab pour un traitement plus approfondi des résultats.

### VII.1.3. Matlab®

Matlab est un langage et un environnement de calcul numérique et de développement d'algorithmes dédié aux applications scientifiques. La résolution des problèmes hygrothermiques par méthodes numériques avec Matlab exige un processus long par rapport aux autres logiciels de simulation. Cela nécessite l'écriture d'un algorithme en partant de la discrétisation du système d'équations à l'aide d'une méthode numérique, ensuite la résolution de la forme matricielle linéaire du système en définissant les conditions aux limites et en spécifiant les critères de convergence [9].

Finalement, Matlab offre plus de liberté dans la manipulation du modèle et sa résolution. Par contre cela nécessite beaucoup plus d'efforts et du temps par rapport à la résolution avec les autres logiciels, ce qui augmente le risque de commettre des erreurs dans la programmation. Un autre avantage de Matlab est qu'il peut être combiné avec plusieurs logiciels tel que COMSOL et TRNSYS.

### VII.1.4. SPARK®

SPARK (Simulation Problem Analysis and Research Kernel) est un environnement de simulation permettant de résoudre efficacement des systèmes d'équations différentielles [15]. SPARK a été développé par le « Simulation Research Group » au Lawrence Berkeley National Laboratory. La description d'un problème pour la résolution avec SPARK commence par le décomposer de manière orientée objet. Cela signifie de penser au problème en termes de ses composants. Chaque composant est représenté par un objet SPARK qui contient le modèle mathématique du composant spécifique. Comme il peut y avoir plusieurs composants du même type, les modèles d'objet SPARK, les équations ou le groupe d'équations, sont définis d'une manière générique appelée classes. Les classes servent de modèles pour n'importe quel nombre

d'objets requis pour formuler l'ensemble du problème. Le modèle du problème est ensuite complété en reliant les objets entre eux. En utilisant les techniques théoriques des graphes, SPARK réduit la taille du système d'équations et utilise une méthode itérative de Newton-Raphson pour résoudre le système réduit et après convergence, il résout pour les inconnus restants.

#### VII.1.5. TRNSYS®

TRNSYS est un programme de simulation des systèmes transitoires avec une structure modulaire qui a été conçu pour résoudre des problèmes complexes des systèmes énergétiques en décomposant le problème en une série de composants plus petits [16].

Le moteur de simulation résout le système d'équations algébriques et différentielles qui représentent l'ensemble du système physique (composants du système de ventilation HVAC, bilan thermique de l'enveloppe du bâtiment et le réseau d'air).

La nature modulaire de TRNSYS facilite l'ajout de nouveaux modèles mathématiques au programme. De plus, le programme permet d'intégrer directement des composants mis en œuvre à l'aide d'autres logiciels (*e.g.* Matlab/Simulink).

### VIII. Implémentation et validation

#### VIII.1. Implémentation sous COMSOL

Pour résoudre notre problème, les modèles développés sont implémentés dans le logiciel COMSOL Multiphysics version 3.5a [17]. Ce logiciel offre de grandes flexibilité et efficacité à traiter les problèmes numériques (systèmes couplés d'équations différentielles aux dérivées partielles) en se basant sur la méthode des éléments finis. L'utilisateur peut également changer les propriétés des matériaux à étudier, utiliser des conditions aux limites réelles (à partir d'un fichier externe), introduire des phénomènes supplémentaires (*e.g.* effet d'hystérésis), visualiser l'évolution de la solution en fonction des paramètres souhaités... etc.

Afin de résoudre les problèmes mathématiques, COMSOL offre un module appelé « Modes EDP » qui comprend plusieurs types d'équations selon la nature du problème étudié. Dans notre cas, « EDP, forme de coefficients » est utilisée en précisant que c'est une analyse temporelle (pour inclure les dérivées par rapport au temps) et en indiquant les inconnus de notre système

( $T$  et  $\varphi$  ou  $T$  et  $\theta$  selon le modèle étudié), le logiciel va associer une équation à chaque inconnu (Figure II-4).

La forme d'équation choisie est décrite de la manière suivante :

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + a u = f \quad (\text{II-83})$$

Cette équation décrit le transfert et le stockage d'une quantité physique dans un domaine spécifique, Où  $e_a$  : coefficient de masse,  $d_a$  : coefficient d'amortissement/masse,  $c$  : coefficient de diffusion,  $\alpha$  : coefficient flux convectif conservatif,  $\gamma$  : terme source flux conservatif,  $\beta$  : coefficient de convection,  $a$  : coefficient d'absorption,  $f$  : terme source.

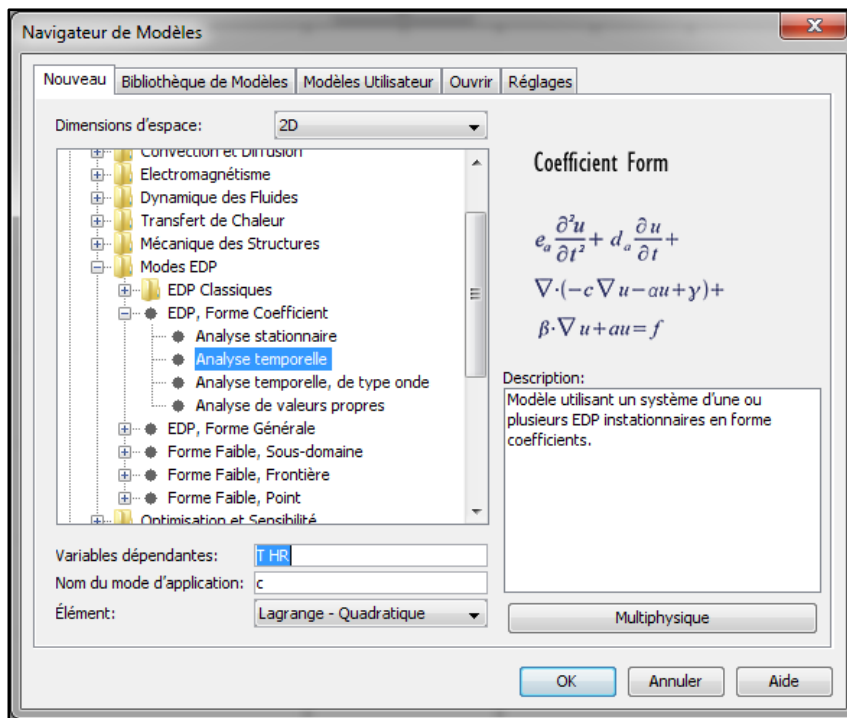


Figure II-4. Choix du module approprié dans COMSOL

Pour introduire nos modèles il faut les écrire sous forme matricielle, puis les coefficients  $e_a$ ,  $d_a$ ,  $c$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $a$  et  $f$  sont déterminés par identification pour chaque inconnu en les introduisant par la suite dans le logiciel (Figure II-5).

Les conditions aux limites sont introduites dans une autre fenêtre (Figure II-6) ou on spécifie le type (Newman ou Dirichlet) et on définit les coefficients nécessaires.



Pour introduire les propriétés du matériau ainsi que les conditions climatiques variables, il suffit de les définir comme des fonctions en précisant le nom qui va être écrit par la suite dans les conditions aux limites (Figure II-7). Comme on peut le voir, cette option nous offre plusieurs types de fonctions pour les conditions climatiques, soit analytiques ou sous forme d'un tableau ou d'un fichier texte ce qui permet d'introduire des conditions issues de l'expérimental ou des données climatiques réelles d'une ville ou d'une région.

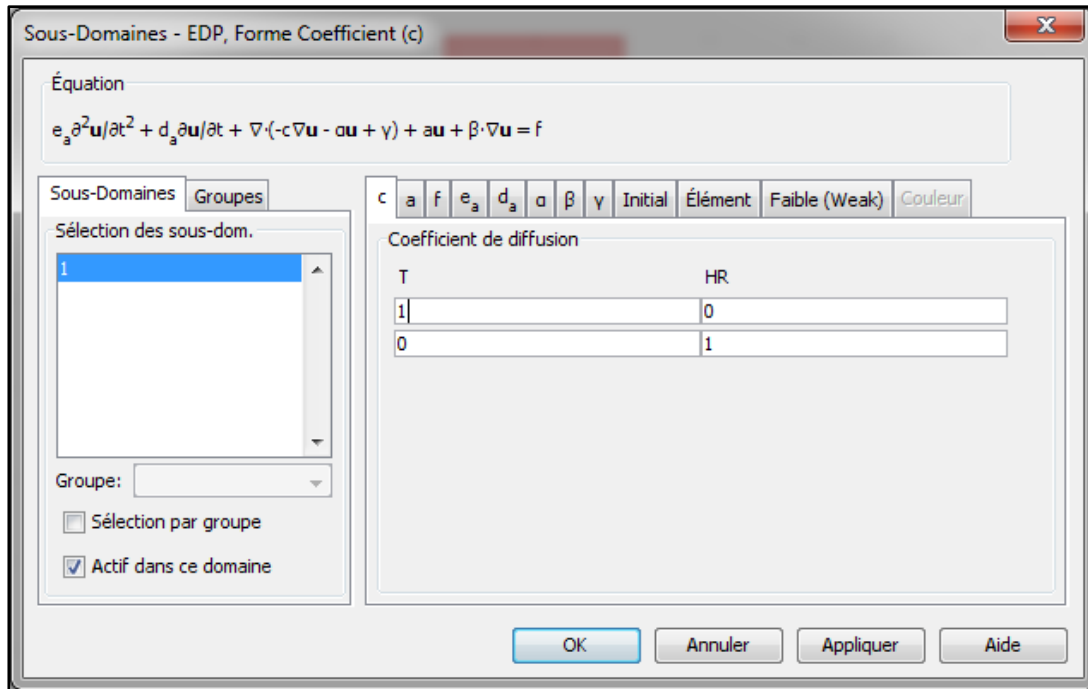


Figure II-5. Définition des coefficients du système d'équation

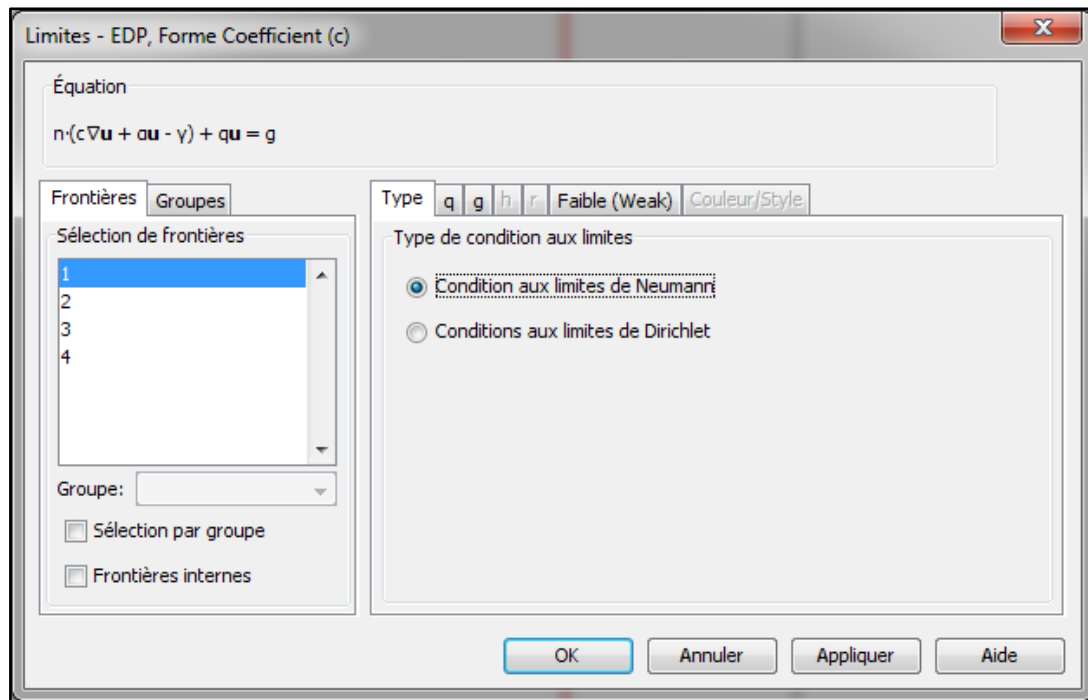


Figure II-6. Définition des conditions aux limites

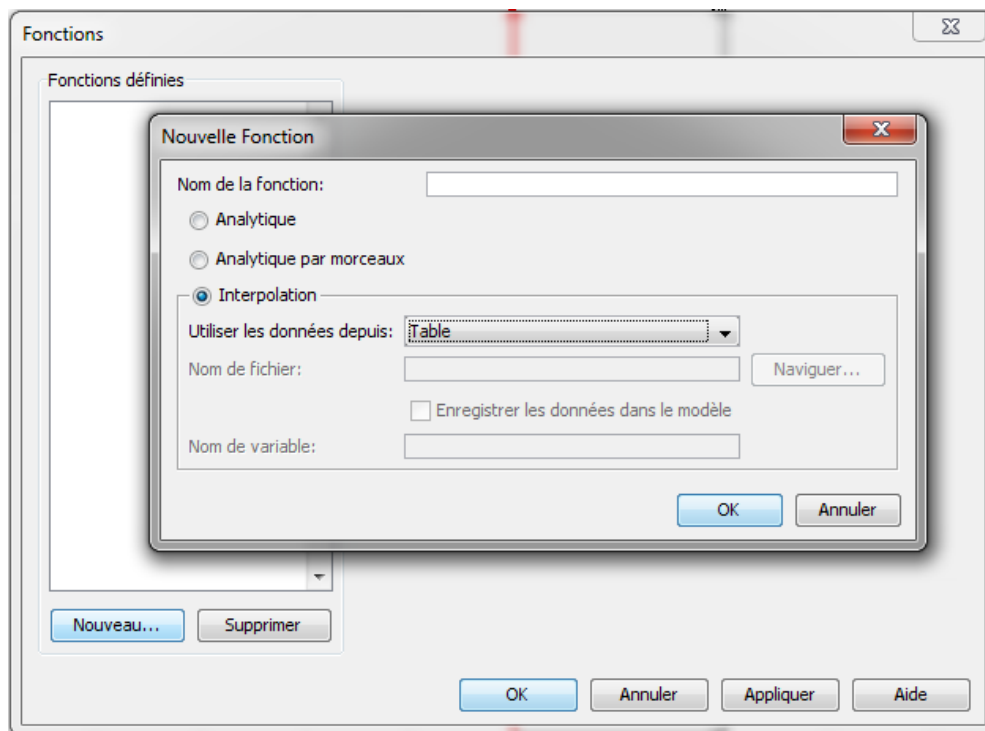


Figure II-7. Définition des propriétés du matériau et les conditions climatiques

## VIII.2. Validation (Alioua *et al.* [18])

### VIII.2.1. Principe de l'étude

Afin de vérifier l'exactitude de notre implémentation et d'effectuer une validation des modèles développés, on réalise deux tests de transfert de chaleur et d'humidité (scénarios 1 et 2, figure II-8) avec les modèles implémentés sur COMSOL (Kunzel et Mendes). En parallèle, on réalise les mêmes tests à l'aide du logiciel Wufi, un logiciel de simulation des transferts hygrothermiques dans les enveloppes des bâtiments basé sur le modèle de Kunzel. Ce logiciel a été déjà validé avec des données expérimentales par le fabricant et d'autres travaux [19, 20]. Enfin, on compare les profils de température et d'humidité relative obtenus à différentes profondeurs par les deux modèles à l'aide du logiciel COMSOL avec ceux obtenus par Wufi et on discute les différences obtenues (Schéma sur la figure II-8).

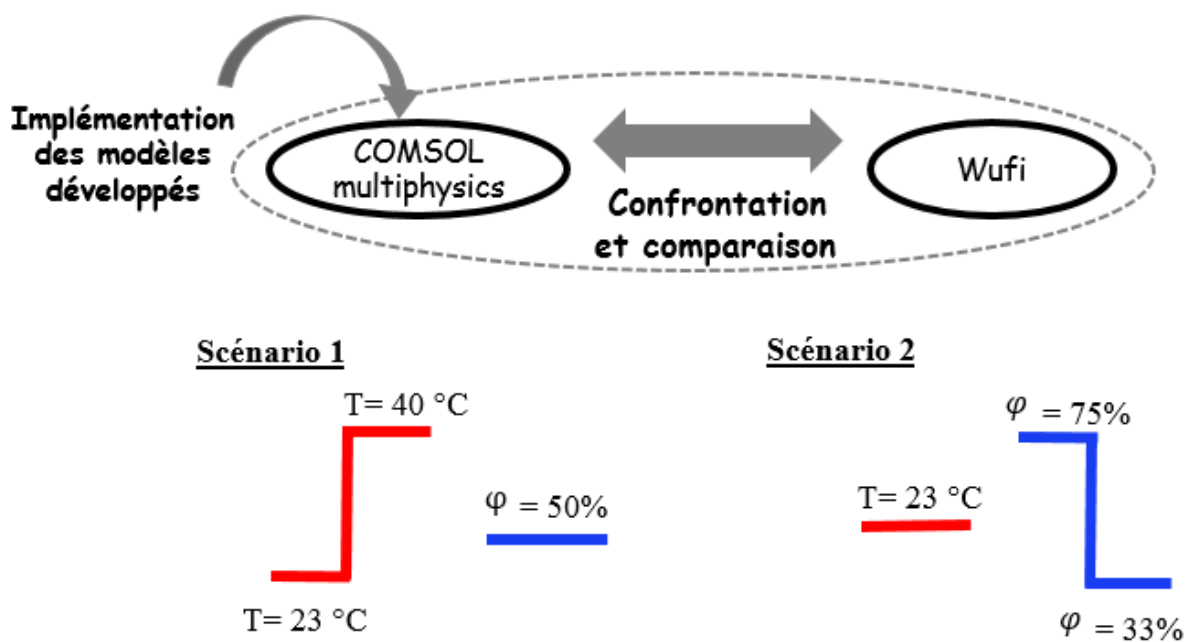


Figure II-8. Principe de l'étude de validation et les scénarios étudiés

### VIII.2.2. Conditions aux limites

Aux frontières du domaine étudié, nous avons considéré le cas des flux de chaleur et d'humidité aux limites sans rajouter d'autres paramètres supplémentaires (pluie, rayonnement, etc.) [4]:

Flux de chaleur aux limites :

$$Q_{\Omega} = h(T_{\Omega} - T_{amb}) \quad (\text{II-84})$$

Où  $T_{\Omega}$  et  $T_{amb}$  en (K) sont les températures de surface et de l'environnement extérieur respectivement et  $h$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) est le coefficient d'échange thermique aux limites.

$h$  prend en compte à la fois le rayonnement et la convection par la relation suivante :

$$h = h_r + h_c \quad (\text{II-85})$$

Où  $h_r$  et  $h_c$  en ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) sont les coefficients d'échange thermique aux frontières par rayonnement et par convection respectivement.

Flux d'humidité aux limites :

$$G_{\Omega} = \beta(P_{v,\Omega} - P_{v,amb}) \quad (\text{II-86})$$

Où  $P_{v,\Omega}$  et  $P_{v,amb}$  en (Pa) sont les pressions de vapeur à la surface et de l'environnement extérieur respectivement. Le coefficient de transfert de vapeur d'eau aux limites  $\beta$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ) est défini comme suit [4] :

$$\beta = 7.10^{-9}.h_c \quad (\text{II-87})$$

Où  $h_c$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) est le coefficient d'échange convectif.

### VIII.2.3. Matériau de l'étude

Le matériau choisi pour cette étude est le béton C12/15 dont les propriétés sont obtenues de la base de données du logiciel Wufi et elles sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II-1 : Propriétés du béton C12/15 [14]

Propriété	Valeur	Propriété	Valeur
Masse volumique à l'état sec [kg.m <sup>-3</sup> ]	2200	Capacité thermique à l'état sec [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	850
Conductivité thermique à l'état sec [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	1.6	Supplément d'humidité de la conductivité thermique [-]	8
Facteur de résistance à la vapeur d'eau (Coupelle sèche) [-]	92		

Dans cette partie, la conductivité thermique dépend de la teneur en eau selon la formule (I-1).

La courbe de sorption pour le béton C12/15 est présentée dans la figure II-9, elle a été obtenue à une température de 23 °C.

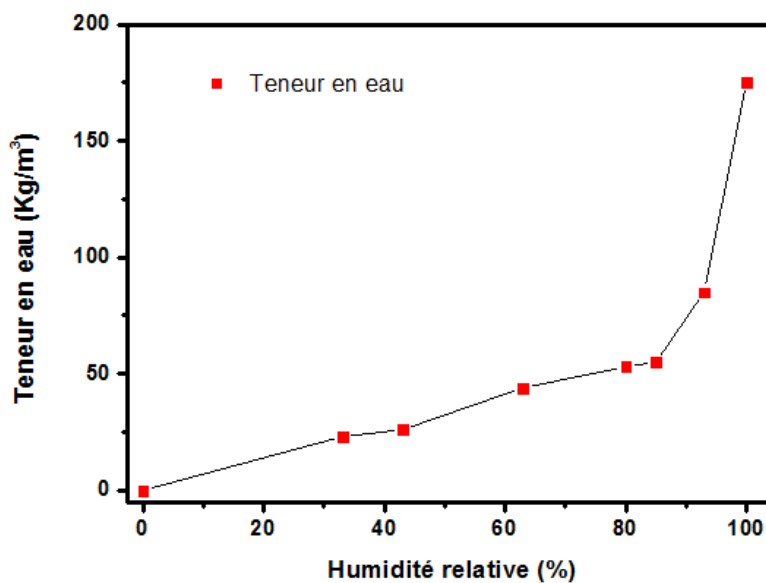


Figure II-9. Courbe d'adsorption pour le béton C12/15 [14]

#### VIII.2.4. Simulation et résultats

Un mur de 15 cm d'épaisseur en béton C12/15 a été simulé dans chaque logiciel où deux scénarios sont appliqués à la surface externe des murs tandis que la surface interne a été maintenues à des conditions ambiantes (Figure II-10).

Les valeurs initiales ont été définies comme suit :  $T = 23\text{ °C}$ ,  $\varphi = 50\%$  (ce qui correspond à une teneur en eau de  $w_0 = 32.3\text{ kg.m}^{-3}$ ).

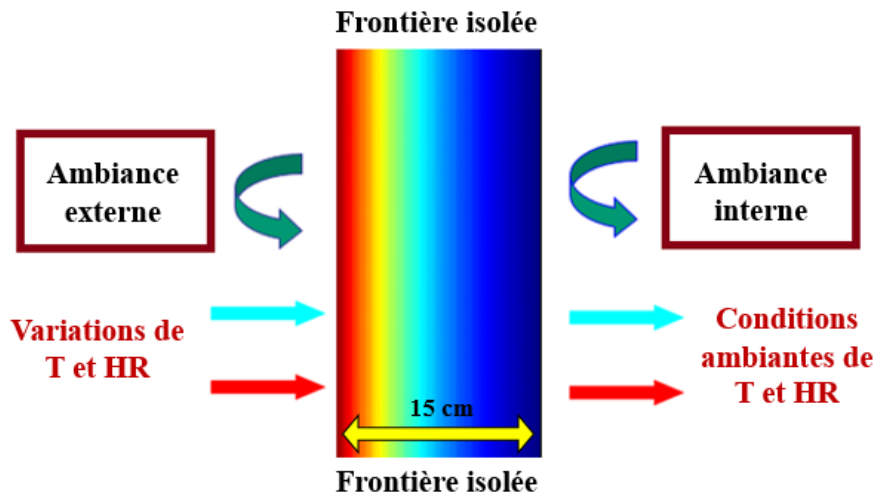


Figure II-10. Conditions de la simulation

#### Scénario 1 : Transfert de chaleur

Le premier scénario de cette étude de validation consiste à appliquer une variation brusque de température de  $23\text{ °C}$  à  $40\text{ °C}$  à la surface externe des murs.

La figure II-11 montre les variations de température en fonction du temps à trois profondeurs différentes (4.5, 8 et 11 cm de la surface externe) pour une excitation thermique allant de  $23\text{ °C}$  à  $40\text{ °C}$ . On voit clairement que les variations de température sont devenues stables après environ  $t = 1 \times 10^5\text{ s}$  et atteignent respectivement  $34.7\text{ °C}$ ,  $33.4\text{ °C}$  et  $32.3\text{ °C}$  pour les profondeurs 4.5, 8 et 11 cm. Comme on peut le voir également, une bonne concordance a été trouvée entre les deux logiciels quelle que soit la profondeur, ce qui confirme la validité de l'utilisation de COMSOL avec les modèles de Kunzel et de Mendes pour prédire le comportement thermique des murs.

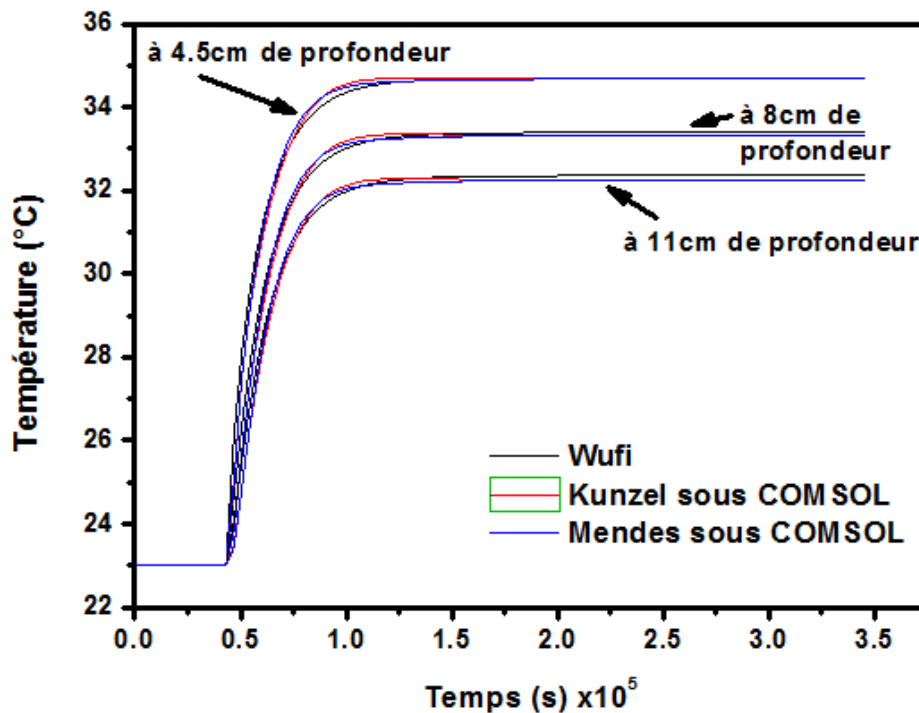


Figure II-11. Profils de température à différentes profondeurs

#### Scénario 2 : Transfert d'humidité

Le deuxième scénario consiste à appliquer une variation brusque de l'humidité relative de 50% à 70% à la surface externe des deux murs.

La figure II-12 montre les variations d'humidité relative en fonction du temps, prédites par les deux modèles et par Wufi pour une plage d'excitation d'humidité allant de 50% à 70%. Contrairement au transfert de chaleur, les variations d'humidité relative mettent beaucoup plus de temps pour atteindre l'état stationnaire et surtout les points les plus profonds de la paroi. Pour cette raison, seulement deux points proches de la surface externe ont été considérés. Nous remarquons un comportement relativement proche pour les variations d'humidité relative dans la paroi entre le modèle de Kunzel et Wufi à différentes profondeurs. Les profils ont atteint environ 63% à 0.5 cm de profondeur et 54% à 1.5 cm de profondeur. Ce n'est pas le cas pour le modèle de Mendes qui sous-estime les variations d'humidité relative par rapport au modèle de Kunzel et à Wufi. En fait, les valeurs obtenues par le modèle de Mendes n'indiquent que 58% et 50.5% d'humidité relative à 0.5 cm et 1.5 cm de profondeur respectivement. Cette différence est probablement liée aux coefficients de transfert de masse car chaque modèle les définit différemment. La différence entre les deux modèles pour le transfert d'humidité sera

bien étudiée dans le chapitre III quand les profils simulés seront comparés avec des mesures expérimentales.

- ❖ Il faut noter que par rapport au modèle de Kunzel implémenté dans COMSOL, le test sur Wufi devait donner les mêmes profils de température et d'humidité relative car il est basé sur le modèle de Kunzel aussi en utilisant les mêmes conditions aux limites. Les petits écarts entre Wufi et Kunzel peuvent être expliqués par plusieurs paramètres, tels que :
  - La méthode numérique, où COMSOL est basé sur la méthode des éléments finis alors que Wufi utilise la méthode des volumes finis.
  - L'aspect « boîte noire » du logiciel Wufi où certaines propriétés ne sont pas accessibles, telles que la courbe de sorption où seulement des points expérimentaux reliés linéairement sont présentés sans aucune information sur le fit utilisé.

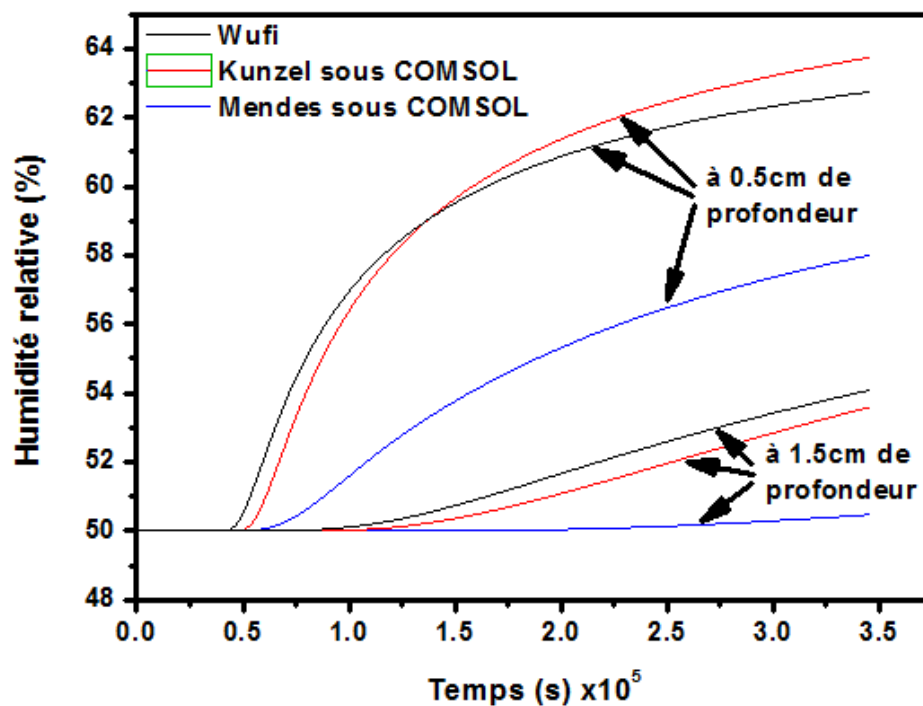


Figure II-12. Profils d'humidité relative à différentes profondeurs

## IX. Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction a été effectuée. Premièrement, les hypothèses habituelles, qui sont indispensables pour la modélisation dans ce domaine, ont été mises en exergue. Ensuite, on a défini les modes



de transfert possibles (diffusion, advection... etc.) ainsi que les expressions des densités de flux de chaleur et de masse correspondantes. De plus, les bilans globaux ont été établis en s'appuyant sur le principe de la conservation des quantités physiques. Par la suite, les modèles ainsi développés ont été implémentés avec succès dans le logiciel COMSOL multiphysics.

Dans la prochaine étape, nous allons réaliser une application au béton de bois de palmier dattier où ces deux modèles hygrothermiques développés seront comparés cette fois ci avec des données expérimentales.

## Références

- [1] J. R. Philip et D. A. De Vries, «Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients,» *Transactions American Geophysical Union*, vol. 38, pp. 222-232, 1957.
- [2] A. V. Luikov, «Application of irreversible thermodynamics methods to investigation of heat and mass transfer,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 9, pp. 139-152, 1966.
- [3] F. Bennai, Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé, La Rochelle: Thèse de doctorat, 2017.
- [4] H. M. Künzl, Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters, Stuttgart: IRB-Verlag, 1995.
- [5] K. Kießl, Capillary and vaporous moisture transport in multi-layered building components, Duisburg: Thèse de doctorat, 1983.
- [6] N. Mendes, I. Ridley, R. Lamberts, P. C. Philippi et K. Budag, «UMIDUS: a PC program for the prediction of heat and moisture transfer in porous building elements,» *Building Simulation Conference-IBPSA*, vol. 99, pp. 277-283, 1999.
- [7] N. Mendes, F. Winkelmann, R. Lamberts et P. Philippi, «Moisture effects on conduction loads,» *Energy and Buildings*, vol. 35, p. 631-644, 2003.
- [8] D. Lelièvre, Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés, Lorient: Thèse de doctorat, 2015.
- [9] Y. Ouméziane Aït, Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre, Rennes: Thèse de doctorat, 2013.
- [10] F. Tariku, Whole building heat and moisture analysis, Montréal: Thèse de doctorat, 2008.
- [11] F. Collet, Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux, Rennes: Thèse de doctorat, 2004.
- [12] G. H. Santos Dos et N. Mendes, «Combined heat, air and moisture (HAM) transfer model for porous building materials,» *journal of building physics*, vol. 32, n° 13, pp. 203-220, 2009.
- [13] S. H. Hens, Building physics-heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises, John Wiley & Sons, 2017.
- [14] WUFI®, WUFI®, [En ligne]. Available: <https://wufi.de/en/software/validation/>.
- [15] A. D. Tran Le, C. Maalouf, K. C. Mendonça, T. H. Mai et E. Wurtz, «Study of moisture transfer in a double-layered wall with imperfect thermal and hydraulic contact resistances,» *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 2, n° 14, pp. 251-266, 2009.

- [16] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert et B. T. Griffith, «Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs,» *Building and environment*, vol. 43, n° 14, pp. 661-673, 2008.
- [17] COMSOL Multiphysics user's guide, COMSOL Multiphysics, 2008.
- [18] T. Alioua, B. Agoudjil et A. Boudenne, «Numerical study of heat and moisture transfers for validation on Bio-based building materials and walls,» *International Conference on Numerical Modelling in Engineering*, Springer, pp. 81-89, 2018.
- [19] H. M. Künzle, D. Zirkelbach et K. Sedlbauer, «Predicting indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope,» *Proceedings of 1st International Conference on Sustainable Energy and Green Architecture*. Citeseer, 2003.
- [20] M. R. Hall et D. Allinson, «Transient numerical and physical modelling of temperature profile evolution in stabilised rammed earth walls,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, n° 15, pp. 433-441, 2010.

# **Chapitre III : Application à un mur en béton de bois de palmier dattier**

## **I. Introduction**

Après avoir développé les modèles hygrothermiques qui servent à simuler le comportement thermique et hydrique des matériaux hygroscopiques, nous effectuons dans ce chapitre une comparaison des résultats de ces modèles avec un cas réel. Ceci est effectué en simulant des tests expérimentaux sur un mur en DPC (Date Palm Concrete) et en confrontant les profils numériques avec ceux de l'expérimental. Par la suite, l'effet d'hystérésis sera modélisé et pris en compte dans les calculs et comparé également avec les données expérimentales. Finalement, une étude numérique comparative à l'échelle du mur est réalisée pour évaluer les performances du DPC par rapport à celles d'un matériau de construction classique.

## **II. Partie expérimentale**

### **II.1. Dispositif expérimental**

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude est constitué d'une enceinte climatique permettant de générer des gradients de température et d'humidité, dans laquelle est placée une mini chambre contrôlée en température et en humidité séparées par le mur test. Dans ce dernier, les variations de la température et de l'humidité sont mesurées à trois différentes profondeurs comme c'est montré dans la figure III-1. Le mur test, est une paroi en béton renforcé par 15% de fibres de bois de palmier dattier [1, 2].

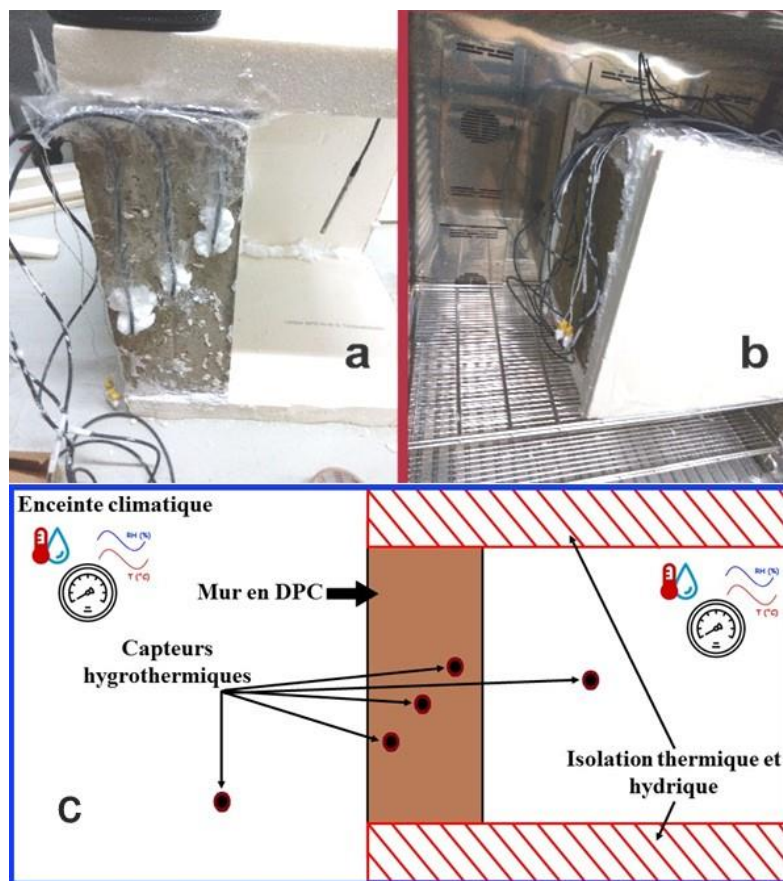


Figure III-1. Dispositif expérimental

## II.2. Caractéristiques de la paroi en DPC

Pour cette étude, un mur d'essai en béton à base de bois de palmier dattier de  $0.5 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$  (longueur  $\times$  hauteur  $\times$  épaisseur) a été fabriqué. Ce mur biocomposite est constitué du mortier ordinaire (62% de ciment (CEM II / B-LL32.5R CE NF) et 23% de sable avec une granulométrie de 0/4. Renforcé par 15% de fibres de bois palmier dattier (diamètre moyen de 3 mm).



Figure III-2. Fabrication du mur en DPC

Les composants ont été mélangés d'abord à l'état sec. Ensuite, l'eau a été rajoutée progressivement en mélangeant régulièrement afin d'obtenir un composite homogène. Par la suite, le mélange est coulé progressivement couche par couche dans un moule en bois tout en évitant la création de bulles d'air et des zones vides. Trois semaines plus tard, le mur d'essai est retiré du moule et laissé sécher au laboratoire pendant une année. Pendant le processus de séchage, la température et l'humidité relative du local sont mesurées périodiquement (50% HR et 18 °C de T).

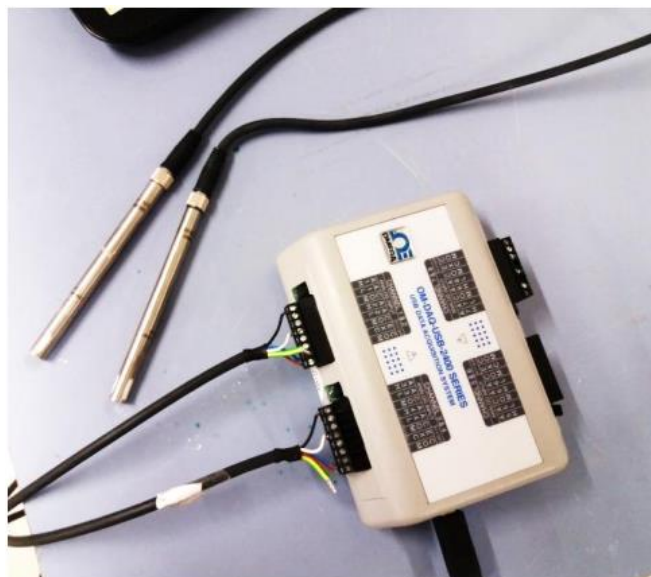
### II.3. Mesures et acquisition des données

L'instrumentation mise en place doit permettre de suivre l'évolution de la température et de l'humidité relative au sein de la paroi afin de comprendre sa réponse thermohydrrique en fonction des conditions climatiques appliquées.

Le suivi de la température et de l'humidité relative à l'intérieur du mur est effectué à l'aide de capteurs de marque « DKRF400 » dont les plages de mesure sont montrées dans le tableau III-1. Les capteurs ont un diamètre de 8 mm et une longueur de 100 mm. Ils peuvent être facilement insérés à différents niveaux dans le mur (voir la figure III-3). Selon les recommandations de Hedenblad *et al.* [3], nos capteurs de température et d'humidité ont été insérés le long des lignes isothermes et iso-hygric. Les capteurs sont placés à trois endroits stratégiques, c'est-à-dire près des faces intérieure et extérieure (respectivement à  $x = 3$  cm et  $x = 12.5$  cm) et au centre du mur ( $x = 7.5$  cm). Tous les capteurs ont été connectés à un module d'acquisition de données (modèle OM-DAQ-USB-2401 d'Omega Engineering, USA), ce dernier a été branché à un ordinateur via un port USB. Cette chaîne métrologique peut collecter automatiquement les données des capteurs connectés avec une étape d'acquisition de 60 secondes, ce qui permet un contrôle continu de la température et de l'humidité aux différents emplacements des capteurs.

**Tableau III-1 : Plages de mesures et précision des capteurs utilisés**

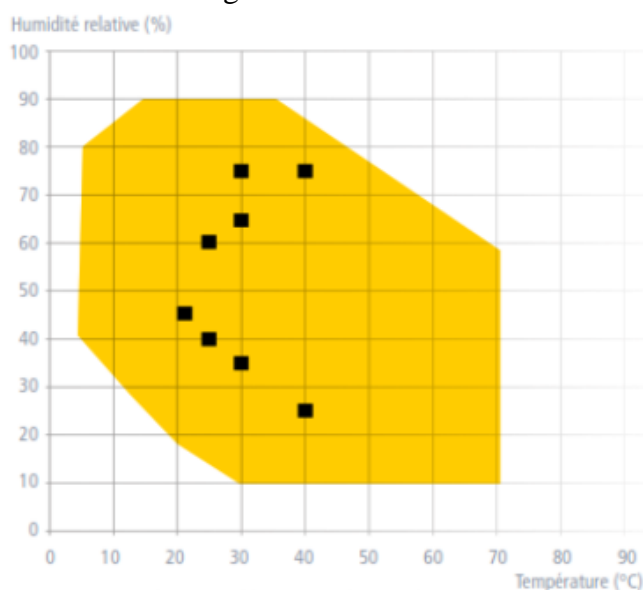
	Température (°C)	Humidité relative (%)
Plage de mesure	-40 → 45	0 → 100
Précision	± 0.5	± 1.8



**Figure III-3.** Capteurs hygrométriques et module d'acquisition des données

#### II.4. Principe et description du dispositif expérimental

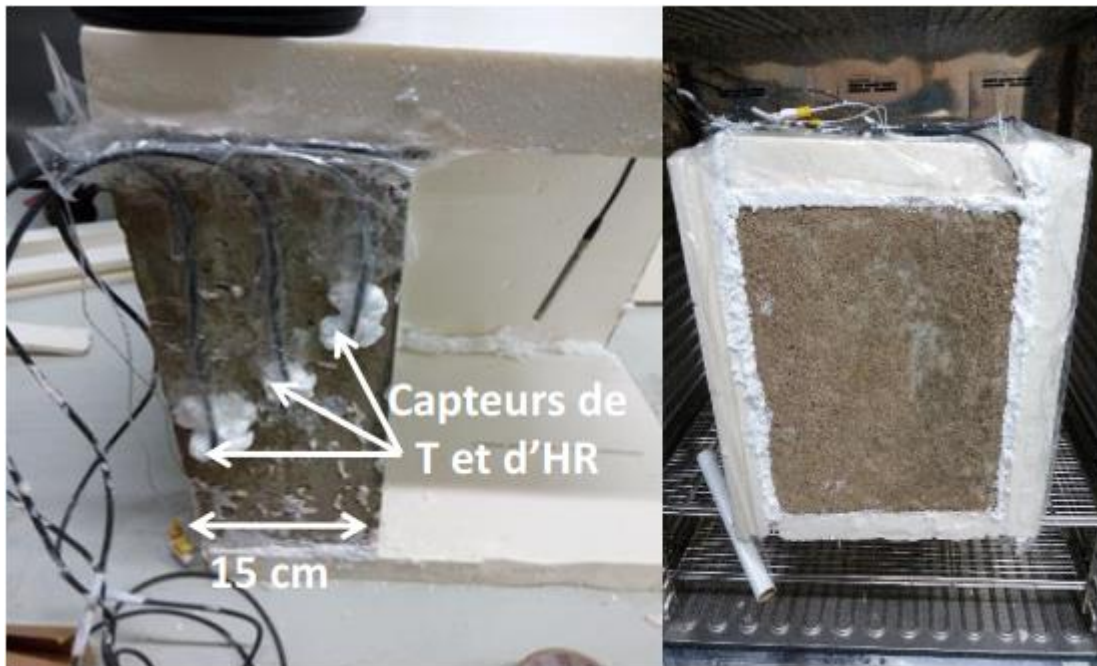
Le dispositif expérimental est constitué d'une chambre climatique permettant de simuler les conditions climatiques extérieures et une autre cellule pour simuler les conditions climatiques intérieures. La cellule simulant le climat intérieur permet d'évaluer les performances du mur en DPC en fonction de la réponse de ce dernier aux sollicitations de la température (T) et de l'humidité générées par la chambre climatique "Memmert HPP 750". Cette dernière permet d'appliquer une plage de température allant de 0 °C à + 70 °C et une plage d'humidité allant de 10% à 90% HR. Cela couvre une large plage de réglage qui permet de simuler les conditions extérieures comme c'est illustré dans la figure III-4.



**Figure III-4.** Zone de travail (T et HR) de la chambre climatique



La deuxième cellule (mini-chambre passive) est surveillée par des capteurs de température et d'humidité. Cette dernière est isolée hygrothermiquement sur les cinq côtés du mur. Pour cela, nous avons utilisé des panneaux de polystyrène extrudé et de la laine de verre avec un film mince en plastique. Cette configuration permet une parfaite isolation thermique et hydrique des cinq faces du mur tout en assurant un transfert unidimensionnel du côté extérieur du mur qui est en contact avec la chambre climatique (voir la figure III-5). De même, nous avons choisi de ne pas contrôler les conditions intérieures de la deuxième cellule (mini chambre passive).



*Figure III-5. Dispositif expérimental pour l'étude du transfert hygrothermique dans une paroi en DPC*

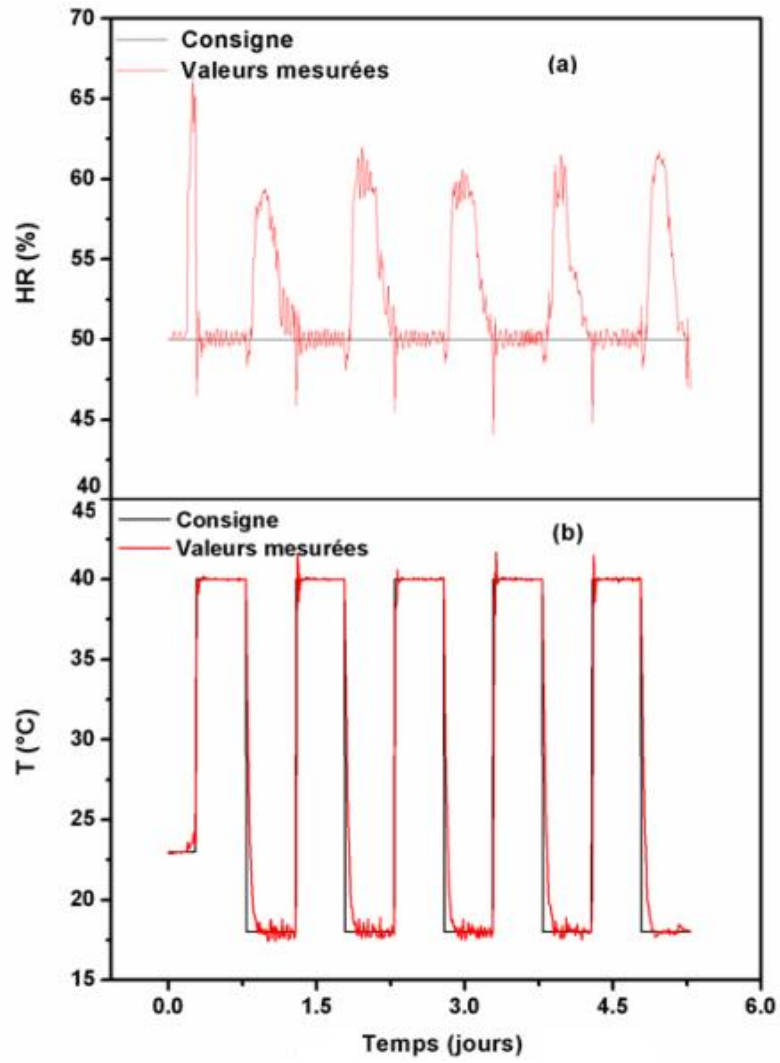
## II.5. Scénarios de sollicitations hygrothermiques appliqués

Le tableau III-2 résume les différents types des conditions de température et d'humidité appliquées au côté extérieure de la paroi en DPC afin de simuler les conditions réelles. Chaque essai doit être effectué dans une ambiance homogène et sous des conditions de température et d'humidité relative (presque) uniformes à l'intérieur de la chambre climatique. Plusieurs scénarios ont été programmés et de même, le temps de réponse des variations de température et d'humidité dans la chambre climatique est également évalué. Pour les différents tests, chaque étape est précédée d'une phase de conditionnement qui consiste à appliquer 50% en HR et 23 °C jusqu'à atteindre l'équilibre.

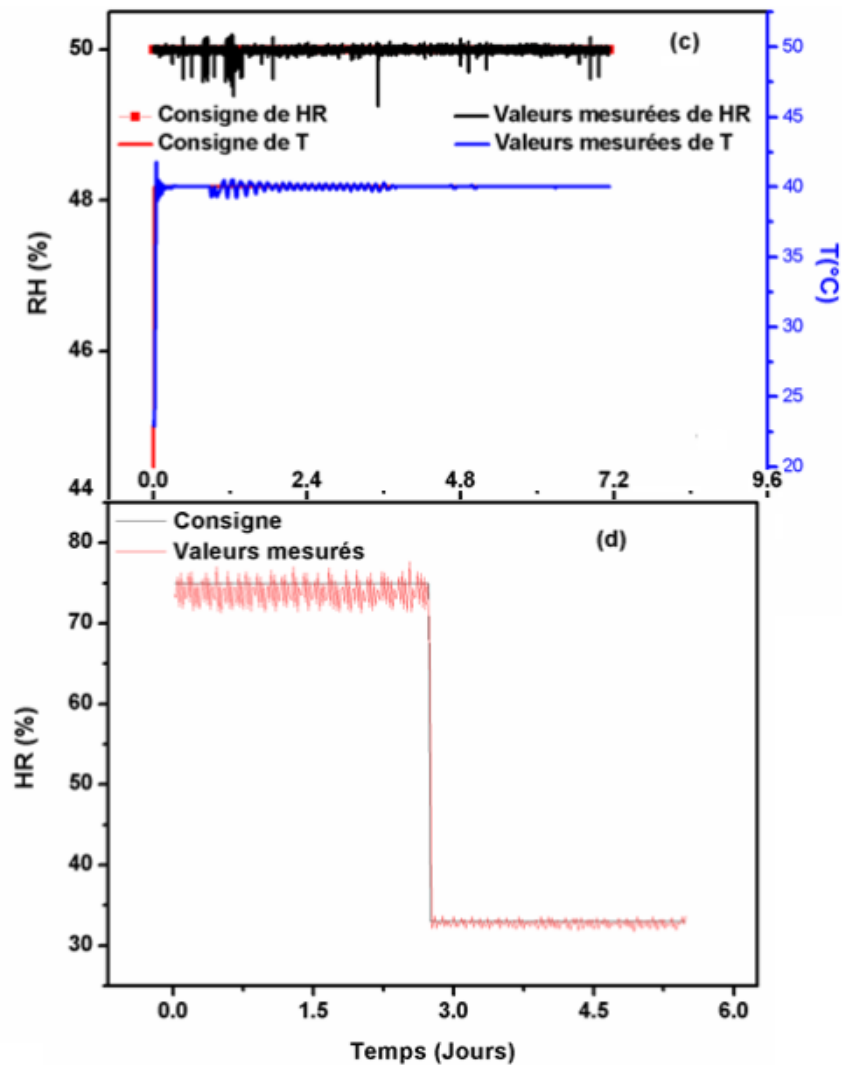
**Tableau III-2** : Conditions aux limites externes (les valeurs entre parenthèses correspondent aux conditions initiales au début du test, i.e. 23°C and 50% HR)

Scénarios	Conditions externes		Durée
	T [°C]	$\varphi$ [%]	
Scénario 1	(23) → 40 → 18	50	4 cycles de 24 heures (12 h à 40°C, 12 h à 18°C)
Scénario 2 (test du régime permanent)	(23) → 40	50	Exposition de 3 jours à 40°C
Scenario 3	23	(50) → 75 → 33	18 jours (9 jours à 75%, 9 jours à 33% d'humidité relative)

Dans ce contexte, les mesures de température et d'humidité étaient effectuées au milieu de la chambre climatique et comparées directement avec la consigne demandée (voir les figures III-6 et III-7). Ces figures montrent clairement que les consignes sont atteintes très rapidement pour la température (figures III-6 (b), III-7 (c)) et l'humidité relative (figure III-7 (c) et (d)). Ceci est principalement dû à la faible inertie de la chambre climatique ; néanmoins, la figure II-6 (a) montre des fluctuations importantes autour de la consigne en raison des perturbations causées par la présence du mur ainsi que la puissance du système de climatisation et de la mise en marche de système de régulation.



**Figure III-6.** Réponse de la chambre climatique aux variations de : température (a), humidité relative (b) pour le scénario 1



*Figure III-7. Réponse de la chambre climatique aux variations d'humidité relative : pour le scénario 2 (c) et pour le scénario 3 (d)*

### III. Partie numérique

#### III.1. Modèles étudiés

Le développement des modèles étudiés dans cette partie est détaillé dans le chapitre précédent en partant des équations de conservations et les hypothèses simplificatrices :

- Modèle de Mendes (équations II-77-78)
- Modèle de Kunzel (équations II-79-80)

### III.1.1. Conditions aux limites

Aux frontières du domaine étudié, nous sommes limités par les conditions du dispositif expérimental. Toutefois, nous avons essayé d'appliquer des conditions représentatives, de sorte que le problème théorique soit cohérent avec la configuration expérimentale réelle. De ce fait, dans cette étude, nous avons considéré le cas des flux de chaleur et d'humidité aux limites sans rajouter d'autres paramètres supplémentaires (pluie, rayonnement, etc.) [4]:

Flux de chaleur aux limites :

$$Q_{\Omega} = h(T_{\Omega} - T_{amb}) \quad (\text{III-1})$$

Où  $T_{\Omega}$  et  $T_{amb}$  en (K) sont les températures de surface et de l'environnement extérieur respectivement et  $h$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) est le coefficient d'échange thermique aux limites.

Flux d'humidité aux limites :

$$G_{\Omega} = \beta(P_{v,\Omega} - P_{v,amb}) \quad (\text{III-2})$$

Où  $P_{v,\Omega}$  et  $P_{v,amb}$  en (Pa) sont les pressions de vapeur à la surface et de l'environnement extérieur respectivement. Le coefficient de transfert de vapeur d'eau aux limites  $\beta$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ ) est défini comme suit [4] :

$$\beta = 7 \cdot 10^{-9} \cdot h_c \quad (\text{III-3})$$

Où  $h_c$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) est le coefficient d'échange convectif.

## IV. Validation (Alioua *et al.* [5])

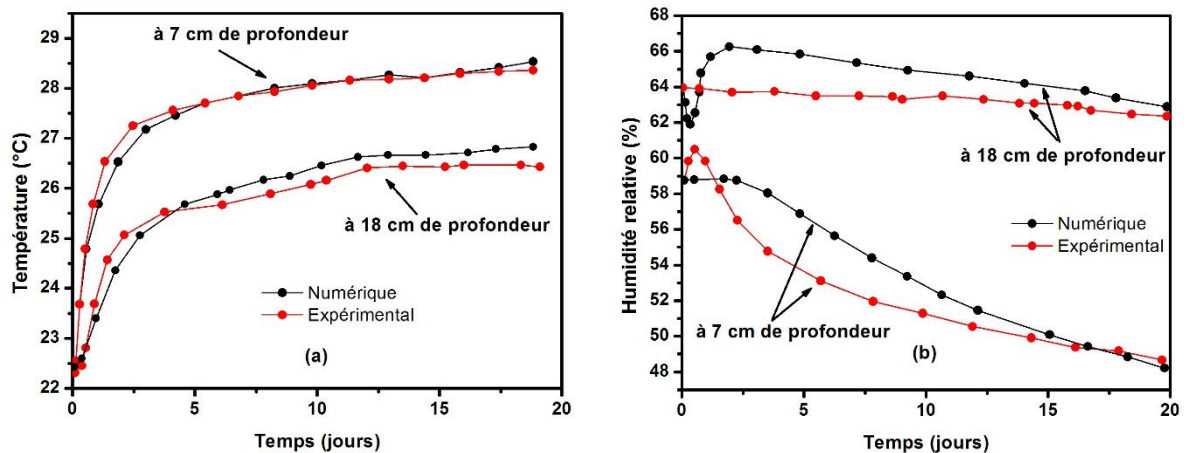
### IV.1. Travaux antérieurs

Dans les études antérieures, ces modèles ont été implémentés dans plusieurs outils de simulation tels que Wufi, PowerDomus, SPARK, etc., et les simulations ont été comparées avec des résultats expérimentaux à l'échelle mur et bâtiment. Des exemples de tests de validation à l'échelle du bâtiment se trouvent dans l'annexe 41 du projet EBC [6].

Le modèle de Kunzel a été validé par la suite par l'Institut Fraunhofer de physique de bâtiment. Des simulations ont été effectuées à l'aide de plusieurs versions du logiciel Wufi, pour différents

cas et à différentes échelles. Les résultats ont été comparés avec des données expérimentales et ont montré un bon accord pour la température et l'humidité relative [7].

Un autre test de validation du modèle de Mendes a été effectué récemment par Maalouf *et al.* [8] à l'échelle du mur. Ces auteurs ont utilisé des données expérimentales de la littérature obtenues d'un test sur un mur en béton de chanvre de 36 cm d'épaisseur placé entre deux chambres climatiques contrôlables. Les conditions expérimentales ont été simulées à l'aide du logiciel SPARK (Simulation Problem Analysis and Research Kernel) et les résultats numériques ont été comparés avec les données mesurées au milieu et à 7 cm de la surface externe du mur (Figures III-8.a, b). Une bonne concordance a été trouvée, en particulier pour la température avec une différence maximale de 0.5 °C. En ce qui concerne l'humidité relative, la différence maximale était de 3.4%, probablement en raison de l'effet d'hystérésis négligé dans leur travail.



**Figure III-8.** Validation du modèle de Mendes pour la température (a) et l'humidité relative (b) à 7 cm et 18 cm de profondeur du mur en béton de chanvre, sur la base des données rapportées dans [8]

Dans notre cas, nous adoptons la même démarche que ces travaux en prenant les mêmes modèles et en utilisant la méthode des éléments finis, afin d'étudier leur validation lorsqu'ils sont appliqués au matériau DPC, et dans les deux cas : sans/avec effet d'hystérésis.

## IV.2. Conditions de simulation

Dans cette partie, on reprend les modèles et les conditions implémentés et validés dans le logiciel COMSOL Multiphysics dans le chapitre II section VIII. La paroi du DPC et les conditions de simulation sont illustrées sur la figure III-9, où le coefficient global de transfert thermique aux frontières a été estimé selon les approximations de Kunzel [4, 7] à  $8 \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-1})$  avec une portion convective de  $3.57 \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-1})$  pour la surface interne et à  $17 \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-1})$  avec une portion convective de  $10 \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-1})$  pour la surface externe du mur. Les propriétés hygrothermiques du DPC nécessaires pour les simulations numériques sont rapportées dans le tableau III-3 [9-11]. Pour la configuration du maillage, les paramètres par défaut selon la référence [12] sont utilisés. De plus, pour définir le nombre d'éléments dans le maillage, une étude de sensibilité sera réalisée dans la section suivante.

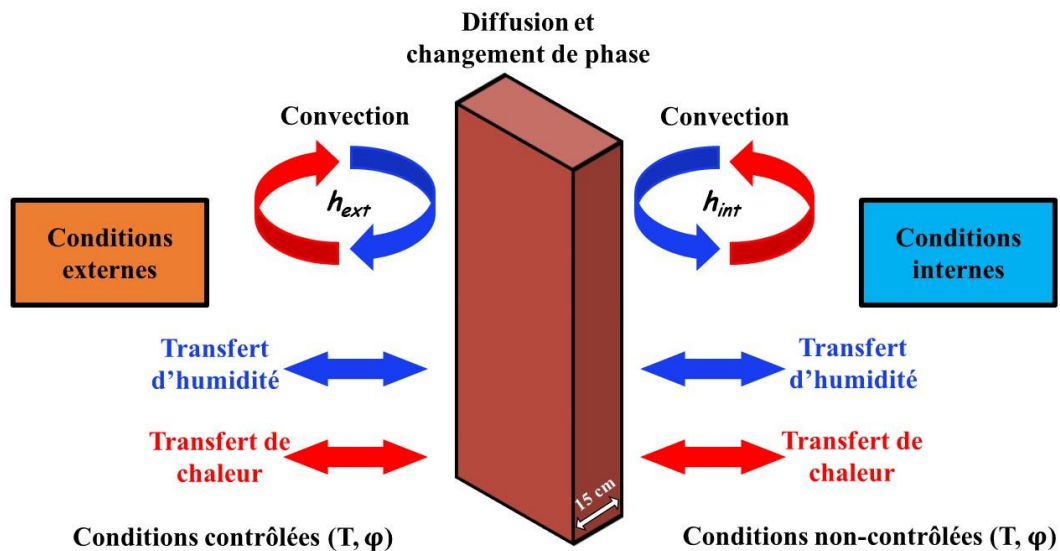


Figure III-9. Schéma de la paroi de DPC et les conditions aux limites

Tableau III-3 : Propriétés du DPC

Propriété	Valeur	Référence	Propriété	Valeur	Référence
Masse volumique à l'état sec [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	954	[9]	Capacité thermique à l'état sec [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]	1500	[11]
Conductivité thermique à l'état sec [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]	0.185	[9]	Supplément d'humidité de la conductivité thermique [-]	10.190	[9]

Facteur de résistance à la vapeur d'eau (Coupelle sèche) [-]	6.310	[10]	Facteur de résistance à la vapeur d'eau (Coupelle humide) [-]	5.570	[10]
Coefficient d'absorption d'eau [kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-0.5</sup> ]	0.165	[9]	Teneur en eau à la saturation libre [kg.m <sup>-3</sup> ]	429	[9]

### IV.3. Impact du maillage sur les résultats numériques

Afin de vérifier si une modification dans le maillage a une influence sur les résultats, l'impact de différentes configurations de maillage sur les résultats numériques pour chaque modèle est étudié. Théoriquement, la paroi étudiée d'épaisseur " $E$ " cm est discrétisée en  $n$  nœuds, et donc en " $(n - 1)$ " couches. La raison de cette discrétisation est que les transferts de chaleur et d'humidité sont supposés unidirectionnels, et leurs gradients sont créés suivant l'épaisseur du mur. Par conséquent, l'épaisseur élémentaire de chaque couche est alors égale à : " $\Delta x = E / (n - 1)$ ". Plusieurs critères interviennent lors du choix du maillage, tels que la convergence, la précision de calcul et le temps de calcul.

Dans ce travail, une large gamme de niveaux de maillage est testée afin de visualiser toute amélioration possible dans les résultats lors de l'augmentation du nombre de couches. Les nombres de couches examinés sont : 2, 5, 10, 100, 500, 1000 et 2500 couches. La machine utilisée pour les calculs avait la capacité suivante : microprocesseur: CPU i5 1.70 ~ 2.40 GHz. RAM : 8 Go. Disque dur : 1 To. Les tests consistent à appliquer les conditions climatiques illustrées sur la figure III-10. La surface de la paroi en DPC a été exposée à des changements progressifs de température et d'humidité relative, avec des périodes de cycles d'un jour et de 20 jours respectivement, alors que la surface intérieure était en contact avec des conditions ambiantes constantes ( $T = 23$  °C et  $\phi = 50\%$ ). Les résultats des simulations, en termes de temps de calcul mis par les deux modèles pour résoudre les cas de variation de température et d'humidité relative, sont présentés dans le tableau III-4.



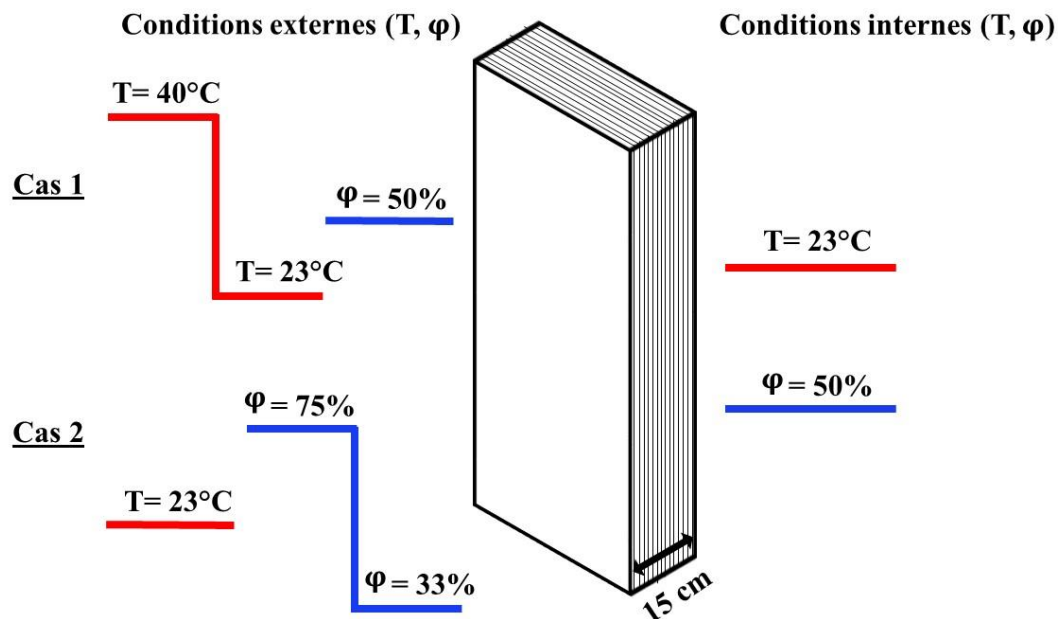


Figure III-10. Conditions du test « impact du maillage » : variations de température (cas 1) et d'humidité relative (cas 2)

Tableau III-4 : Temps de calcul en fonction du nombre d'éléments de maillage

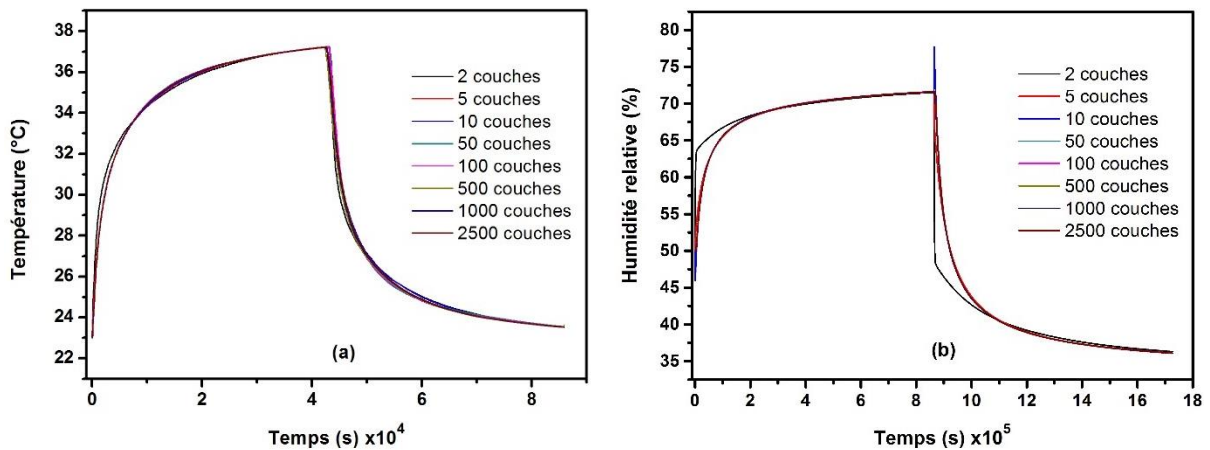
		Nombre d'éléments de maillage	2	5	10	50	100	500	1000	2500
Modèle de Kunzel	Temps de calcul pour le transfert de chaleur [s]		1.7	1.7	2.1	2.4	2.9	8	14.9	29.1
	Temps de calcul pour le transfert d'humidité [s]		2.4	2.9	2.8	4.6	6.1	17.1	36.6	144.8
Modèle de Mendes	Temps de calcul pour le transfert de chaleur [s]		2.4	2.1	2.1	2.3	3.8	9.5	17	29.7
	Temps de calcul pour le transfert d'humidité [s]		2.6	2.4	2.5	3.3	4.3	14.9	30.9	102.9

Généralement, plusieurs paramètres peuvent influencer le temps de calcul tels que : la complexité de la géométrie, le type de maillage, les pas de temps, le nombre de fonctions utilisées dans la résolution et leur dépendance des potentiels de calcul (propriétés des matériaux,

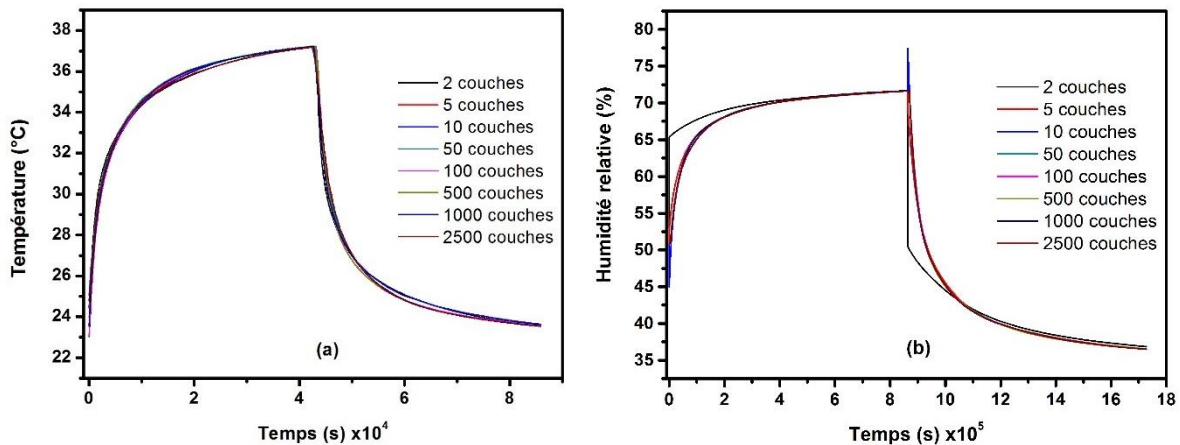
conditions aux limites, etc.). Dans notre cas, la géométrie utilisée pour simuler le mur en DPC est un rectangle simple, le type de maillage est également rectangulaire, les paramètres de pas de temps sont utilisés selon la référence [13]. Dans ce test, les conditions climatiques ont été produites dans le logiciel afin d'optimiser le temps de calcul (pas de fichiers externes introduits). Par conséquent, nous avons réalisé 32 simulations et le temps de calcul est resté acceptable même pour les maillages les plus serrés. Comme le montre le tableau III-4, la résolution des problèmes de transfert de chaleur est plus rapide que la résolution de ceux de transfert d'humidité. En effet, la variation de l'humidité relative implique l'intervention des courbes de sorption à chaque pas de temps afin d'évaluer l'humidité relative ou la teneur en eau selon le modèle correspondant. Les variations d'humidité relative sont également responsables des changements de la conductivité thermique, car cette dernière dépend de la teneur en eau.

Les résultats montrant l'impact du maillage sur le calcul de la température et l'humidité relative sont présentés dans les figures III-11.a, b et III-12.a, b pour les modèles de Kunzel et de Mendes, respectivement. Afin de visualiser des fluctuations importantes, les courbes ont été tracées à un emplacement de 1 cm de profondeur, près de la surface extérieure sur laquelle les conditions aux limites externes sont appliquées.

Pour les deux modèles, on constate que quel que soit le nombre d'éléments de maillage, les profils de température simulés présentent de très légères variations (ne dépassant pas 0.3 °C). Cependant, pour le cas de l'humidité relative, les résultats obtenus en utilisant des configurations à 2, 5 et 10 mailles présentent des variations plus élevées atteignant respectivement 22.8%, 5.8% et 7%. Les niveaux de maillage les plus raffinés (50 à 2500 éléments) fournissent exactement les mêmes profils de l'humidité relative. À partir de ces résultats, on peut conclure que tous les niveaux de maillage testés peuvent être utilisés pour simuler des problèmes de transfert de chaleur dans la présente étude. Cependant, le maillage doit être raffiné pour la simulation des phénomènes de transfert d'humidité (environ 50 éléments ou plus). Une telle conclusion a également été déduite par Costantine [14]. Par conséquent, un maillage de 100 couches est choisi dans les sections suivantes, afin de gagner en précision et en temps de calcul.



**Figure III-11.** Impact de maillage sur le modèle de Kunzel : température (a) et humidité relative (b) à une profondeur de 1 cm de la surface extérieure du mur.

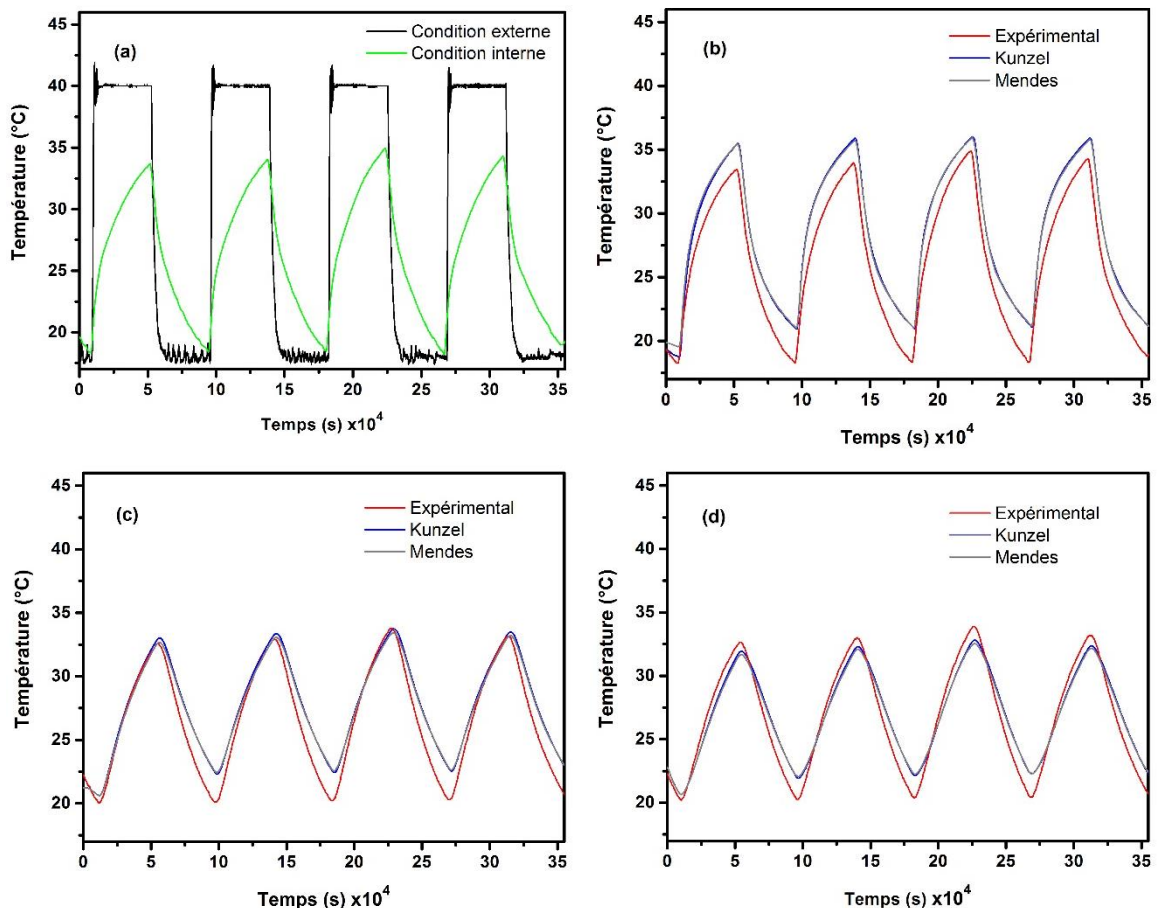


**Figure III-12.** Impact de maillage sur le modèle Mendes : température (a) et humidité relative (b) à une profondeur de 1 cm de la surface extérieure du mur.

#### IV.4. Scénario 1 : créneau de température à 50% HR

Le scénario 1 a été simulé en appliquant un changement brusque de température jusqu'à 40 °C à la surface extérieure du mur en maintenant cette température pendant 12 heures, puis en appliquant une diminution jusqu'à 18 °C en maintenant cette température pendant 12 heures supplémentaires, tout en gardant une humidité relative constante à 50%. Ce cycle a été répété 4 fois. Les valeurs de température et d'humidité relative aux limites (à la fois dans les ambiances, extérieure et intérieure, comme indiqué sur la figure III-13.a) ainsi que les conditions initiales ( $T = 23$  °C et  $\phi = 50\%$ ) ont été obtenues du test expérimental. On peut remarquer sur la figure III-13.a que les conditions intérieures changent avec les conditions extérieures, ce qui peut être expliqué par le fait que l'isolation n'est pas parfaite. Mais ce n'est pas un problème dans le cas présent, car ces conditions aux limites réelles sont prises en compte

dans la modélisation. Des simulations ont été effectuées pour chaque modèle mathématique et les résultats sont tracés pour les mêmes profondeurs que pour les mesures expérimentales. Les figures III-13.b, c, d montrent les variations de température à des profondeurs de 3 cm, 7.5 cm et 12.5 cm à l'intérieur du mur, obtenues par les deux modèles, ainsi que les mesures expérimentales. En comparant les deux modèles, nous constatons qu'ils fournissent exactement le même comportement thermique à l'augmentation et à la diminution de température pour les différentes profondeurs considérées. Cela était attendu car les deux modèles décrivent le transfert de chaleur de la même manière, comme étant le résultat de la conduction de chaleur et du transfert de chaleur accompagnant les flux de vapeur (changement de phase). En comparant avec l'expérimental, les amplitudes des variations numériques sont inférieures à celles expérimentales pour les trois profondeurs. Cette observation a également été notée par Mundt Petersen *et al.* [15] qui ont étudié les murs à ossature de bois dans des conditions réelles. Dans notre cas, les différences maximales entre les résultats numériques et expérimentaux ont été obtenues à 3 cm de profondeur, et étaient égales à 2 °C et 2.8 °C pendant les phases d'augmentation et de baisse de température respectivement. Le meilleur accord global a été trouvé au milieu du mur. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux de Lelievre *et al.* [16], qui ont soumis un mur en béton de chanvre à des variations thermiques d'amplitudes inférieures à celles considérées dans la présente étude (de 23 °C à 32 °C), et ont obtenu une différence de l'ordre de 1 °C entre la simulation et l'expérience.

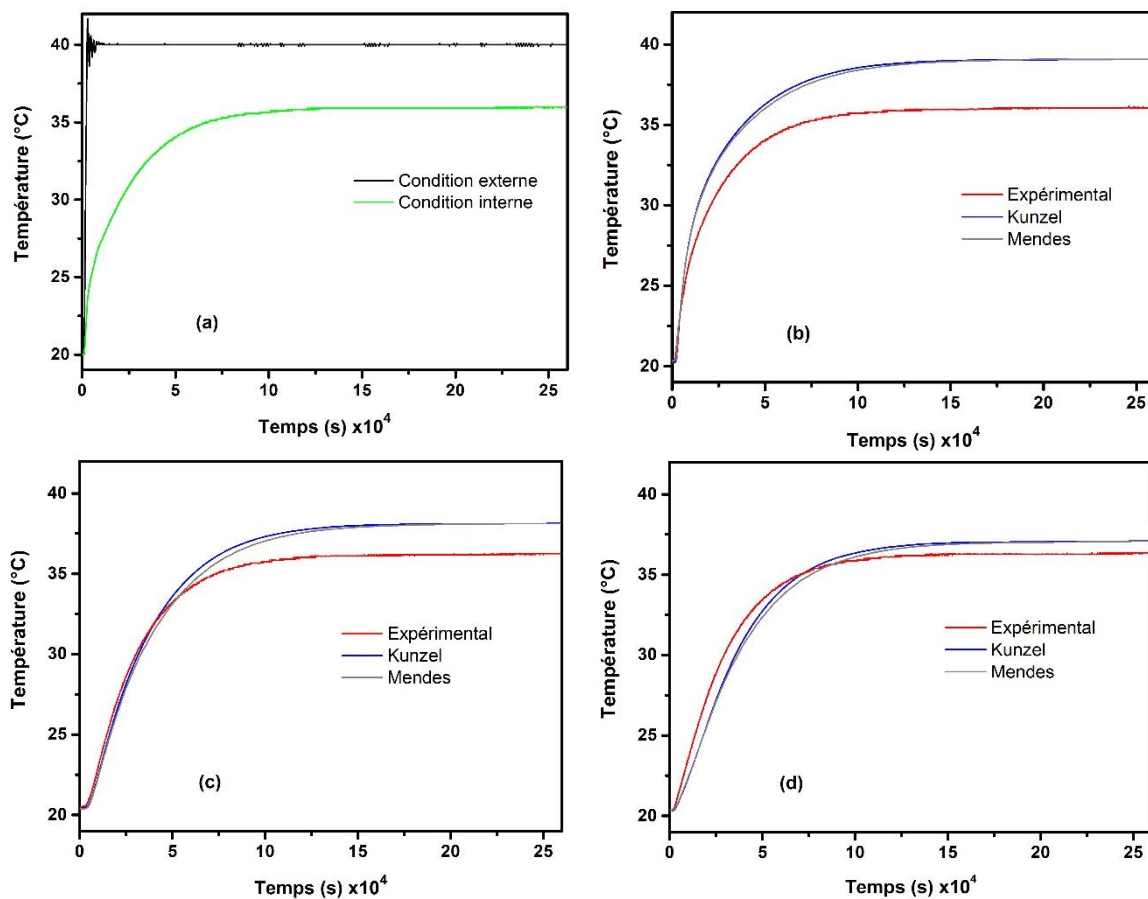


**Figure III-13.** Profils numériques et expérimentaux de la température à des profondeurs de 3 cm (b), 7.5 cm (c) et 12.5 cm (d) à l'intérieur du mur en DPC soumis au scénario 1. Les conditions aux limites expérimentales extérieures et intérieures importées dans le logiciel sont tracées en (a).

#### IV.5. Scénario 2 : état d'équilibre thermique à 50% RH (régime permanent)

Le scénario 2 représente le test en régime permanent, dans lequel le côté extérieur de la paroi en DPC a été soumis à une augmentation de température initiale jusqu'à 40 °C, ensuite cette température a été maintenue constante pendant 3 jours tout en maintenant l'humidité relative à 50%. Les valeurs de température et d'humidité relative aux limites (c-à-d dans les ambiances, extérieure et intérieure, montrées sur la figure III-14.a) ont été obtenues directement de l'expérience et des simulations ont été effectuées pour chaque modèle. Les figures III-14.b, c, d montrent les profils numériques de température à des profondeurs de 3 cm, 7.5 cm et 12.5 cm respectivement, comparées avec les mesures expérimentales. Les deux modèles prédisent des comportements similaires avec de très légères différences (inférieures à 0.34 °C). Là encore, ce n'est pas surprenant, puisque les deux modèles s'appuient sur la même description des

phénomènes de transfert de chaleur dans les milieux poreux. De plus, les courbes numériques et expérimentales atteignent l'état d'équilibre après presque le même temps, ce qui était également observé dans la référence [8] pour un mur en béton de chanvre. Le temps le plus long jusqu'à la stabilisation est notée à une profondeur de 7.5 cm, ce qui correspond au point le plus loin des conditions intérieures et extérieures. Les valeurs numériques atteintes à l'état d'équilibre sont supérieures aux valeurs expérimentales, ce qui a été également observé dans la référence [8]. Un meilleur accord entre les modèles et l'expérience a été obtenue à 7.5 cm et 12.5 cm de profondeur, alors qu'une plus grande différence a été notée à 3 cm de profondeur. C'est probablement à cause de l'hétérogénéité du matériau et l'incertitude sur les valeurs des propriétés telles que rapportées dans la référence [16].



**Figure III-14.** Profils numériques et expérimentaux de température à des profondeurs de 3 cm (b), 7.5 cm (c) et 12.5 cm (d) à l'intérieur du mur en DPC soumis au scénario 2. Les conditions aux limites expérimentales extérieures et intérieures importées dans le logiciel sont tracées en (a).

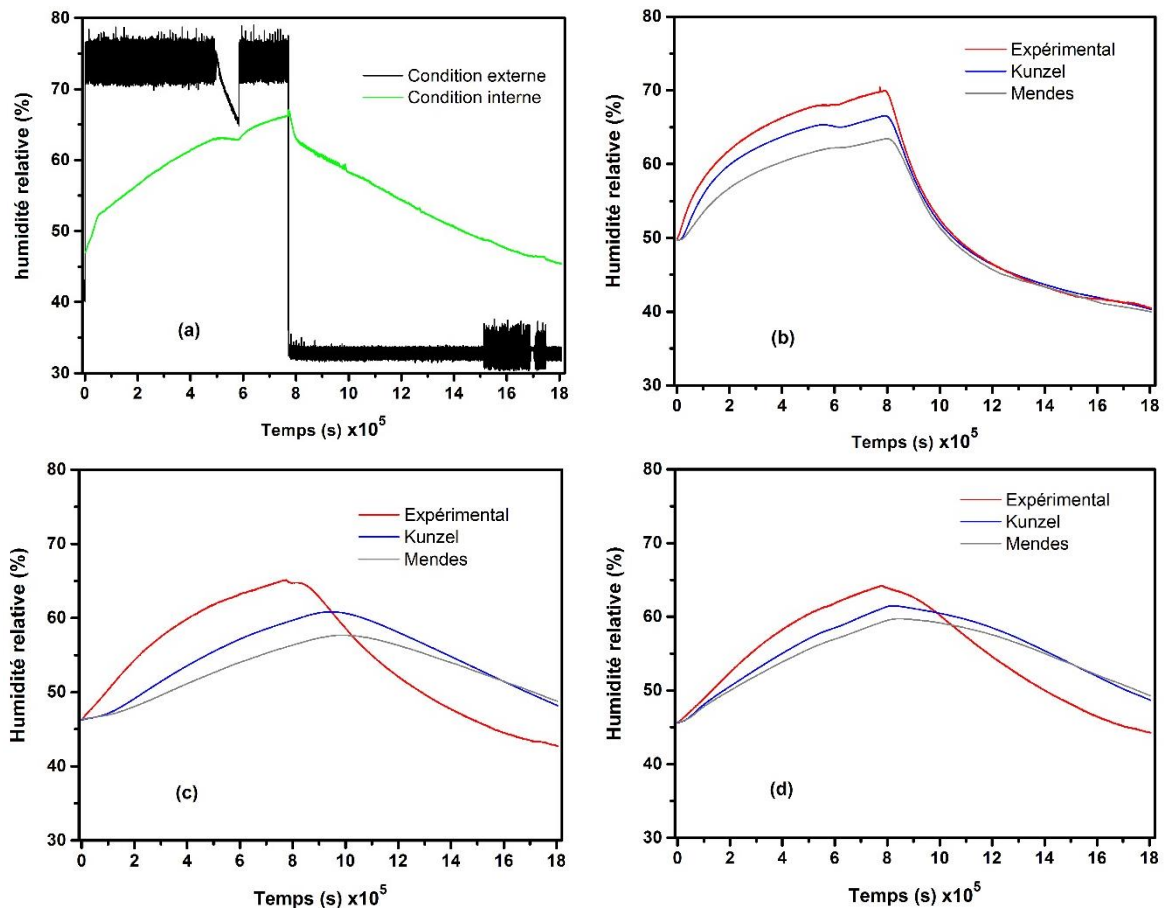
#### IV.6. Scénario 3 : Créneau d'humidité relative à 23 °C

Dans le scénario 3, des mesures et des simulations ont été effectuées sous conditions isothermes à 23 °C. Tout d'abord, un changement brusque en humidité a été imposé sur le côté extérieur du mur en DPC, à partir de la valeur initiale (50% HR) à 75% HR, ensuite cette dernière valeur a été maintenue constante pendant 9 jours. Par la suite, l'humidité relative a été changée de 75% à 33% RH, et ce faible niveau d'humidité a été maintenu pendant 9 jours supplémentaires. Les profils d'humidité relative dans les ambiances extérieure et intérieure ont été aussi importés directement de l'expérience et utilisés comme conditions aux limites pour les calculs (Figure III-15.a). Des simulations ont été effectuées pour chaque modèle mathématique basées sur la courbe d'adsorption principale (présentée dans le chapitre I section VII-3) et les résultats sont tracés pour plusieurs profondeurs sur les figures III-15.b, c, d. La comparaison entre les deux modèles montre que des valeurs d'humidité relative plus faibles sont fournies par le modèle de Mendes quelle que soit la profondeur, avec une différence maximale de 3.3% observée à la profondeur de 3 cm. Une telle différence est attribuée à des descriptions spécifiques du processus de transfert du liquide, qui représente la principale différence entre ces modèles. En fait, dans son travail, Kunzel a décrit ce processus en plus de détails et des coefficients de transfert ont été développés pour tenir compte des phénomènes éventuels de transport de liquide tels que la diffusion surfacique, la succion capillaire et la redistribution [4], ce qui n'est pas le cas dans le modèle de Mendes. Ces sous-estimations obtenues par le modèle de Mendes peuvent être dues à la perméabilité du matériau qui est considérée constante dans ce travail. La valeur utilisée correspond au test de la coupelle sèche (défini dans le chapitre I section VII-3) pour une plage d'humidité allant de 0% jusqu'à 50%. Dans certains travaux [17], la perméabilité est considérée variable en fonction de l'humidité relative où différents tests sont réalisés pour déterminer des valeurs couvrant toute la plage d'humidité de la région hygroscopique ( $0% < HR < 95%$ ). Cela peut probablement améliorer les profils d'humidité relative obtenus par le modèle de Mendes par rapport au modèle de Kunzel et par rapport à l'expérimental.

Globalement, les courbes numériques obtenues par les deux modèles sont toujours situées en dessous des courbes expérimentales pendant la phase d'adsorption. La même observation a été rapportée par les auteurs de la référence [18]. Cet écart varie pour les divers emplacements et peut être attribué à l'hétérogénéité du matériau résultant des processus de fabrication [16]. Le décalage semble maximal à 7.5 cm de profondeur (milieu du mur), avec des différences de 7% pour le modèle de Kunzel et 9% pour le modèle de Mendes par rapport à l'expérimental. Le

meilleur accord a été trouvé à une profondeur de 3 cm (3.4% pour le modèle de Kunzel et 6.5% pour le modèle de Mendes). On observe également que la réponse réelle du mur à 7.5 et 12.5 cm de profondeur est plus rapide que les réponses théoriques fournies par les deux modèles, à la fois dans les phases d'adsorption et de désorption. C'est pourquoi les courbes numériques sont situées sous les courbes expérimentales pendant la phase d'adsorption et au-dessus d'elles pendant la désorption. Une telle tendance a également été signalée dans la référence [18]. D'un point de vue expérimental, l'isolation de l'enceinte a été réalisée d'une manière artisanale ; donc il n'y a pas une protection absolue contre l'infiltration d'humidité qui peut s'infiltrer à travers les surfaces latérales du mur. Pour cette raison, le cas pratique peut différer de la configuration idéalisée des simulations, dans laquelle une isolation parfaite du système est supposée. Cela pourrait expliquer la réponse plus rapide du mur lors de l'expérience. Également, il y a eu des perturbations continues de l'humidité relative dans la chambre climatique avant le début de l'expérience qui a empêché la stabilisation et l'homogénéisation des conditions initiales. D'un point de vue physique, les valeurs expérimentales plus élevées s'expliquent par l'équilibre retardé dû à la capacité tampon du matériau qui est supposé dans un équilibre thermodynamique en chaque point et à chaque moment dans les simulations [19]. De plus, une autre raison importante de ces écarts est l'effet d'hystérésis qui est négligé dans les modèles, ainsi que l'historique de la teneur en eau à l'intérieur du mur qui était inconnu au début de l'expérience. La non prise en compte de cet effet d'hystérésis lors des calculs de transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux biosourcés conduit à négliger l'eau retenue lors des processus d'adsorption/désorption et a une influence significative sur l'évolution prévue par les modèles de l'humidité relative [20]. De la même manière, une étude précédente a démontré que le DPC présente un comportement hystérétique important [10]. De ce fait, ce phénomène sera examiné et étudié dans la section suivante.





**Figure III-15.** Profils numériques et expérimentaux de l'humidité relative dans la paroi en DPC à des profondeurs de 3 cm (b), 7.5 cm (c) et 12.5 cm (d) soumise au scénario 3. Les conditions aux limites expérimentales extérieures et intérieures importées dans le logiciel sont tracées en (a).

#### IV.7. L'influence de l'effet d'hystérésis

##### IV.7.1. Modélisation du phénomène d'hystérésis

Les courbes principales d'adsorption-désorption servent à fournir l'évolution de la teneur en eau dans les matériaux ainsi que leurs capacités hydriques à différents niveaux d'humidité relative. Ce sont deux courbes déterminées expérimentalement en partant de l'état sec jusqu'à l'état saturé, ensuite en revenant à l'état sec. Cependant, en réalité les matériaux subissent des variations d'humidité relative intermédiaires (sans atteindre les états limites, sec et saturé), ce qui est difficile à prévoir et à déterminer expérimentalement à chaque fois. A cet effet, les auteurs de [21-24] proposent des modèles qui estiment la teneur en eau et la capacité hydrique dans des points intermédiaires à partir des deux courbes principales d'adsorption-désorption.

*Modèle de Mualem*

Ce modèle phénoménologique de Mualem [21, 25, 26] est défini à l'aide de deux fonctions,  $l$  et  $h$  qui représentent les dimensions de l'espace de Mualem. La fonction  $l$  caractérise la distribution des sites accessibles à la sorption, tandis que  $h$  représente l'accessibilité à ces sites. Les principaux processus d'adsorption et de désorption sont décrits à l'aide du calcul d'intégral des fonctions  $l$  et  $h$  dans l'espace de Mualem de la manière suivante :

$$\mathbf{u}_{ads} = \int_0^{\varphi} l(\varphi) d\varphi \int_0^1 h(\varphi) d\varphi = L(\varphi) \quad (\text{III-4})$$

$$\mathbf{u}_{dés} = \int_0^{\varphi_{max}} l(\varphi) d\varphi \int_0^1 h(\varphi) d\varphi - \int_{\varphi}^{\varphi_{max}} l(\varphi) d\varphi \int_{\varphi}^1 h(\varphi) d\varphi \quad (\text{III-5})$$

$$\mathbf{u}_{dés} = \mathbf{u}_f - (\mathbf{u}_f - L(\varphi)) (1 - H(\varphi)) \quad (\text{III-6})$$

Où

$$H(\varphi) = \frac{\mathbf{u}_{dés}(\varphi) - \mathbf{u}_{ads}(\varphi)}{\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_{ads}(\varphi)} \quad (\text{III-7})$$

$\mathbf{u}_{ads}$  et  $\mathbf{u}_{dés}$  (kg.kg<sup>-1</sup>) sont les teneurs en eau massiques d'adsorption et de désorption respectivement.  $\mathbf{u}_f$  (kg.kg<sup>-1</sup>) est la teneur en eau de saturation.  $L(\varphi)$  et  $H(\varphi)$  sont les primitives des fonctions  $l$  et  $h$  respectivement.

L'effet d'hystérésis se produit lorsqu'il y a un point d'inversion dans l'évolution de la teneur en eau à l'intérieur du matériau (une augmentation suivie d'une diminution ou l'inverse). Notons ce point «  $i$  » à une humidité relative  $\varphi$ .

Si on considère une augmentation de la teneur en eau après le point d'inversion, les courbes intermédiaires d'adsorption sont déterminées après réitération comme suit :

$$\mathbf{u}_{hys,ads}(\varphi, i) = \mathbf{u}_{i-1} + (1 - H(\varphi_{i-1})) (\mathbf{u}_{ads}(\varphi) - \mathbf{u}_{ads}(\varphi_{i-1})) \quad (\text{III-8})$$

De la même manière, si la teneur en eau diminue après le point d'inversion, les courbes intermédiaires de désorption sont obtenues par l'expression suivante :

$$\mathbf{u}_{hys,dés}(\varphi, \mathbf{i}) = \mathbf{u}_{\mathbf{i}-1} - (\mathbf{1} - H(\varphi))(\mathbf{u}_{ads}(\varphi_{\mathbf{i}-1}) - \mathbf{u}_{ads}(\varphi)) \quad (\text{III-9})$$

$\mathbf{u}_{\mathbf{i}-1}$  est la teneur en eau du matériau au point  $(\mathbf{i} - 1)$  juste avant le point d'inversion.

$\mathbf{u}_{ads}(\varphi_{\mathbf{i}-1})$  est la teneur en eau de la courbe d'adsorption principale qui correspond à la valeur d'humidité relative du point  $(\mathbf{i} - 1)$  et  $\mathbf{u}_{ads}(\varphi)$  celle qui correspond à l'humidité relative du point d'inversion.

### Modèle de Pedersen

Pedersen [22] a proposé un modèle empirique pour déterminer les courbes intermédiaires en se basant sur les travaux de Hansen [27]. D'après Pedersen, les courbes intermédiaires se déplacent d'une manière asymptotique vers les courbes principales d'adsorption ou de désorption selon le sens d'évolution de l'histoire de la teneur en eau dans le matériau (Figure III-16). L'expression analytique des capacités hydriques des courbes intermédiaires d'adsorption/désorption, peut être déterminée en connaissant les capacités hydriques des courbes principales comme suit :

Pour un processus d'adsorption intermédiaire :

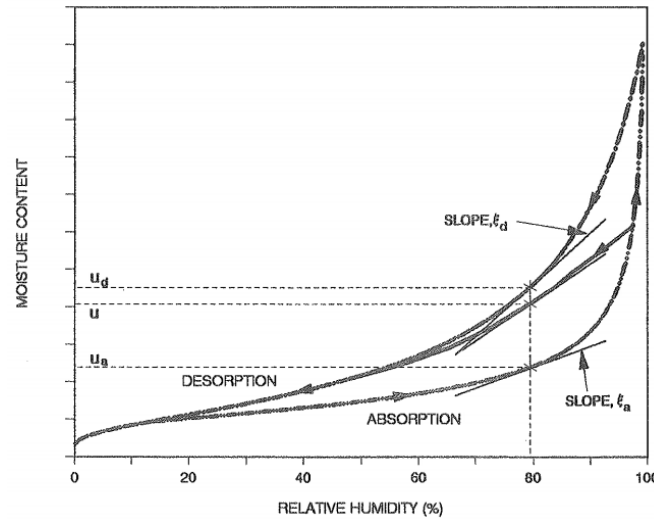
$$\xi_{hys,ads} = \frac{\alpha(\mathbf{u} - \mathbf{u}_{ads})^\gamma \xi_{dés} + (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{dés})^\gamma \xi_{ads}}{(\mathbf{u}_{dés} - \mathbf{u}_{ads})^\gamma} \quad (\text{III-10})$$

Pour un processus de désorption intermédiaire :

$$\xi_{hys,dés} = \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{u}_{ads})^\gamma \xi_{dés} + \varepsilon(\mathbf{u} - \mathbf{u}_{dés})^\gamma \xi_{ads}}{(\mathbf{u}_{dés} - \mathbf{u}_{ads})^\gamma} \quad (\text{III-11})$$

$\xi_{hys,ads}$  et  $\xi_{hys,dés}$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) sont les capacités d'adsorption/désorption des courbes intermédiaire d'hystérésis,  $\mathbf{u}_{ads}$  et  $\mathbf{u}_{dés}$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) sont les courbes principales d'adsorption et de désorption respectivement,  $\xi_{ads}$  et  $\xi_{dés}$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) sont les capacités d'adsorption et de désorption respectivement,  $\alpha$ ,  $\gamma$  et  $\varepsilon$  sont des constantes empiriques.

Pour les constantes empiriques  $\alpha$ ,  $\gamma$  et  $\varepsilon$ , Pedersen propose les valeurs suivantes respectivement : 0.1, 2 et 0.1. Par contre, il a été démontré récemment que ces coefficients doivent être déterminés pour chaque matériau étudié [16, 17].



**Figure III-16.** Schéma représentatif d'une courbe intermédiaire selon le modèle de Pedersen [22]

#### Modèle de Huang

Huang *et al.* [23] ont développé un modèle d'hystérésis pour décrire les courbes de sorption intermédiaires dans le sol en se basant sur le modèle KP (Kool et Parker [28]). La modélisation des courbes de sorption est faite avec le modèle VG (Van Genuchten [29]). Selon Huang *et al.* [23], les courbes intermédiaires prennent la même forme des courbes principales d'adsorption/désorption, c'est-à-dire, ils ont les mêmes paramètres de forme des courbes principales selon la phase (adsorption ou désorption). Ainsi, les courbes intermédiaires s'expriment comme suit :

Pour un processus d'adsorption intermédiaire :

$$\mathbf{u}_{hys,ads}(\mathbf{i}) = \mathbf{u}_r(\mathbf{i}) + (\mathbf{u}_s(\mathbf{i}) - \mathbf{u}_r(\mathbf{i})) \frac{\mathbf{u}_{ads}(\mathbf{i})}{\mathbf{u}_{sat}} \quad (\text{III-12})$$

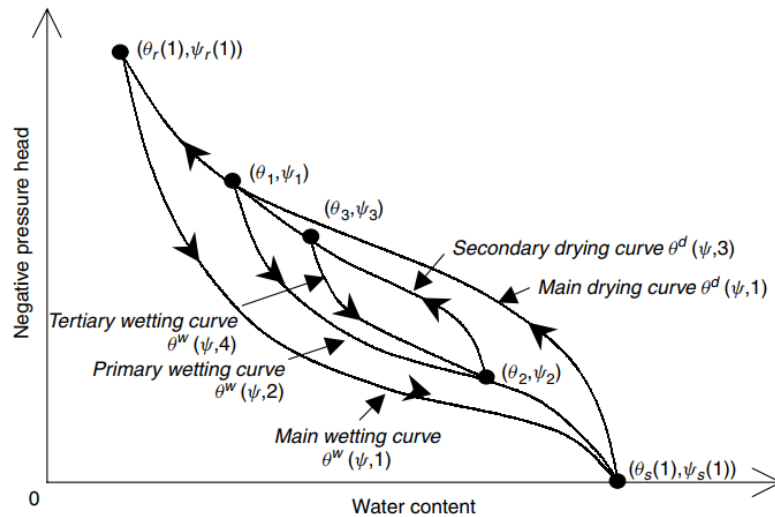
Pour un processus de désorption intermédiaire :

$$\mathbf{u}_{hys,dés}(\mathbf{i}) = \mathbf{u}_r(\mathbf{i}) + (\mathbf{u}_s(\mathbf{i}) - \mathbf{u}_r(\mathbf{i})) \frac{\mathbf{u}_{dés}(\mathbf{i})}{\mathbf{u}_{sat}} \quad (\text{III-13})$$

$u_{hys,ads}$  et  $u_{hys,dés}$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) sont les teneur en eau des courbes intermédiaires d'adsorption et de désorption respectivement,  $u_{ads}$  et  $u_{dés}$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) sont les courbes principales d'adsorption/désorption,  $u_{sat}$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) est la teneur en eau de saturation,  $u_s$  et  $u_r$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) sont les teneurs en eau de saturation et résiduelle respectivement et «  $i$  » dénote le point d'inversion, sachant que sur les courbes principales on a  $u_s = u_{sat}$  et  $u_r = 0$ .

On remarque que pour déterminer  $u_{hys,ads}$  et  $u_{hys,dés}$  on doit déterminer  $u_r$  et  $u_s$  aux points d'inversion. Pour ce faire, Huang suppose que la  $i^{\text{ème}}$  courbe intermédiaire croise la courbe intermédiaire précédente au point d'inversion précédent  $i - 1$ . C'est-à-dire on a deux points qui font partie de la même courbe et il nous faut la détermination de l'expression mathématique qui permet d'avoir tous les points de cette courbe en fonction de l'humidité relative (Figure III-17). Cela se traduit mathématiquement, pour un processus de désorption, par le système suivant :

$$\begin{cases} u_{hys,dés}(i) = u_r(i) + (u_s(i) - u_r(i)) \frac{u_{ads}(i)}{u_{sat}} \\ u_{hys,dés}(i-1) = u_r(i) + (u_s(i) - u_r(i)) \frac{u_{ads}(i-1)}{u_{sat}} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$



**Figure III-17.** Schéma représentatif des variations intermédiaires selon le modèle de Huang [23]

La résolution de ce système à deux équations et deux inconnues nous permet de déterminer  $u_r(i)$  et  $u_s(i)$  qui sont nécessaires pour décrire la courbe intermédiaire de désorption en question. Pour une courbe intermédiaire de désorption le calcul est fait d'une manière analogique.

*Modèle de Merakeb*

Merakeb *et al.* [24] proposent un modèle basé sur une approche thermodynamique pour la description de l'évolution de la teneur en eau dans les matériaux poreux en fonction de l'humidité relative pour les courbes principales et intermédiaires. Les auteurs de ce modèle s'intéressent à la variation de l'enthalpie accompagnant les processus d'adsorption/désorption et sa dépendance de l'état hydrique du matériau. Ils proposent une loi logarithmique pour décrire cette relation :

$$\Delta H_s = A. \ln\left(\frac{u}{u_s}\right) \quad (\text{III-15})$$

Où  $\Delta H_s$  est l'enthalpie molaire (ou la chaleur de sorption) exprimée en (J.mol<sup>-1</sup>),  $A$  est une constante liée à la chaleur molaire totale de mouillage.  $u$  et  $u_s$  (kg.kg<sup>-3</sup>) sont les teneur en eau du matériau et de saturation respectivement.

D'autre part, l'équilibre thermodynamique avec la pression de vapeur saturante, qui définit la relation entre la variation de l'enthalpie et l'humidité relative est décrit par la relation :

$$\Delta H_s = RT. \ln(\varphi) + H_s \quad (\text{III-16})$$

Où  $R$  (8.314 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) est la constante des gaz parfaits et  $H_s$  (J.mol<sup>-1</sup>) est l'enthalpie de référence.

L'égalité des équations (III-15) et (III-16) permet d'avoir :

$$\ln\left(\frac{u}{u_s}\right) = B. \ln(\varphi) . \exp(a. \varphi) \quad (\text{III-17})$$

$B$  est un paramètre thermodynamique et  $a$  est une constante de calibration.

Pour des variations de teneur en eau intermédiaires, les auteurs ont rajouté à l'équation (III-17) un terme appelé « terme de raccord » entre les courbes d'adsorption et de désorption, comme suit :

$$\ln\left(\frac{u}{u_s}\right) = B \ln(\varphi) . \exp(a. \varphi) + \Delta B \ln(\varphi) . \exp(\alpha. \varphi) \quad (\text{III-18})$$

Pour un point d'inversion ( $i$ ), les paramètres  $\Delta B$  et  $\alpha$  sont exprimés de la manière suivante pour un processus d'adsorption intermédiaire :

$$\Delta B_{ads} = \frac{\ln\left(\frac{u_i}{u_s}\right) - B_{ads} \cdot \exp(\alpha\varphi_i)}{\ln(\varphi_i) \cdot \exp(\alpha_{ads}\varphi_i)} \quad (\text{III-19})$$

$$\alpha_{ads} = \frac{1}{\varphi_i} \ln\left(\frac{\ln\left(\frac{u_i}{u_s}\right)}{B_{ads}\varphi_i}\right) \quad (\text{III-20})$$

De même pour un processus de désorption intermédiaire :

$$\Delta B_{dés} = \frac{\ln\left(\frac{u_i}{u_s}\right) - B_{dés} \cdot \exp(\alpha\varphi_i)}{\ln(\varphi_i) \cdot \exp(\alpha_{dés}\varphi_i)} \quad (\text{III-21})$$

$$\alpha_{dés} = \frac{1}{\varphi_i} \ln\left(\frac{\ln\left(\frac{u_{i_{dés}} - u_{i_{ads}}}{u_s}\right)}{B_{dés}\varphi_i}\right) \quad (\text{III-22})$$

La projection du point  $(\varphi_i, u_i)$  sur les courbes principales d'adsorption/désorption permet d'avoir les teneurs en eau  $u_{i_{ads}}$  et  $u_{i_{dés}}$  respectivement (Figure III-18).

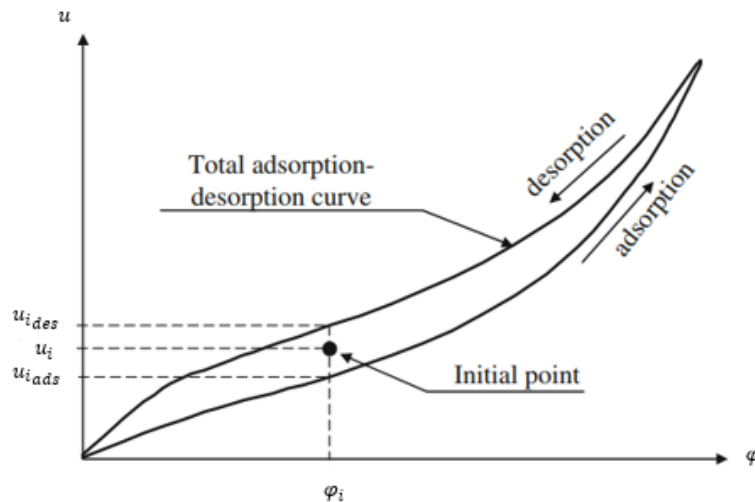
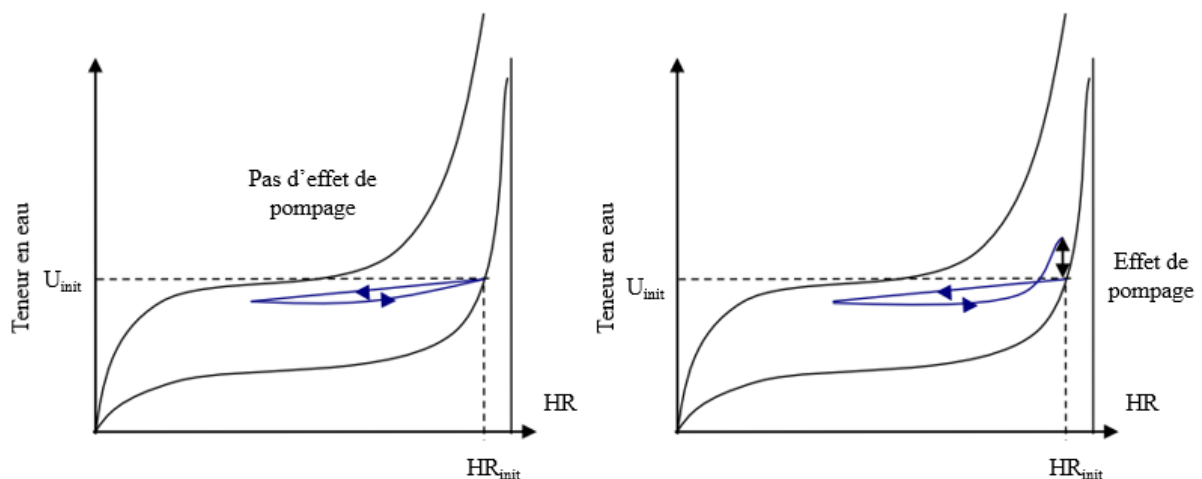


Figure III-18. Paramètres du cycle intermédiaire [24]

#### IV.7.2. Différences entre les modèles d'hystérésis

On vient de montrer qu'il existe dans la littérature différents modèles pour la modélisation du phénomène d'hystérésis. Chacun d'entre eux décrit d'une manière différente les évolutions

intermédiaires de la teneur en eau dans les matériaux poreux. La différence principale entre ces modèles régit principalement dans le principe de la fermeture des courbes intermédiaires. C'est-à-dire si on part d'un point, caractérisé par une teneur en eau  $u_i$  et une humidité relative  $\varphi_i$ , dans un processus intermédiaire (adsorption ou désorption), est ce que dans le processus inverse on se retrouve au même point de départ ( $\varphi_i, u_i$ ) ou non ? En d'autres termes, est ce que la courbe intermédiaire se ferme ou non après un cycle d'adsorption/désorption intermédiaire. En réalité, ce phénomène est étudié expérimentalement et la fermeture des courbes intermédiaires est bien vérifiée [30]. Cependant, pour certains modèles la non vérification de cette condition résulte dans un décalage par rapport au point de départ. Ce décalage, après plusieurs cycles d'adsorption/désorption intermédiaires, engendre une accumulation des écarts. Cet effet, appelé « Effet de pompage (Pumping effect) » peut conduire à une incertitude importante sur les évolutions de l'humidité relative dans les matériaux (Figure III-19).



**Figure III-19.** Cycles de sorption-désorption sans et avec effet de pompage [16]

Pour les modèles présentés, les modèles de Mualem et de Huang vérifient bien le principe de fermeture des courbes intermédiaires d'adsorption/désorption [17]. Cependant ce n'est pas le cas pour le modèle de Merakeb et celui de Pedersen [16]. Il faut noter que le risque d'avoir un effet de pompage augmente lors de la simulation des conditions réelles où l'évolution de l'humidité relative ne suit pas un sens spécifique en raison des conditions externes fortement fluctuantes.



### IV.7.3. Choix du modèle et implémentation

#### *Choix du modèle*

Dans notre cas, pour le béton de bois de palmier dattier, la difficulté était dans la modélisation des données expérimentales des courbes principales d'adsorption/désorptions par les modèles de fit utilisés dans les modèles d'hystérésis présentés. Huang adopte le modèle VG, Pedersen propose son modèle empirique et Merakeb utilise l'approche thermodynamique, pour la modélisation des courbes de sorption. L'utilisation de ces différentes approches pour la modélisation des données expérimentales du DPC a conduit à un coefficient  $R^2$  faible par rapport à celui obtenu par le fit à l'aide du modèle GAB. Ces différences entre les modèles peuvent être liées à la nature du matériau ou à la gamme d'humidité étudiée [10]. Dans le cas du modèle Mualem, il est possible d'introduire la fonction des courbes principales de sorption quelque soit le modèle de fit utilisé. Cet avantage nous a permis d'utiliser le modèle GAB qui a offert le meilleur fit des données expérimentales du DPC. Donc dans ce travail le modèle utilisé pour la prédiction des courbes intermédiaires d'hystérésis est le modèle de Mualem en se basant sur le fit GAB obtenu par Chennouf *et al.* [10].

#### *Implémentation*

Les matériaux poreux se caractérisent par un comportement hystérétique très important. Au cours des processus successifs d'adsorption et de désorption, des quantités considérables d'eau sont retenues dans les pores du fait des forces capillaires (Ink Bottle effect). Afin de considérer cette propriété dans les calculs du transfert d'humidité, le modèle d'hystérésis de Mualem [21, 25, 26] a été mis en œuvre avec le modèle de Kunzel, car ce dernier donne des résultats relativement meilleurs dans notre cas d'étude. La description de ce modèle et les formules décrivant les courbes intermédiaires d'hystérésis sont détaillées dans la section IV.7.1. Ce modèle a été adopté dans plusieurs études et les résultats obtenus ont été comparés à la fois avec le cas classique sans effet d'hystérésis et avec des données expérimentales, et ont montré des améliorations remarquables dans la prédiction des profils de l'humidité relative [31, 32]. Dans le présent travail, ce modèle est utilisé pour la première fois sur le DPC afin de mettre en évidence et de discuter les différences avec le cas simple (sans effet d'hystérésis) en faisant référence à la réalité (données expérimentales).

Les courbes intermédiaires ont été générées à partir de la courbe de désorption principale. Ce choix a été fait car, après sa fabrication, notre mur a été partiellement séché dans des conditions

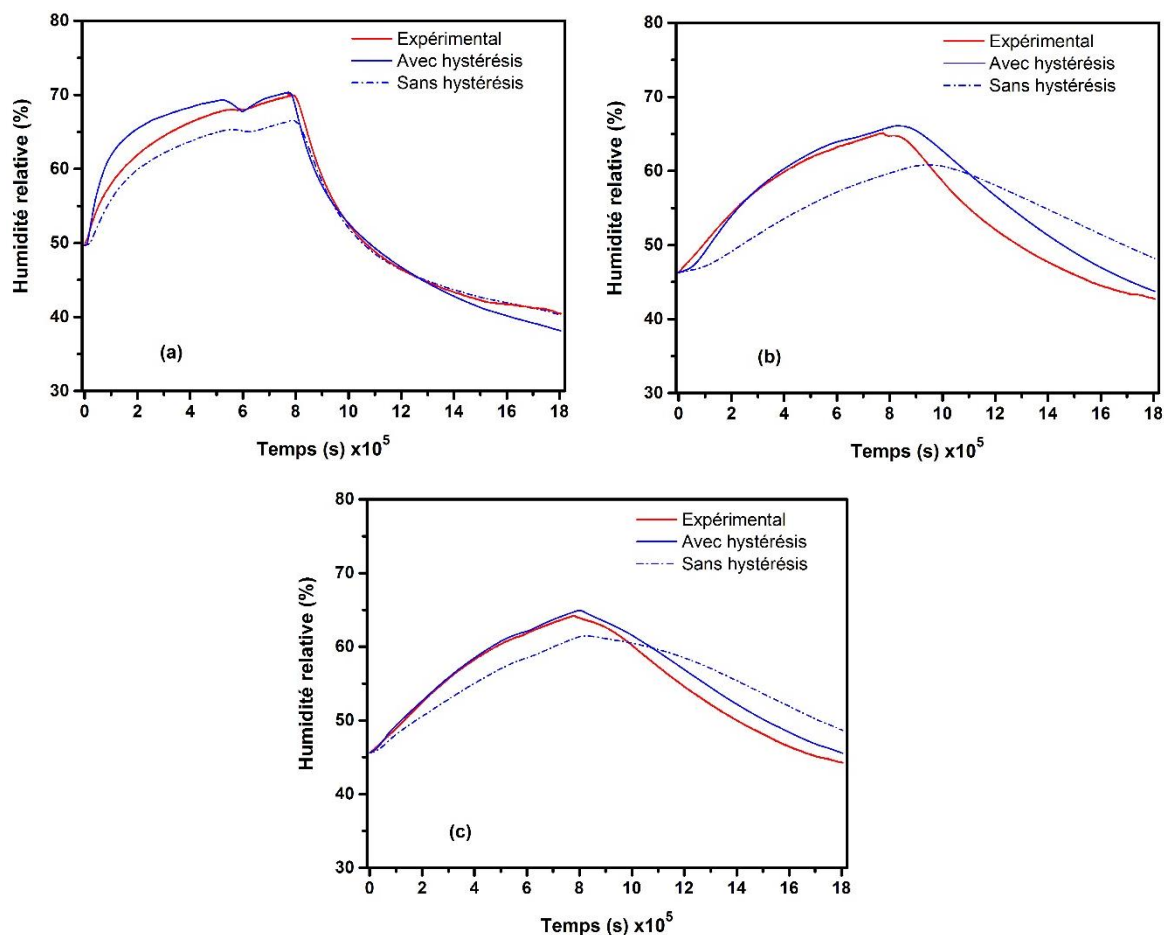
ambiantes ( $\sim 20$  °C et 50% HR) avant de commencer les tests. Le fait que le mur n'a pas été séché totalement signifie qu'il est encore sur la courbe de désorption principale (on assume un état saturé après la fabrication). Pour générer les courbes, un code Matlab est créé (voir Annexe A) en introduisant les formules GAB des courbes principales d'adsorption/désorption ainsi que l'historique de la teneur en eau représentant les conditions initiales pour le test. La courbe d'adsorption principale utilisée dans le test « sans hystérésis », est remplacée par les deux courbes intermédiaires déterminées selon la phase.

Le code créé peut être généralisé pour déterminer les courbes intermédiaires d'hystérésis dans des conditions réelles où le changement de sens dans l'évolution de la teneur en eau est très fréquent (les points d'inversion). Ces points d'inversion se localisent de la manière suivante : On note  $u_i$  la valeur actuelle de la teneur en eau du matériau qui va passer à la valeur  $u_{i+1}$ . On parle d'un point d'inversion quand on a  $(u_{i+1} - u_i) * (u_i - u_{i-1}) < 0$ . Si c'est le cas, le code détermine s'il s'agit d'un processus d'adsorption ou de désorption après ce point d'inversion en vérifiant le signe de la différence  $(u_{i+1} - u_i)$  ( $> 0 \rightarrow$  adsorption /  $< 0 \rightarrow$  désorption). A ce moment-là, le code calcule la courbe intermédiaire en l'utilisant pour la suite du test jusqu'à détecter un nouveau point d'inversion ...etc.

#### IV.7.4. Résultats

Les résultats de ces nouvelles simulations sont présentés dans les figures III-20.a, b, c pour les différentes profondeurs du mur en DPC. Une amélioration significative des profils d'humidité relative simulés est obtenue lors de la prise en compte de l'effet d'hystérésis dans les calculs. Les différences maximales avec les résultats expérimentaux sont réduites à 4.5% et 2.3% à 7.5 et 12.5 cm de profondeur respectivement. De plus, on peut remarquer que le temps de réponse numérique est également réduit. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Promis *et al.* [32]. Ces auteurs ont conclu que la prise en considération de l'effet d'hystérésis dans les variations dynamiques à l'aide du modèle de Mualem donne de meilleurs résultats. Il est important de noter que l'historique de la teneur en eau dans le mur est encore inconnu, et le fait de se baser sur la courbe principale de désorption reste une approximation bien qu'elle semble proche de l'expérimental. En fait, les tests de transfert de chaleur ont d'abord été effectués avant de procéder aux tests de transfert d'humidité, ce qui aurait pu encore sécher le mur partiellement. Par conséquent, la valeur initiale de la teneur en eau doit être inférieure à celle de la courbe principale de désorption. Cela pourrait être la raison pour laquelle les courbes avec effet

d'hystérésis sont situées au-dessus des résultats expérimentaux contrairement au modèle basé sur l'adsorption principale. En outre, l'hétérogénéité et la procédure de préparation du composite ont un effet important sur les propriétés finales du matériau [9, 10]. De plus, le changement d'échelle (du matériau au mur) peut contribuer à augmenter les sources possibles d'incertitudes sur les propriétés physiques du matériau considéré, comme l'ont noté Oumeziane *et al.* [20] pour le cas d'un mur en béton de chanvre.



**Figure III-20.** Réponses numériques et expérimentales de la paroi en DPC aux variations « créneau de l'humidité relative », aux profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c). Les courbes simulées sont fournies à la fois pour les deux cas incluant l'effet d'hystérésis et non.

## V. Comparaison de la performance du DPC avec un matériau classique

### V.1. Choix et propriétés du béton classique

Dans cette section, le modèle de Kunzel est utilisé pour évaluer les performances du DPC par rapport à un matériau de construction classique. Selon Benmansour *et al.* [11], le DPC est classé comme matériau isolant, qui répond aux exigences RILEM pour le béton d'agrégats légers et

le béton cellulaire autoclavé. En se référant à cette classification, le Béton Cellulaire Autoclavé (BCA) est choisi à des fins de comparaison et ses propriétés sont obtenues de la base des données du logiciel Wufi [7] et rapportées dans le tableau III-5.

**Tableau III-5 : Les propriétés du béton cellulaire autoclavé (BCA) [7]**

Propriété	Valeur	Propriété	Valeur
Masse volumique à l'état sec [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	600	Capacité thermique à l'état sec [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]	850
Conductivité thermique à l'état sec [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]	0.14	Supplément d'humidité de la conductivité thermique [-]	3.7
Facteur de résistance à la vapeur [-]	8		

## V.2. Scénarios étudiés

**Scénario 1 :** Les murs en DPC et BCA simulés ont été soumis à des variations cycliques extérieures de température tandis que les conditions intérieures étaient maintenues constantes à des valeurs ambiantes ( $T = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 50\%$ ). La variation cyclique consistait en 5 cycles successifs de  $40\text{-}18 \text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $50\%$  d'humidité relative. Tout le test a duré 5 jours.

**Scénario 2 :** Les murs sont soumis à un changement brusque d'humidité relative externe sans changement de température, tandis que les conditions intérieures étaient maintenues constantes ( $T = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 50\%$ ). Les murs (initialement à  $\varphi = 50\%$  et  $T = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sont exposés à une humidité relative constante de  $\varphi = 75\%$  pendant 10 jours.

Les conditions des deux scénarios sont illustrées dans la figure III-21.

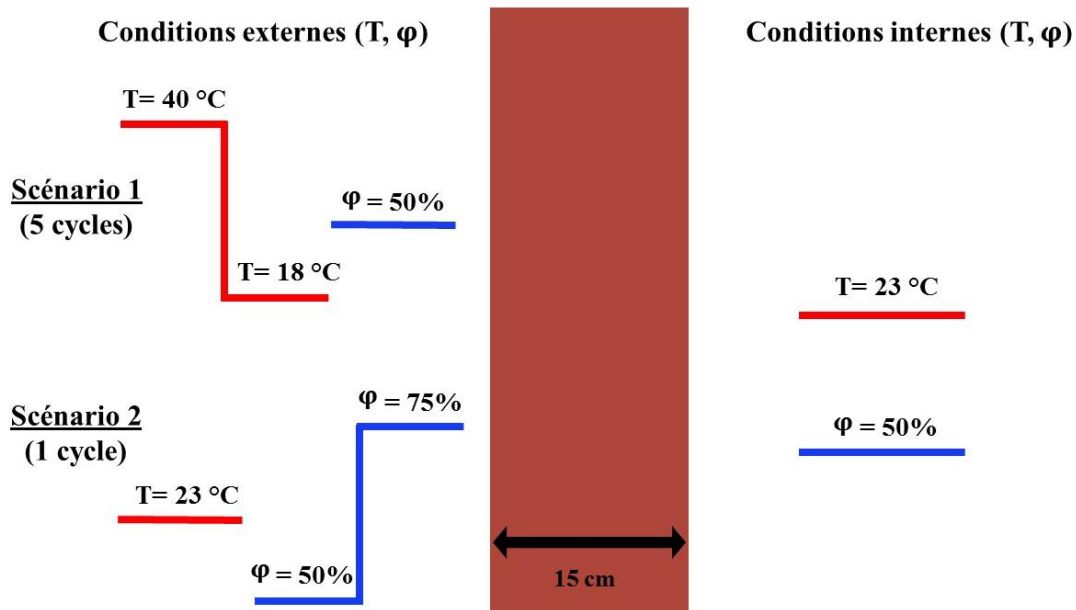
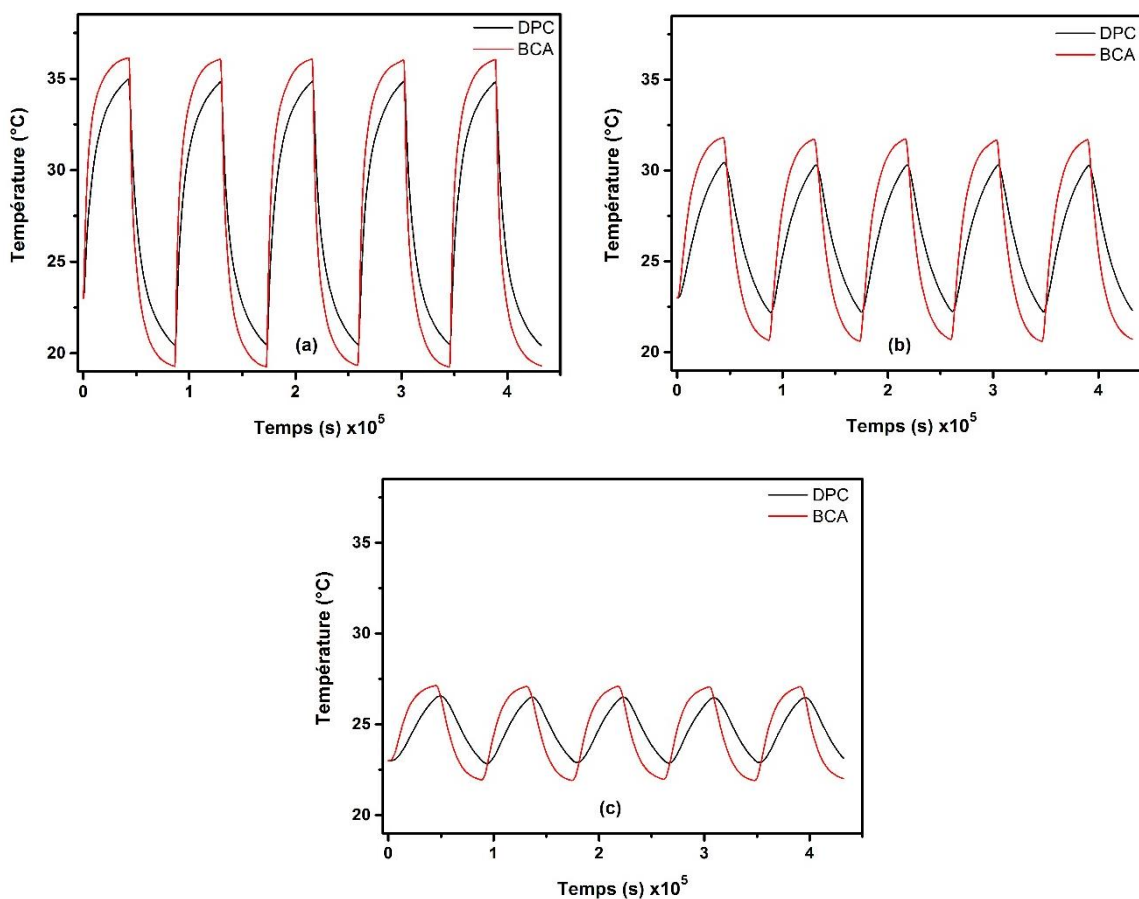


Figure III-21. Conditions des scénarios 1&2 pour la comparaison avec le BCA

### V.3. Comportement thermique

Les variations de température simulées à l'intérieur des murs à 3 cm, 7.5 cm et 12.5 cm de profondeur sont présentées dans la figure III-22.a, b, c). Les amplitudes des variations de température à l'intérieur des deux parois sont présentées dans le tableau III-6. Les amplitudes des variations de température à l'intérieur de la paroi en DPC sont nettement inférieures à celles de la paroi en BCA, quelle que soit la profondeur considérée. La paroi en DPC a été moins influencée par les conditions dynamiques externes de température. En outre, un retard peut être remarqué dans la réponse du DPC. En effet, à 12.5 cm de profondeur, la réponse de la paroi en DPC est retardée d'une heure et 11 minutes par rapport à la réponse de la paroi en BCA (Figure III-22.c). D'autre part, le pique de température sur la surface externe a pris 2 heures et 21 minutes pour arriver à la surface interne (le déphasage) pour le mur en DPC et seulement 49 minutes dans le cas du mur en BCA. De même, le taux d'amortissement définit le rapport entre les différences les plus grandes de température enregistrées sur les surfaces interne et externe ( $\Delta T_{\text{int}} / \Delta T_{\text{ext}}$ ). Le calcul de ce rapport a donné des valeurs proches pour les deux matériaux (9.5% pour le DPC et 10.6% pour le BCA). Afin de mieux évaluer les performances thermiques des matériaux étudiés, on a calculé les diffusivité et effusivité thermiques de chaque matériau à l'état sec (Tableau III-7). Les résultats montrent que la diffusivité thermique du DPC est moins de la moitié de celle du BCA avec une effusivité thermique supérieure pour le DPC. Ces résultats démontrent que le DPC a une inertie thermique importante et peut amortir les

variations de température externes plus efficacement que le BCA, en raison de sa faible diffusivité thermique et le décalage temporel obtenu. En d'autres termes, cette capacité peut offrir une meilleure isolation des bâtiments par rapport au matériau isolant classique. Une isolation aussi efficace peut probablement contribuer à réduire la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement, en garantissant ainsi des niveaux de température confortables pour les habitants.



**Figure III-22.** Profils numériques de température dans les murs en DPC et BCA, à des profondeurs de 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c).

**Tableau III-6 :** Amplitudes des variations de température dans les murs en DPC et BCA

Profondeur [cm]	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	
	DPC	BCA
3	14.51	16.84
7.5	8.26	11.17
12.5	3.71	5.19

**Tableau III-7 : Valeurs des diffusivité et effusivité thermiques des matériaux étudiés**

	<b>DPC</b>	<b>BCA</b>
<b>Diffusivité [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]</b>	1.29 × 10 <sup>-7</sup>	2.75 × 10 <sup>-7</sup>
<b>Effusivité [J.K<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>.s<sup>-0.5</sup>]</b>	514.524	267.208

#### V.4. Comportement hydrique

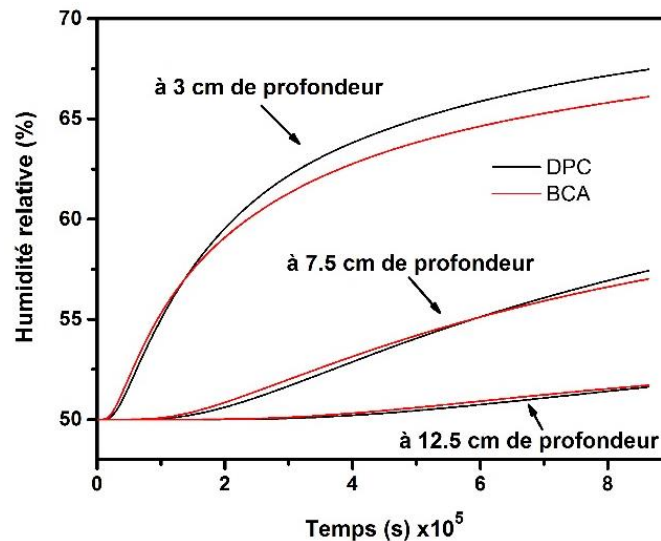
Les évolutions simulées de l'humidité relative à l'intérieur des murs à 3 cm, 7.5 cm et 12.5 cm de profondeur sont présentées sur la figure III-23. Nous pouvons remarquer que les murs en DPC et BCA montrent des évolutions d'humidité relative presque similaires quelle que soit la profondeur (les écarts n'excèdent pas 1.5%). Malgré l'exposition de longue durée à 75% d'humidité relative, un niveau maximal de 67% est atteint à 3 cm de profondeur près du côté extérieur des murs. Alors qu'à 12.5 cm de profondeur, les deux murs n'étaient presque pas affectés par les conditions extérieures. Cela reflète l'inertie hydrique très importante des deux murs et leur capacité à atténuer les variations extérieures. Afin d'évaluer la capacité de stockage d'humidité, et donc la capacité de réguler les variations externes de l'humidité relative, la quantité d'eau  $m$  (kg) absorbée par les deux parois lors de ce test est calculée à l'aide de l'expression suivante [33] :

$$m = \int_V W(x) dv \quad (\text{III-23})$$

Où  $W(x)$  (kg.m<sup>-3</sup>) est la distribution de la teneur en eau dans les murs à la fin du test (Figure III-24) et  $V$  (m<sup>3</sup>) le volume de chaque paroi. Nous pouvons voir pour la paroi en DPC, que la teneur en eau atteint des valeurs très élevées proches de la surface extérieure (40 kg.m<sup>-3</sup>) et diminue progressivement pour atteindre 11 kg.m<sup>-3</sup> à la surface intérieure. Différemment, la distribution de la teneur en eau à travers l'épaisseur de la paroi en BCA était presque linéaire, avec des niveaux non excédant 15.5 kg.m<sup>-3</sup>. Ce résultat s'explique par le fait que le mur en BCA a presque atteint un état d'équilibre tandis que le mur en DPC semble encore capable d'absorber plus d'eau. Notant  $E$ ,  $I$  et  $B$  l'épaisseur, la hauteur et la largeur des murs respectivement, l'équation (III-23) devient :

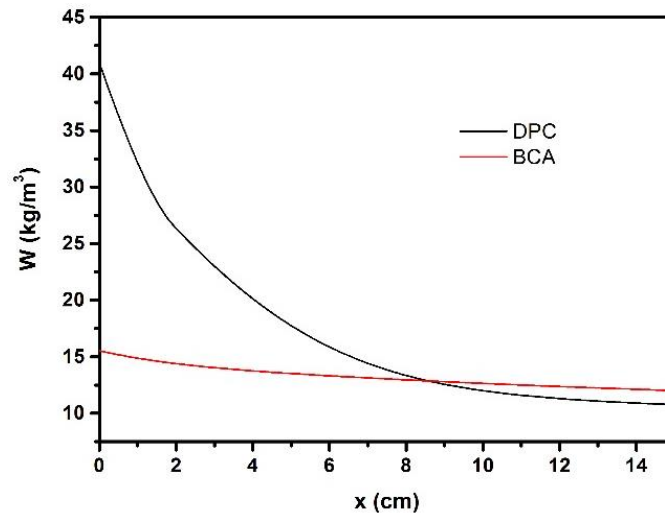
$$m = \int_0^E W(x).I.B dx \quad (\text{III-24})$$

Le calcul des quantités d'eau stockées pendant le test dans les parois en DPC et en BCA donne respectivement 0.6146 kg et 0.3968 kg. Nous pouvons voir que la quantité d'eau absorbée par le mur en DPC est 55% plus grande que celle du mur en BCA. Cette haute capacité de stockage du DPC en raison des fibres naturelles reflète son pouvoir important d'absorber l'humidité de l'air ambiant et atténuer les variations externes d'humidité relative. Enfin, ces résultats numériques à l'échelle du mur, basés sur les propriétés actuelles du matériau, montre que le DPC présente une très grande inertie hydrique comparable à celle des matériaux d'isolation classiques et une capacité de stockage d'humidité encore meilleure. Ensemble, les deux caractéristiques peuvent contribuer plus efficacement à assurer un confort hydrique aux habitants par rapport aux matériaux classiques.



**Figure III-23.** Profils numériques d'humidité relative à différentes profondeurs des murs étudiés





**Figure III-24.** Les distributions numériques de la teneur en eau suivant l'épaisseur des parois en DPC et BCA à la fin du test

## VI. Conclusion

Ce chapitre explore une approche originale incluant l'effet d'hystérésis afin de valider notre modélisation par rapport à l'expérimental cette fois ci, pour un mur en DPC. Cette approche vise à valider les deux modèles mathématiques, à savoir les modèles de Kunzel et Mendes, qui sont résolus numériquement en utilisant la méthode des éléments finis. Les résultats numériques des modèles ont été comparés avec les données expérimentales obtenues pour une paroi en DPC. La comparaison a révélé des performances acceptables pour les deux modèles, en particulier la prédiction des variations de température. De même, la prise en compte de l'effet d'hystérésis dans les modèles a permis une meilleure prédiction du transfert d'humidité à travers le mur en DPC. Enfin nous avons mis en évidence les performances très prometteuses du DPC en termes d'isolation thermique et capacité de rétention d'humidité par rapport à un autre matériau de construction classique.

La prochaine étape, après avoir validé les modèles, est de réaliser une étude de sensibilité sur les paramètres mis en jeu ainsi que les conditions de simulation dans le but de maîtriser les sources d'incertitudes qui peuvent conduire à des écarts dans les profils numériques résultants.

## Références

- [1] T. Alioua, B. Agoudjil, N. Chennouf, A. Boudenne et K. Benzarti, «Dataset on the hygrothermal performance of a date palm concrete wall,» *Data in brief*, vol. 27, 2019.
- [2] N. Chennouf, B. Agoudjil, T. Alioua, A. Boudenne et K. Benzarti, «Experimental investigation on hygrothermal performance of a bio-based wall made of cement mortar filled with date palm fibers,» *Energy and Buildings*, vol. 202, 2019.
- [3] G. Hedenblad, "Measurement of moisture in high performance concrete," presented at Nordic Concrete Federation Mini-Seminar "Moisture Measurement in Concrete Constructions Exposed to Temperature and Moisture Variations, Otaniemi, Espoo, Finland, 1997.
- [4] H. M. Künzl, Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters, Stuttgart: IRB-Verlag, 1995.
- [5] T. Alioua, B. Agoudjil, N. Chennouf, A. Boudenne et K. Benzarti, «Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect,» *Building and Environment*, vol. 163, 2019.
- [6] «Annex 41, Whole building Heat, Air, Moisture Response,» [En ligne]. Available: <http://www.ecbs.org/>.
- [7] WUFI®, WUFI®, [En ligne]. Available: <https://wufi.de/en/software/validation/>.
- [8] C. Maalouf, A. T. Le, S. B. Umuragirwa, M. Lachi et O. Douzane, «Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France,» *Energy and buildings*, vol. 77, pp. 48-57, 2014.
- [9] B. Haba, B. Agoudjil, A. Boudenne et K. Benzarti, «Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material,» *Construction and Building Materials*, vol. 154, p. 963–971, 2017.
- [10] N. Chennouf, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti et F. Bouras, «Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers,» *Construction and Building Materials*, vol. 192, p. Construction and Building Materials, 2018.
- [11] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche et A. Boudenne, «Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building,» *Energy and Buildings*, vol. 81, p. 98–104, 2014.
- [12] A. Goesten, «Heat, Air and Moisture transport in Building Constructions,» Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2015.
- [13] COMSOL Multiphysics user's guide, COMSOL Multiphysics, 2008.
- [14] G. COSTANTINE, Etude et optimisation des performances énergétiques d'une enveloppe en béton de chanvre pour le bâtiment, Reims, France: Université de Reims Champagne-Ardenne, 2018.

- [15] S. O. Mundt-Petersen et L. E. Harderup, «Validation of a one-dimensional transient heat and moisture calculation tool under real conditions,» chez *Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII-International Conference*, Florida USA, 2013.
- [16] D. Lelievre, T. Colinart et P. Glouannec, «Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses,» *Energy and Buildings*, vol. 84, pp. 617-627, 2014.
- [17] Y. A. Oumeziane, Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre, Doctoral dissertation, 2013.
- [18] B. Moujalled, Y. A. Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, C. Lanos et D. Samri, «Experimental and numerical evaluation of the hygrothermal performance of a hemp lime concrete building: A long term case study,» *Building and Environment*, vol. 136, pp. 11-27, 2018.
- [19] A. T. Le, C. Maalouf, T. H. Mai, E. Wurtz et F. Collet, «Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope,» *Energy and buildings*, vol. 42, pp. 1797-1806, 2010.
- [20] Y. Aït Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, F. Collet, S. Pretot et C. Lanos, «Influence of hysteresis on the transient hygrothermal response of a hemp concrete wall,» *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 10, pp. 256-271, 2017.
- [21] Y. Mualem et A. Beriozkin, «General scaling rules of the hysteretic water retention function based on Mualem's domain theory,» *European journal of soil science*, vol. 60, pp. 652-661, 2009.
- [22] C. Pedersen Rode, Combined heat and moisture transfer in building constructions, Thèse de doctorat, 1990.
- [23] H. C. Huang, Y. C. Tan, C. W. Liu et C. H. Chen, «A novel hysteresis model in unsaturated soil,» *Hydrological Processes: An International Journal*, vol. 19, pp. 1653-1665, 2005.
- [24] S. Merakeb, F. Dubois et C. Petit, «Modeling of the sorption hysteresis for wood,» *Wood science and technology*, vol. 43, p. 575-589, 2009.
- [25] Y. Mualem, «A conceptual model of hysteresis,» *Water Resources Research*, vol. 10, pp. 514-520, 1974.
- [26] Y. Mualem, «A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media,» *Water resources research*, vol. 12, pp. 513-522, 1976.
- [27] K. K. Hansen, Sorption isotherms: a catalogue, 1986.
- [28] J. B. Kool et C. J. Parker, «Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties,» *Water Resources Research*, vol. 23, n° 11, pp. 105-114, 1987.

- [29] T. M. Van Genuchten, «A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1,» *Soil science society of America journal*, vol. 44, n° 15, pp. 892-898, 1980.
- [30] Z. Zhang, M. Thiéry et V. Baroghel-Bouny, «A review and statistical study of existing hysteresis models for cementitious materials,» *Cement and concrete research*, vol. 57, pp. 44-60, 2014.
- [31] D. Lelièvre, T. Colinart et P. Glouannec, «Modeling the moisture buffering behavior of a coated biobased building material by including hysteresis,» *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 255-260, 2015.
- [32] G. Promis, O. Douzane, A. T. Le et T. Langlet, «Moisture hysteresis influence on mass transfer through bio-based building materials in dynamic state,» *Energy and Buildings*, vol. 166, pp. 450-459, 2018.
- [33] C. Truesdell, *Linear Theories of Elasticity and Thermoelasticity: Linear and Nonlinear Theories of Rods, Plates, and Shells*, Springer, 2013.

# **Chapitre IV : Etude de sensibilité des modèles hygrothermiques**

## I. Introduction

Dans le chapitre IV, la sensibilité du modèle hygrothermique de Kunzel à un large éventail de paramètres et de conditions est étudiée à l'échelle du mur. Le matériau utilisé dans cette étude est le béton de bois de palmier dattier DPC (Date Palm Concrete). La sensibilité relative est calculée pour différents pourcentages de variation et à différentes profondeurs pour deux cas : variations de chaleur et d'humidité. De plus, l'effet des conditions initiales et de la position des capteurs a été démontré à différentes profondeurs du mur en DPC. Enfin, certains termes ont été négligés dans le modèle faisant référence à des travaux antérieurs afin d'étudier la possibilité de simplifier le modèle sans affecter sa précision.

## II. Conditions expérimentales

Pour des tests plus réalistes, les conditions aux limites utilisées dans cette étude ont été obtenues de l'expérience réalisée pour l'application au DPC (Chapitre III section II).

Les scénarios appliqués au mur en DPC utilisés sont les scénarios 1 et 3 du chapitre précédent, décrits comme suit (Tableau IV-1) :

a) Plusieurs cycles avec changement de température de 40 °C à 18 °C à une valeur constante d'humidité relative (50% HR). Ce scénario consiste en 4 cycles de 24 heures (avec 12 h à 40 °C et 12 h à 18 °C pour chaque cycle).

b) Un changement graduel d'humidité relative de 75% à 33% à une valeur constante de température (23 °C). La durée totale de ce scénario est de 18 jours, consistant en 9 jours à 75% HR suivis de 9 jours à 33% HR.

**Tableau IV-1** : Conditions aux limites externes (les valeurs entre parenthèses correspondent aux conditions initiales au début des test, i.e. 23°C and 50% HR)

Scénarios	Conditions externes		Durée
	T [°C]	$\varphi$ [%]	
Scénario 1	(23) → 40 → 18	50	4 cycles de 24 heures (12 h à 40°C, 12 h à 18°C)
Scénario 3	23	(50) → 75 → 33	18 jours (9 jours à 75%, 9 jours at 33% HR)

## 1 Modèle mathématique

Le modèle mathématique décrivant le transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction utilisé dans cette étude se réfère à Kunzel [1], il est décrit par les équations suivantes :

*Transfert d'humidité*

$$\xi_{\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \frac{\partial(p_{sat}\varphi)}{\partial x} + D_l \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right) \quad (IV-1)$$

Où  $\xi_{\varphi}$  (kg.m<sup>-3</sup>) est la capacité de sorption,  $\delta$  (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>) est la perméabilité du matériau à la vapeur d'eau,  $p_{sat}$  (Pa) est la pression de saturation et  $D_l$  (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>) est le coefficient de transfert d'eau liquide sous gradient d'humidité relative, il est exprimé par les coefficients suivants: le coefficient de conduction de liquide  $D_{l,\varphi}$ , le coefficient de succion capillaire  $D_{l,ws}$  et le coefficient de redistribution  $D_{l,ww}$ .

*Transfert de chaleur*

$$\left( \rho_0 c_{p_0} + c_{p_l} w \right) \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + l_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \frac{\partial(p_{sat}\varphi)}{\partial x} \right) \quad (IV-2)$$

Où  $\rho_0$  (kg.m<sup>-3</sup>) et  $c_{p_0}$  (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) sont respectivement la masse volumique et la capacité thermique du matériau à l'état sec,  $c_{p_l}$  est la capacité thermique de l'eau,  $w$  est la teneur en eau en (kg.m<sup>-3</sup>),  $\lambda$  (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) est la conductivité thermique du matériau et  $l_v$  (J.kg<sup>-1</sup>) est la chaleur latente de vaporisation.

La même description des flux aux limites présentée dans le chapitre III section III.1.1 est adoptée dans cette étude en raison des conditions réelles issues de l'expérimental :

Flux de chaleur aux limites :

$$Q_{\Omega} = h(T_{\Omega} - T_{amb}) \quad (IV-3)$$

Où  $T_{\Omega}$  et  $T_{amb}$  en (K) sont les températures de surface et de l'environnement extérieur respectivement et  $h$  (W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>) est le coefficient d'échange thermique aux limites.

Flux d'humidité aux limites :

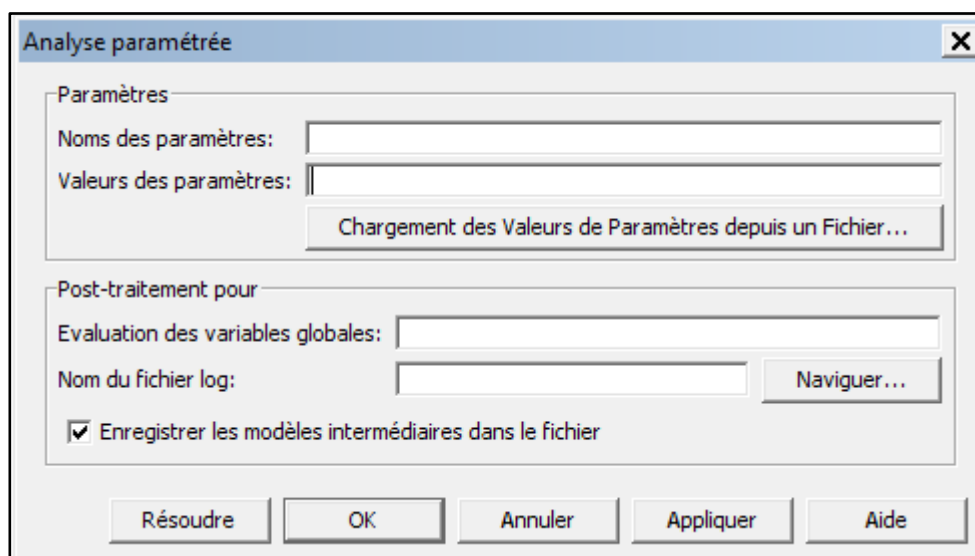
$$G_{\Omega} = \beta(P_{v,\Omega} - P_{v,amb}) \quad (IV-4)$$

Où  $P_{v,\Omega}$  et  $P_{v,amb}$  en (Pa) sont les pressions de vapeur à la surface et de l'environnement extérieur respectivement. Le coefficient de transfert de vapeur d'eau aux limites  $\beta$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ) est défini comme suit :

$$\beta = 7.10^{-9}.h_c \quad (IV-5)$$

Où  $h_c$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) est le coefficient d'échange convectif.

La résolution du problème est réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics pour la configuration décrite dans le chapitre III section II.2 COMSOL offre une option appelée « Parametric sweep » ou « Analyse paramétrée » (voir la figure IV-1), qui permet d'introduire les différentes valeurs des paramètres souhaitées, ensuite le logiciel refait les simulations pour chaque valeur automatiquement en enregistrant chaque résultat séparément pour l'exploitation.



*Figure IV-1. Réalisation de l'analyse paramétrique sur COMSOL*

### III. Etat de l'art sur la sensibilité des modèles hygrothermiques

Les modèles hygrothermiques sont utilisés pour décrire les transferts de chaleur et de masse dans les enveloppes des bâtiments (murs, toitures, sols... etc.). Ces modèles représentent un système composé d'au moins deux équations (pour le transfert d'énergie et d'humidité ; dans certains autres cas, le transfert d'air est également considéré en rajoutant une troisième équation



au système) avec deux inconnues (la température pour le transfert de chaleur et l'humidité relative ou la teneur en eau pour le transfert d'humidité). Les coefficients de ces systèmes sont définis à l'aide des propriétés expérimentales. Certaines de ces propriétés sont décrites par des valeurs constantes tandis que d'autres peuvent dépendre des autres propriétés du matériau ou des inconnus du système eux-mêmes. La détermination expérimentale de ces paramètres représente une source d'erreurs dans la solution finale du système. Ce problème a poussé les chercheurs à étudier la sensibilité des modèles hygrothermiques à la variation des différents paramètres en essayant d'améliorer autant que possible les résultats numériques afin d'avoir de meilleures prévisions de température et d'humidité relative.

Les études de sensibilité sont très souvent adoptées dans presque tous les domaines. L'analyse de sensibilité globale (GSA) est utilisée pour déterminer la sensibilité des variables de sortie à la variation de différentes variables d'entrée, où les indices de sensibilité sont généralement déterminés par la méthode de Monte Carlo [2]. L'analyse de sensibilité locale (LSA) est utilisée lorsqu'il s'agit d'étudier la sensibilité par rapport à un paramètre donné [3]. Dans le domaine des matériaux hygroscopiques de construction, les simulations sont simplement réexécutées pour différentes valeurs des paramètres ou des conditions aux limites où les nouveaux profils sont comparés avec le cas de référence. Mendes *et al.* [4] ont effectué une analyse de sensibilité sur leur modèle qui est basé sur la théorie de Phillip et De Vries. Ils ont défini différents sous-modèles simplifiés dans lesquels ils négligent ou ils fixent à une valeur constante, des coefficients de transport pour évaluer leur influence sur les résultats. Il a été souligné dans leur travail que le fait de négliger le transfert d'humidité peut conduire à une sous-estimation du flux de chaleur annuel intégré jusqu'à 59%, ce qui entraîne une sous-estimation de la consommation d'énergie. Le *et al.* [5] ont effectué une autre analyse du modèle de Mendes à l'échelle du bâtiment. Ils ont étudié l'impact de variation des coefficients de transport, de l'isotherme de sorption, du taux de ventilation et de l'existence des habitants, sur les conditions intérieures et la consommation d'énergie. Il a été constaté encore une fois que la prise en compte du transfert d'humidité dans les calculs a un effet significatif sur la consommation d'énergie qui est également fortement influencée par le taux de ventilation. Bart *et al.* [6] ont étudié la sensibilité du modèle de Kunzel à l'échelle du mur à la masse volumique, la conductivité thermique, la capacité thermique, le facteur de résistance à la diffusion de vapeur, la courbe de sorption et la position des capteurs. Leurs résultats montrent que les paramètres qui influencent le plus les profils d'humidité relative sont l'isotherme de sorption et le facteur de résistance à la diffusion

de vapeur. Un autre travail sur le modèle de Kunzel fait référence à Oumeziane *et al.* [7] qui ont étudié l'effet de la masse volumique et des conditions initiales sur les résultats numériques. Ils ont conclu que les paramètres étudiés influencent à la fois les profils de température et d'humidité relative en raison des effets de couplage entre les transferts de chaleur et d'humidité. Othmen *et al.* [8] ont effectué également une analyse de sensibilité sur le modèle de Kunzel en utilisant la méthode LSA. Les auteurs de ce travail ont étudié l'effet de certaines propriétés des matériaux ainsi que les conditions aux limites et initiales pour deux murs en tuffeau et en béton de chanvre. Il a été conclu dans cette analyse que le coefficient de transfert de chaleur par convection influence à la fois les profils de température et de teneur en eau, en plus de l'isotherme de sorption qui affecte directement la distribution de la teneur en eau dans le mur.

#### **IV. Etude de sensibilité paramétrique**

La première partie de l'étude se focalise sur l'influence des paramètres d'entrée sur les résultats du modèle. Des erreurs dans ces paramètres sont généralement présentes en raison des incertitudes dans les mesures des propriétés à l'échelle du matériau ou de l'utilisation de ces propriétés à des échelles plus grandes (mur et bâtiment). Cette dernière raison est responsable de grandes incertitudes sur les valeurs des propriétés car la fabrication de plusieurs blocs ou d'un échantillon de grandes dimensions par exemple, génère des hétérogénéités de composition et donc une gamme d'incertitudes plus grande sur les propriétés des matériaux [7]. Comme mentionné précédemment, il existe de nombreuses méthodes d'analyse de sensibilité en fonction du nombre de variables définies pour être variées ensemble, telles que l'analyse de sensibilité globale (GSA) et l'analyse de sensibilité locale (LSA). La GSA consiste à déterminer la sensibilité des grandeurs de sortie aux variations de différents paramètres d'entrée, tandis que la LSA est utilisée lorsqu'on cherche à étudier la sensibilité d'une certaine grandeur de sortie pour la variation d'un paramètre donné. Dans le domaine des matériaux hygroscopiques de construction, nous nous intéressons à une méthode locale où les simulations sont tout simplement réexécutées pour différentes valeurs de paramètres et conditions où les nouveaux profils sont comparés au cas de référence. Dans ce travail, afin d'évaluer cette influence sur les profils de température et d'humidité relative résultants, la sensibilité relative est calculée à l'aide de la formule suivante [9]:

$$S(\%) = \frac{|Y_{x-\Delta x} - Y_{x+\Delta x}|}{2Y_0} \cdot 100 \quad (\text{IV-6})$$

Où  $Y$  est la solution du modèle ( $T$  ou  $\varphi$ ),  $Y_0$  est la solution de référence obtenue quand aucun paramètre n'est varié (valeurs de référence) et  $x$  représente le paramètre varié de  $\Delta x$ .

Cette sensibilité relative est calculée pour différents pourcentages de variation des paramètres, allant de 5% à 25% pour démontrer l'effet à l'échelle du matériau (faibles incertitudes) en plus des échelles du mur et de bâtiment (fortes incertitudes) ainsi que pour discuter l'évolution de la sensibilité en fonction : du pourcentage de variation des paramètres, du temps et de la profondeur dans le mur.

La sensibilité du modèle de Kunzel est étudiée pour les paramètres suivants : la capacité thermique, le coefficient de transfert convectif extérieur, la conductivité thermique, les facteurs de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, la masse volumique et l'isotherme de sorption. Chaque paramètre a été varié séparément avec 6 pourcentages ( $\Delta x$  : -5%, +5%, -15%, +15%, -25% et +25%) tout en gardant les autres paramètres à leurs valeurs de référence. Dans le dernier cas, tous les paramètres ont été variés simultanément avec les 6 pourcentages et la sensibilité a été calculée pour la variation de tous ces paramètres ensemble afin de déterminer toute influence entre les paramètres. Cela a été fait pour chaque scénario des deux scénarios décrits dans la section II (variations de chaleur et d'humidité). Tous les cas étudiés sont présentés dans le tableau IV-2, ceci a été accompli après avoir effectué 43 simulations (le cas de référence inclus) pour chaque scénario (c'est-à-dire 86 simulations au total).

Certains de ces paramètres sont prédéfinis en tant que des valeurs constantes (le cas pour  $C_p$ ,  $h$ ,  $\mu$  et  $\rho$ ) tandis que d'autres paramètres sont variables et définis en tant que des fonctions ( $\lambda$  et  $W$ ). Il convient de mentionner que la modification de certains paramètres implique la variation des autres. Par exemple, la modification de l'isotherme d'adsorption implique à chaque fois le recalcul de  $\xi_\varphi$ , la capacité de sorption qui représente la dérivée de l'isotherme de sorption. De plus, les facteurs de résistance à la diffusion de vapeur, obtenus par les tests de coupelles sèche et humide, sont tous les deux modifiés simultanément avec les mêmes pourcentages et ils sont utilisés pour calculer le coefficient de conduction liquide qui est pris en compte dans cette étude. D'autre part, faire varier le coefficient d'échange thermique aux frontières  $h$  avec un certain pourcentage conduit à une variation avec le même pourcentage de  $h_c$ , le coefficient d'échange

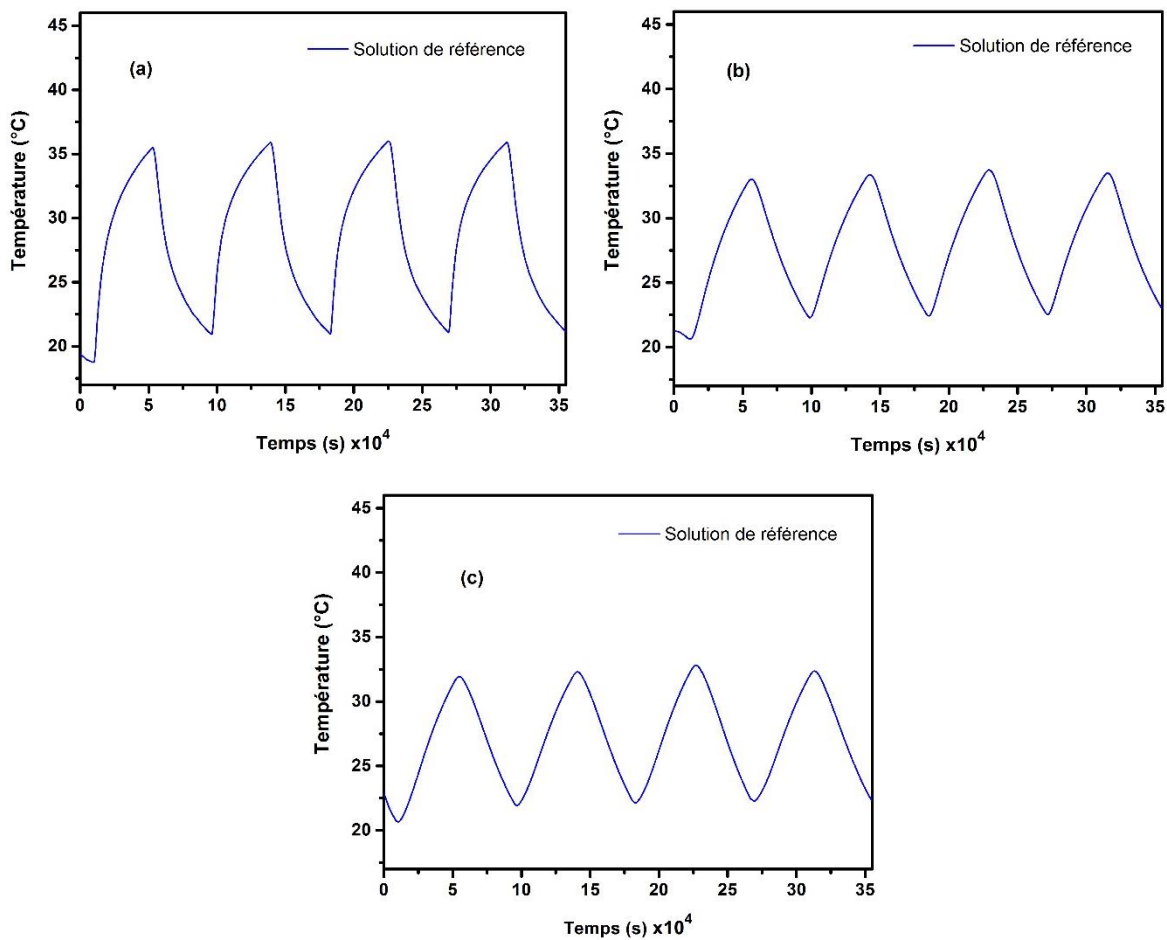
thermique convectif, qui est utilisé aussi pour calculer le coefficient de transfert de vapeur d'eau aux frontières  $\beta$ . Le choix d'utiliser des conditions aux limites réelles (importées de l'expérimental) est fait dans l'objectif d'étudier la sensibilité dans des conditions plus réalistes au lieu de créer des fonctions uniformes numériquement, et pour faire des comparaisons dans le futur avec les mesures expérimentales à l'intérieur du mur.

**Table IV-2 : Les cas d'étude**

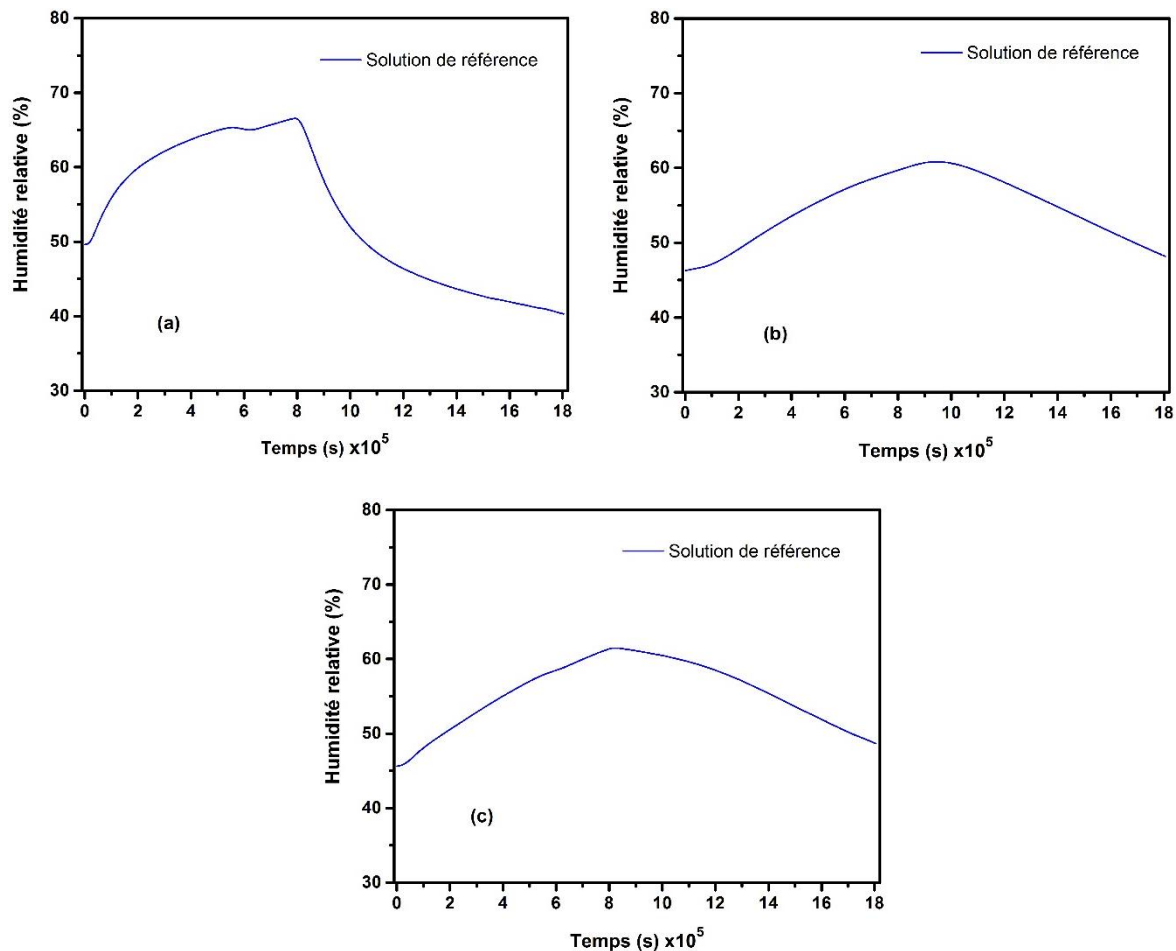
Cas	Paramètres variés	Paramètres non-variés (valeurs de référence)
<b>Cas de référence</b>	--	$C_p, h, \lambda, \mu, \rho, W$
<b>Cas 1</b>	$C_p$	$h, \lambda, \mu, \rho, W$
<b>Cas 2</b>	$h$	$C_p, \lambda, \mu, \rho, W$
<b>Cas 3</b>	$\lambda$	$C_p, h, \mu, \rho, W$
<b>Cas 4</b>	$\mu$	$C_p, h, \lambda, \rho, W$
<b>Cas 5</b>	$\rho$	$C_p, h, \lambda, \mu, W$
<b>Cas 6</b>	$W$	$C_p, h, \lambda, \mu, \rho$
<b>Cas 7 (variations simultanées)</b>	$C_p, h, \lambda, \mu, \rho, W$	--

### IV.1. Solution de référence

Les solutions de référence pour les scénarios 1 et 3 (transferts de chaleur et d'humidité) sont présentées dans les figures IV-2 et IV-3. Elles ont été obtenues numériquement en utilisant les valeurs de référence des propriétés, obtenues expérimentalement ou estimées (le cas du coefficient de transfert convectif), sans variation. Ces courbes servent comme référence pour les comparaisons et le calcul de la sensibilité.



**Figure IV-2.** Solution de référence de la température pour le scénario 1 à 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)



**Figure IV-3.** Solution de référence de l'humidité relative pour le scénario 3 à 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)

## IV.2. Sensibilité en fonction du temps

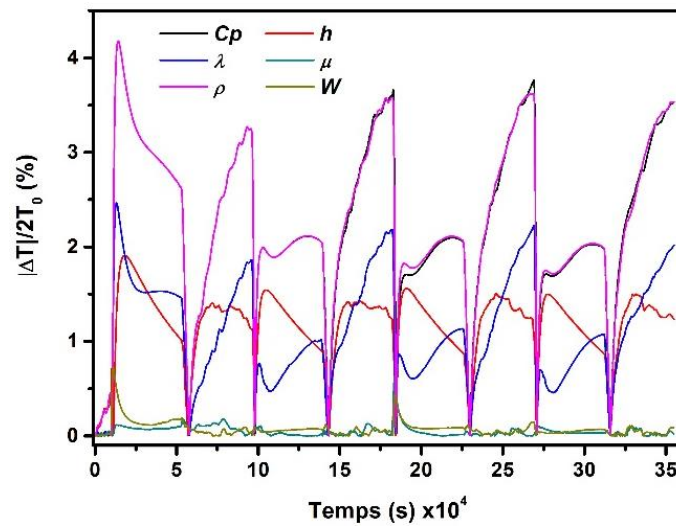
Dans la présente étude, différents facteurs interviennent simultanément et influent la sensibilité du modèle, à savoir : le pourcentage de variation des paramètres, le temps et la profondeur. Par conséquent, nous fixons deux facteurs à chaque fois afin de bien comprendre l'évolution de la sensibilité par rapport au troisième facteur. Premièrement, nous nous intéressons à la dépendance de la sensibilité au temps pour chaque scénario.

### Transfert de chaleur

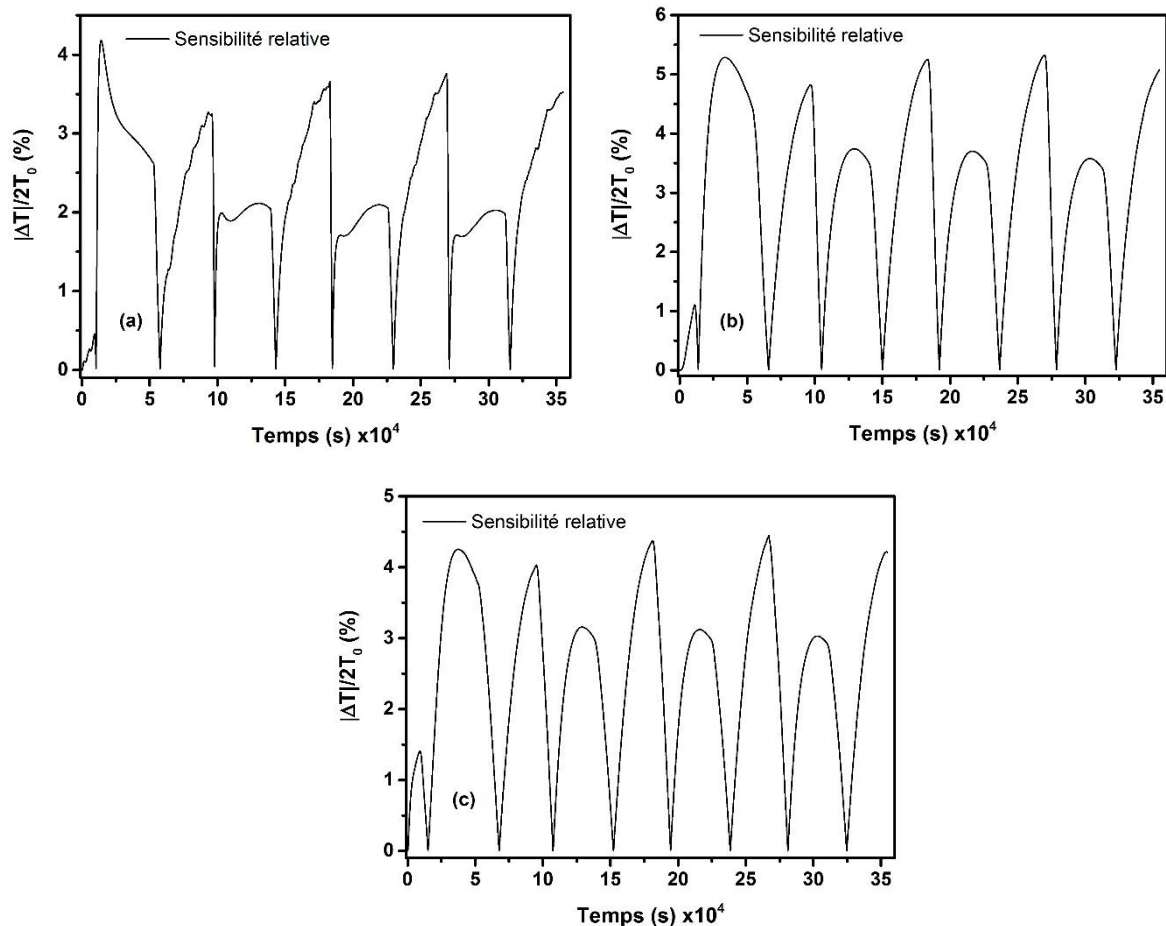
La figure IV-4 montre l'évolution de la sensibilité relative de la température pour tous les paramètres en fonction du temps à une profondeur de 3 cm et un pourcentage de variation de 25%.

On peut constater que la sensibilité relative du modèle en fonction du temps pour chaque paramètre est différente, les paramètres les plus influents sont  $C_p$  et  $\rho$ , puis  $h$  et  $\lambda$  puis enfin  $\mu$

et  $W$  avec un impact négligeable. En comparant la sensibilité à  $h$  avec les sensibilités aux autres paramètres, nous remarquons que  $h$  a presque une évolution inverse. De plus, les sensibilités à  $C_p$  et  $\rho$  ont presque la même évolution. Les mêmes résultats ont été obtenus par Le *et al.* [10] pour un mur en béton de chanvre et pour le même pourcentage de variation (25%).



**Figure IV-4.** Evolution de la sensibilité de la température en fonction du temps pour tous les paramètres étudiés, à 3 cm de profondeur et 25% de variation

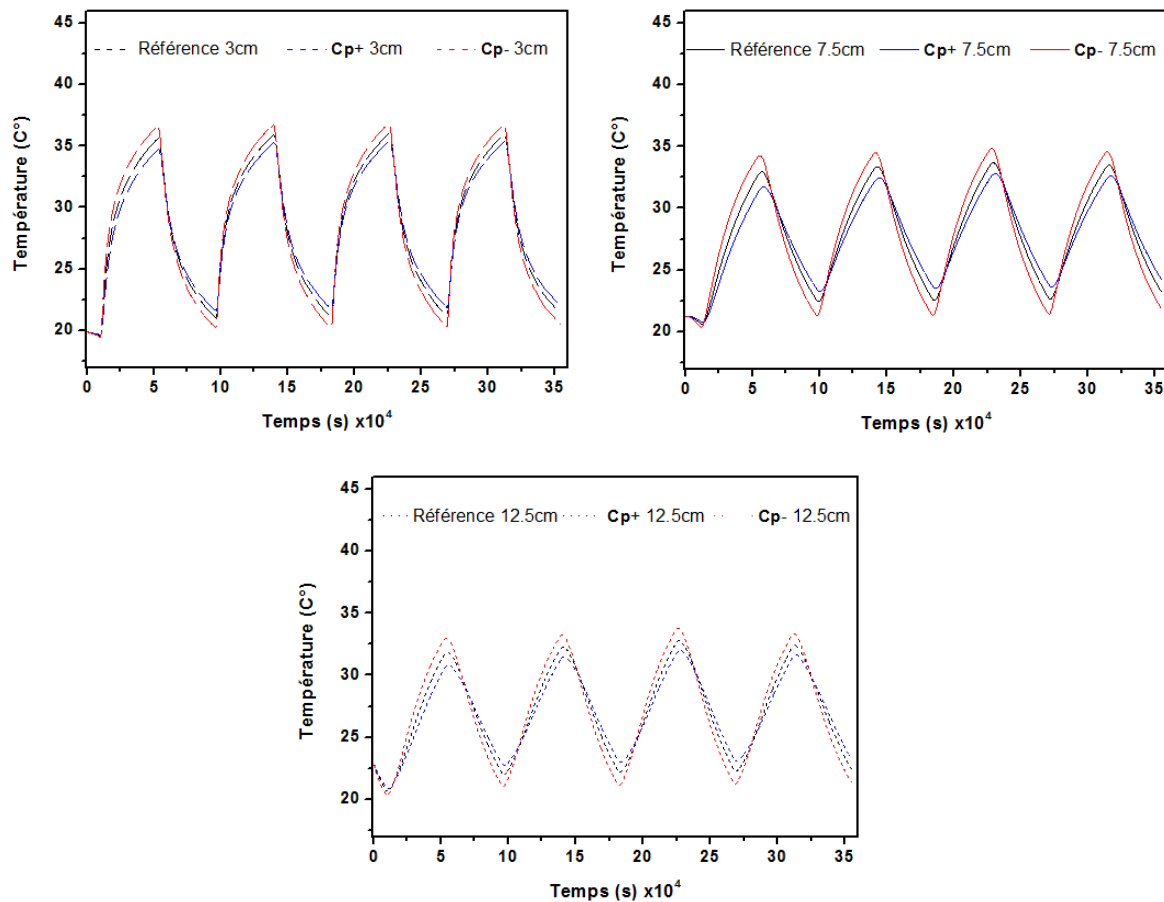


**Figure IV-5.** Evolution de la sensibilité de la température en fonction du temps pour la capacité thermique pour 25% de variation à différentes profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)

Dans la figure IV-5, la sensibilité au paramètre le plus influent  $C_p$  est tracée (nous pourrions également choisir  $\rho$ ) en fonction du temps pour les trois profondeurs 3 cm, 7.5 cm et 12.5 cm. On peut voir qu'à ces profondeurs, la sensibilité augmente et diminue aux mêmes moments, elle atteint des valeurs maximales aux températures les plus basses lors du passage de la phase de refroidissement à la phase de chauffage. En fait, lorsque on observe l'évolution des nouveaux profils de température (Figure IV-6), on trouve qu'à ces points, la différence «  $|Y_{x-\Delta x} - Y_{x+\Delta x}|$  » est maximale, divisée par la température de référence minimale, ça donne les valeurs maximales de sensibilité relative (équation IV-6). Ce fut le cas pour toutes les profondeurs. On remarque également que les courbes de sensibilité sont plus lisses à 7.5 cm et 12.5 cm de profondeur, c'est à cause de l'influence relativement plus tardive par rapport à 3 cm de profondeur, le point le plus proche de la surface externe où il est affecté plus rapidement par les variations externes. En d'autres termes, les variations externes ont été amorties à travers



l'épaisseur du mur pour être moins ressenties aux points les plus profonds. Notez que le premier cycle a été ignoré dans l'analyse des résultats pour éviter tout effet possible des conditions initiales. Les nouveaux profils de température pour tous les paramètres et les pourcentages ainsi que les trois profondeurs sont disponibles dans l'Annexe B.



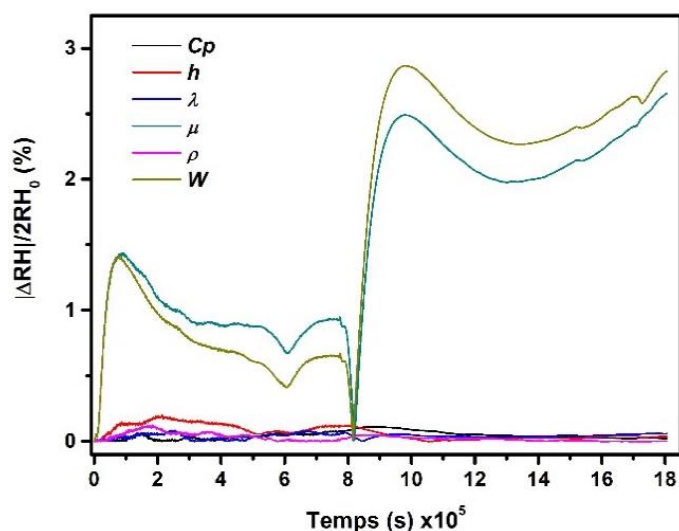
*Figure IV-6. Nouveaux profils de température pour la variation de la capacité thermique aux différentes profondeurs*

### Transfert d'humidité

Dans le cas du transfert d'humidité, les paramètres les plus influents sont  $W$  et  $\mu$ , puis le reste des autres paramètres qui ont un effet presque négligeable (Figure IV-7).

Il a été également noté qu'une isotherme de sorption ou des facteurs de résistance à la vapeur plus faibles conduisent à des courbes d'humidité relative supérieures pendant la phase d'adsorption et inférieures pendant la phase de désorption (inversion des courbes, figure IV-8). Une isotherme de sorption inférieure correspond à un stockage d'humidité plus faible dans le matériau pour la même valeur d'humidité relative, cela signifie que pour la même teneur en eau, nous obtenons une humidité relative plus élevée avec la nouvelle isotherme de sorption. Ceci

résulte aussi dans une lenteur du transfert et du stockage d'humidité dans le matériau où les humidités relatives maximale et minimale ont été obtenues avec un retard. De la même manière, un facteur de résistance à la vapeur plus faible signifie plus de diffusion de vapeur dans le matériau, ce qui conduit à des valeurs d'humidité relative plus élevées pendant l'adsorption et plus faibles pendant la désorption. Les mêmes observations et les conclusions ont été rapportées dans les références [6, 11]. La figure IV-9 représente l'évolution de la sensibilité aux trois profondeurs, pour l'isotherme de sorption ( $W$ ), le paramètre le plus influent sur le transfert hydrique. Nous observons plus de variations à 3 cm de profondeur qu'à 7.5 cm et 12.5 cm (même constat pour la température). La sensibilité relative a atteint des valeurs minimales (valeurs nulles) aux points d'inversion des courbes notés ci-dessus. Cela est dû à l'intersection des nouvelles courbes où  $|Y_{x-\Delta x} - Y_{x+\Delta x}|$  vaut zéro. Presque aux trois profondeurs, la sensibilité relative la plus élevée a été trouvée à la fin du test où les différences par rapport au cas de référence sont grandes et  $RH_0$  est minimum. Les nouveaux profils d'humidité relative pour tous les paramètres et les pourcentages ainsi que les trois profondeurs sont disponibles dans l'Annexe B.



**Figure IV-7.** Evolution de la sensibilité de l'humidité relative en fonction du temps pour tous les paramètres étudiés, à 3 cm de profondeur et 25% de variation

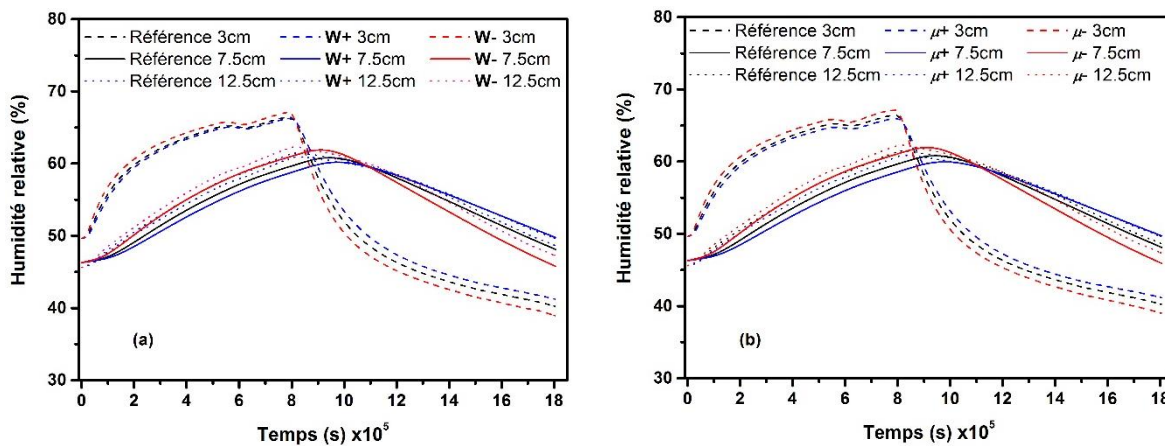


Figure IV-8. Nouveaux profils d'humidité relative pour la variation de la courbe de sorption (a) et le facteur de résistance à la diffusion de vapeur (b) aux différentes profondeurs

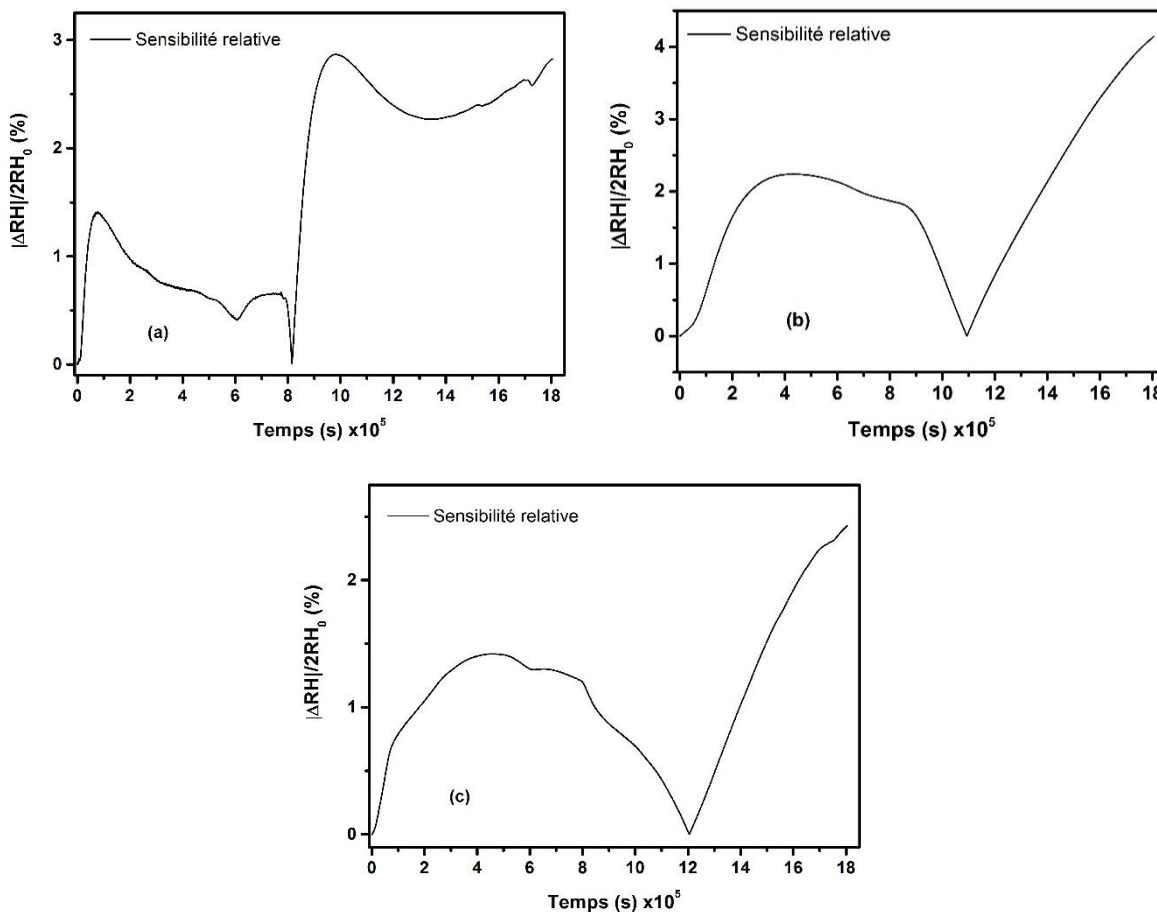


Figure IV-9. Evolution de la sensibilité de l'humidité relative en fonction du temps pour l'isotherme de sorption pour 25% de variation à différentes profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)

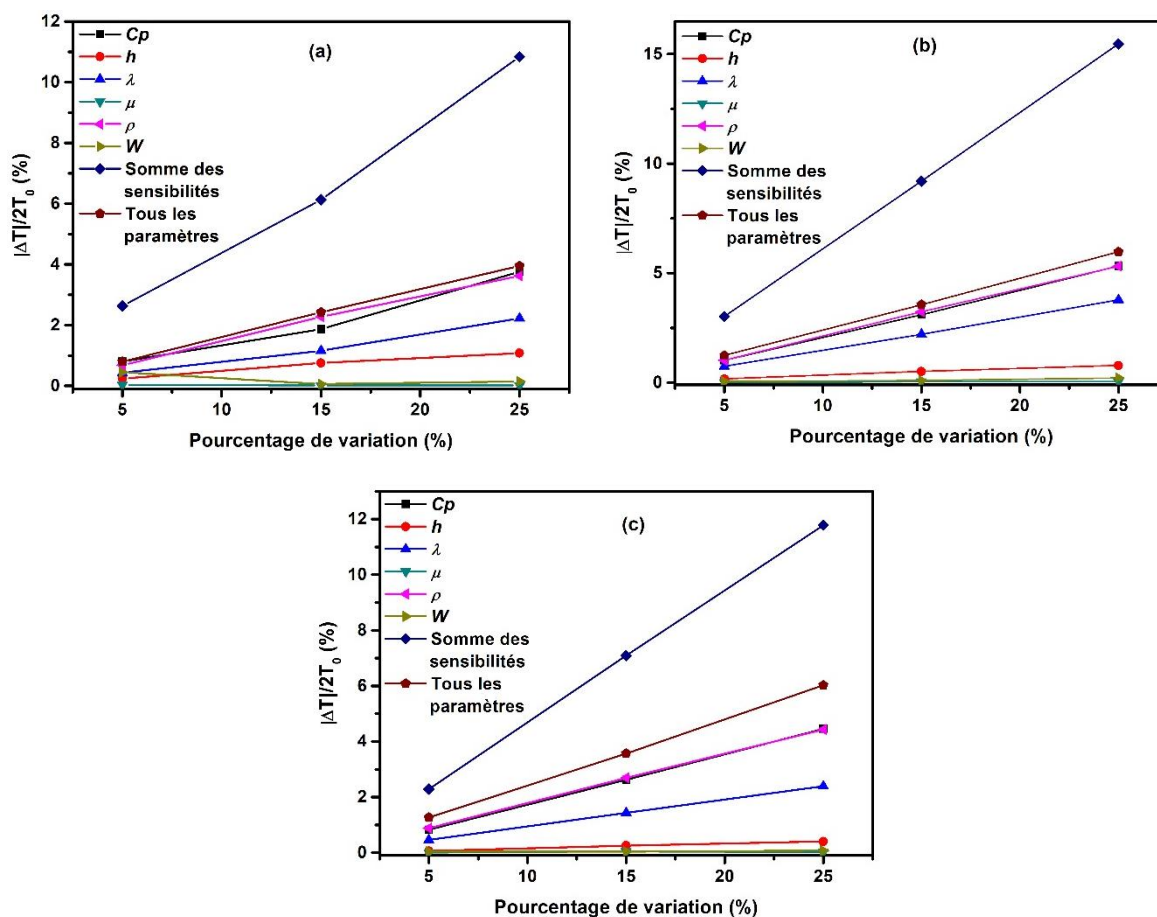
### IV.3. Comparaison des sensibilités aux différents paramètres

Nous comparons, dans cette étape, la sensibilité relative de chaque paramètre à un moment spécifique pour différents pourcentages et à différentes profondeurs. Les instants où les comparaisons ont été faites, sont choisis selon l'analyse dans la section IV.2. Le principe est de choisir des instants où la sensibilité relative atteint des valeurs maximales afin de montrer les cas extrêmes et les différences maximales. Ces instants sont différents selon le scénario et la profondeur choisis.

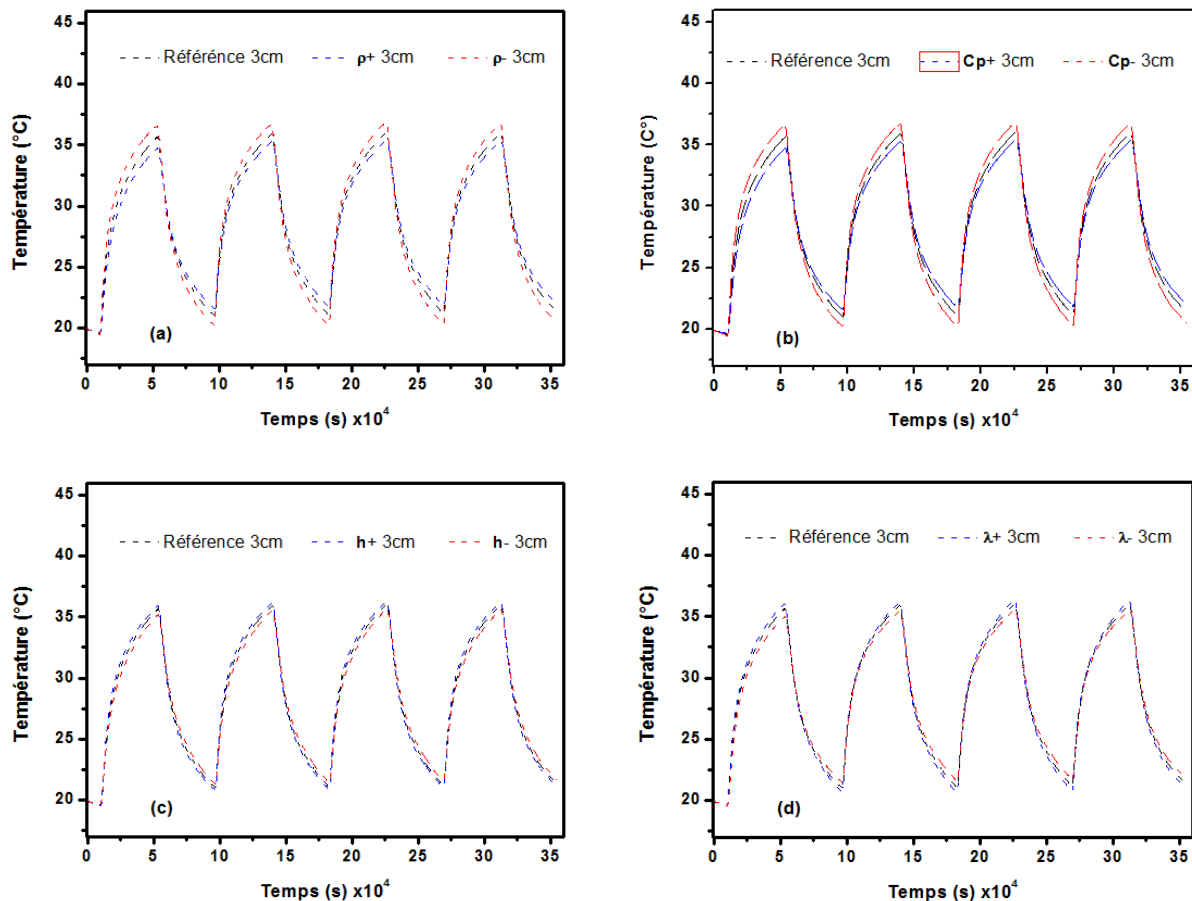
#### Transfert de chaleur

Comme mentionné ci-dessus, le premier cycle n'a pas été pris en compte et la sensibilité maximale a été obtenue à  $t_1=268920s$ ,  $t_2=269760s$  et  $t_3=267120s$  pour 3 cm, 7.5 cm et 12.5 cm de profondeur respectivement. À ces instants et en utilisant l'expression de la sensibilité relative (équation IV-6), l'évolution de la sensibilité en fonction du pourcentage de variation a été tracée à différentes profondeurs et montrée sur la figure IV-10. Comme il a été observé dans la section précédente, les paramètres les plus influents sur les transferts de chaleur sont  $C_p$  et  $\rho$ , puis  $h$  et  $\lambda$  puis enfin  $\mu$  et  $W$ . Ce fut le cas pour toutes les profondeurs. Des résultats similaires ont été obtenus par Van Belleghem *et al.* [11] qui ont étudié la sensibilité du transfert de chaleur et de masse dans des plaques de gypse pour les mêmes propriétés mais avec un pourcentage de variation plus faible (5%). On peut remarquer que la sensibilité du modèle à  $h$ , le coefficient convectif externe, diminue en fonction de la profondeur. Cela est logique car on s'éloigne de la surface externe caractérisée par ce coefficient. La sensibilité lors de la variation de tous les paramètres ensemble est bien inférieure à la somme des sensibilités pour chaque paramètre. Cela signifie que soit les erreurs sur les paramètres du modèle ne s'accumulent pas et n'ont pas d'influence importante entre elles, ou bien ces erreurs se compensent. Afin d'obtenir une réponse définitive, nous regardons l'évolution des nouveaux profils de température obtenus après la variation de chacun des paramètres les plus influents ( $C_p$ ,  $\rho$ ,  $h$  and  $\lambda$ ) à 3 cm de profondeur et 25% de pourcentage de variation (Figure IV-11). Nous pouvons voir que  $C_p$  et  $\rho$  influent dans le sens opposé par rapport à  $h$  et  $\lambda$  ; lorsque  $C_p$  ou  $\rho$  sont plus élevés, les profils de température résultants sont plus élevés à l'instant de temps choisi ( $t_1=268920s$ ). Mais lorsque  $h$  et  $\lambda$  sont plus élevés, les profils de température résultants sont inférieurs. Cette direction d'influence opposée indique que les sensibilités ont été compensées dans le 7ème cas pour donner une sensibilité inférieure à la somme des sensibilités. Cela signifie également que les

erreurs sur  $C_p$  et  $\rho$  ensemble peuvent s'accumuler et conduire à des différences globales plus élevées dans le résultat du modèle, la même chose pour les erreurs sur  $h$  et  $\lambda$ . D'un point de vue expérimental, il convient de dire que certains des cas étudiés ne représentent pas la réalité, car la modification de certains paramètres entraîne des variations inévitables dans un ou plusieurs d'autres paramètres. En effet, Collet *et al.* [12] ont fabriqué des blocs en béton de chanvre avec des masses volumiques différentes et la conductivité thermique était différente selon la dépendance classique (lorsque la masse volumique augmente la conductivité thermique augmente), mais cela n'empêche pas d'effectuer l'analyse de sensibilité purement mathématique pour les erreurs possibles citées qui peuvent être commises indépendamment lors de la caractérisation expérimentale. En d'autres termes, tant que chaque paramètre peut être mesuré seul expérimentalement, les erreurs peuvent être commises seulement sur ce paramètre.



**Figure IV-10.** Evolution de la sensibilité de la température en fonction du pourcentage de variation pour tous les paramètres à différentes profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)



**Figure IV-11.** Nouveaux profils de température pour la variation de la masse volumique (a), la capacité thermique (b), le coefficient d'échange thermique (c) et la conductivité thermique (d) de 25% des valeurs initiales à 3 cm de profondeur

### Transfert d'humidité

Pour l'humidité relative, l'instant choisi pour les comparaisons est  $t=1.8 \times 10^6$  s pour toutes les profondeurs. La figure IV-12 montre l'évolution de la sensibilité relative en fonction du pourcentage de variation à différentes profondeurs. Comme indiqué précédemment,  $\mu$  et  $W$  sont les paramètres qui influent le plus le transfert d'humidité tandis que l'impact du reste des paramètres a tendance à être nul. Cela était attendu car ces deux paramètres sont ceux qui gouvernent le transfert et le stockage d'humidité dans le modèle. Le même résultat a été obtenu par Bart *et al.* [6] et Van Belleghem *et al.* [11].

Une chose importante à noter est que la porosité n'apparaît pas explicitement dans les équations ; mais elle est prise en compte dans les propriétés déterminées sous l'hypothèse d'homogénéité des matériaux. Cela peut être la raison du faible effet de la masse volumique sur le transfert d'humidité, qui devrait être remarquable en raison de l'effet direct sur la porosité causé par un

changement de la masse volumique qui donne plus d'espace pour les mouvements de l'humidité. Ceci a été observé expérimentalement sur plusieurs blocs de béton de chanvre de différentes masses volumiques où la perméabilité à la vapeur a été influencée [7, 13].

En faisant varier tous les paramètres ensemble avec les mêmes pourcentages a donné une sensibilité plus élevée proche de la somme de toutes les sensibilités obtenues pour chaque paramètre séparément. Cela signifie que ces propriétés ont une influence les unes sur les autres et que les incertitudes peuvent s'accumuler et générer de plus grandes différences dans les résultats du modèle. En effet, quand on regarde la figure IV-8, montrant les nouveaux profils d'humidité relative obtenus après la variation des paramètres les plus influents  $\mu$  et  $W$  de 25% à 3 cm de profondeur, on observe que ces paramètres ont le même sens d'influence, ce qui explique l'accumulation des erreurs obtenue dans le 7<sup>ème</sup> cas.

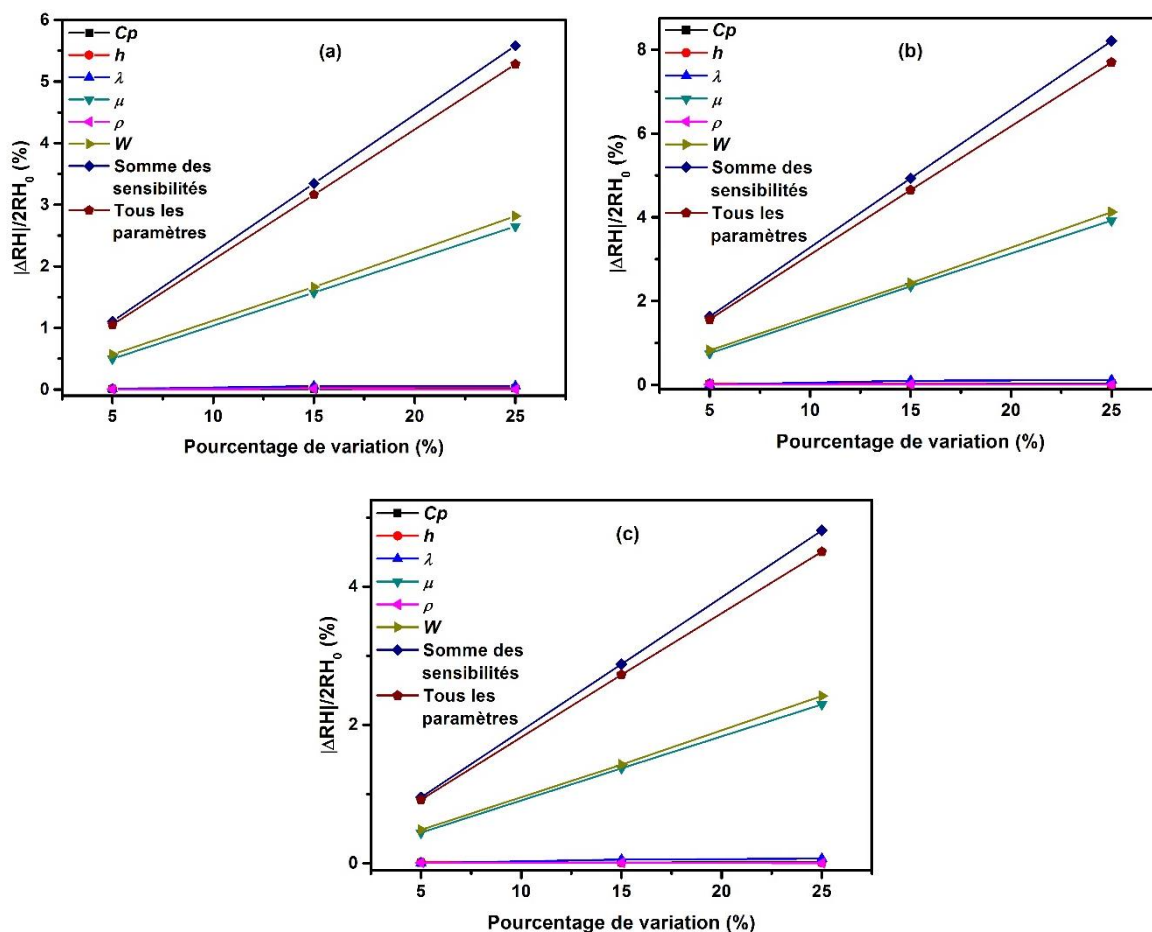
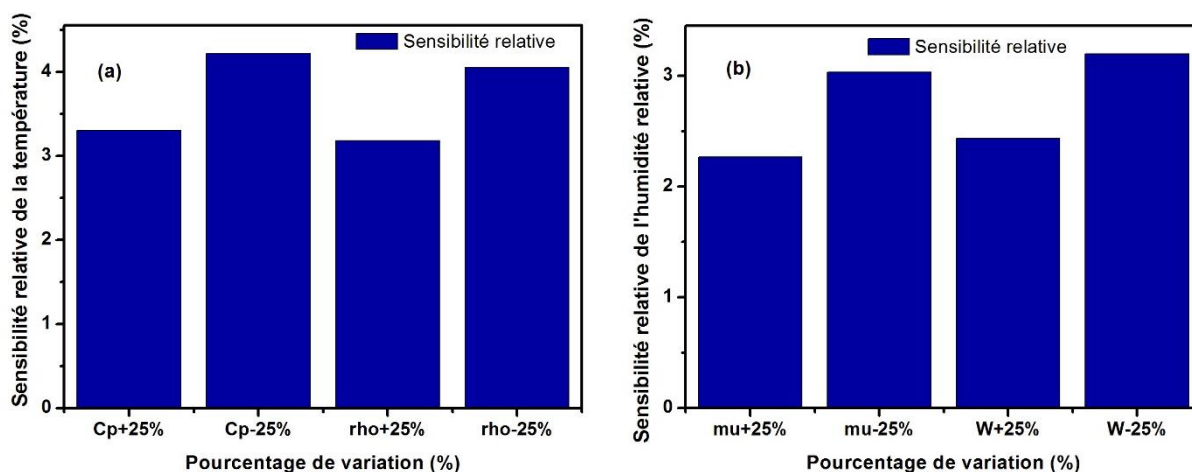


Figure IV-12. Evolution de la sensibilité de l'humidité relative en fonction du pourcentage de variation pour tous les paramètres à différentes profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm

(c)

La figure IV-13 montre la sensibilité calculée séparément pour les variations positives et les variations négatives pour  $C_p$  et  $\rho$  sur la température et pour  $W$  et  $\mu$  sur l'humidité relative. Ces valeurs sont calculées pour 25% de variation des paramètres choisis et pour une profondeur de 3 cm. On observe que la sensibilité aux variations positives des paramètres est inférieure à celle des variations négatives. Cela a été également observé dans les travaux précédents [5, 6, 11] mais qui n'a pas été discuté. À notre connaissance, cela peut être dû à la nature du modèle mathématique qui représente une forte non-linéarité où le système couplé se compose de plusieurs coefficients qui dépendent des inconnus du système ainsi que de leurs dérivées.

De plus, notre étude se déroule dans un régime transitoire où le système est dans une perturbation continue et dépend fortement du temps par rapport à une étude en régime permanent où le système est en équilibre et la sensibilité tend généralement vers une valeur constante.



**Figure IV-13.** Sensibilité aux variations positives et négatives séparément pour l'effet de  $C_p$  et  $\rho$  sur la température (a) et de  $W$  et  $\mu$  sur l'humidité relative (b)

## V. Effet des conditions initiales

Une autre source commune d'erreurs dans les calculs numériques est les conditions initiales. Dans notre cas, les valeurs initiales de température et d'humidité relative sont utilisées à partir de l'expérience. Par conséquent, l'incertitude des capteurs peut être responsable de certains écarts dans ces valeurs. Les capteurs hygrothermiques utilisés pour acquérir les données dans l'expérience proviennent de « Driesen + Kern, Allemagne » avec une précision de  $\pm 0.5$  °C pour la température et de  $\pm 1.8\%$  pour l'humidité relative. Un deuxième cas de  $\pm 2$  °C et  $\pm 5\%$  HR a



été également testé car nos capteurs ont une précision relativement supérieure par rapport aux capteurs utilisés habituellement dans les autres travaux.

Les figures IV-14 et IV-15 montrent l'impact du changement des conditions initiales sur les résultats numériques de température et d'humidité relative à différentes profondeurs. Pour la température, quelle que soit la profondeur, les différences provoquées par les conditions initiales continuent à diminuer et disparaissent presque totalement après la moitié du premier cycle (après environ 82000s du début du test). Pour l'humidité relative, les différences ont duré plus lentement et peuvent être observées pendant tout le test mais avec des valeurs faibles à la fin (environ 0.55% HR). Cela était attendu en raison de la cinétique lente du transfert d'humidité par rapport au transfert de chaleur. Cet effet a également été démontré par Oumeziane *et al.* [14] qui ont étudié l'influence de la teneur en eau et l'humidité relative initiale sur le test de MBV (Moisture Buffer Value) où il a été conclu que la connaissance exacte de l'état hydrique initial est très importante pour la prédiction du transfert d'humidité, surtout lorsque l'effet d'hystérésis est pris en compte. Enfin nous pouvons dire que les incertitudes sur les conditions initiales de température sont relativement tolérées pour les longs tests par rapport à l'humidité relative, où des erreurs de  $\pm 2\%$  pourraient avoir un impact élevé sur les résultats numériques.

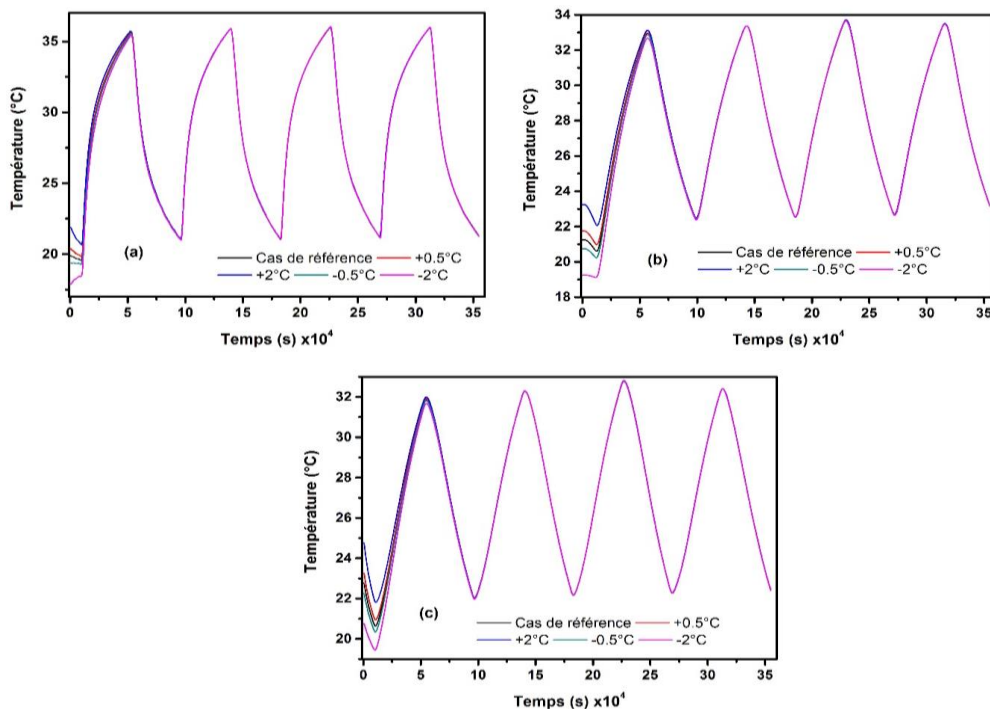


Figure IV-14. Effet du changement des conditions initiales sur les profils de température à différentes profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)

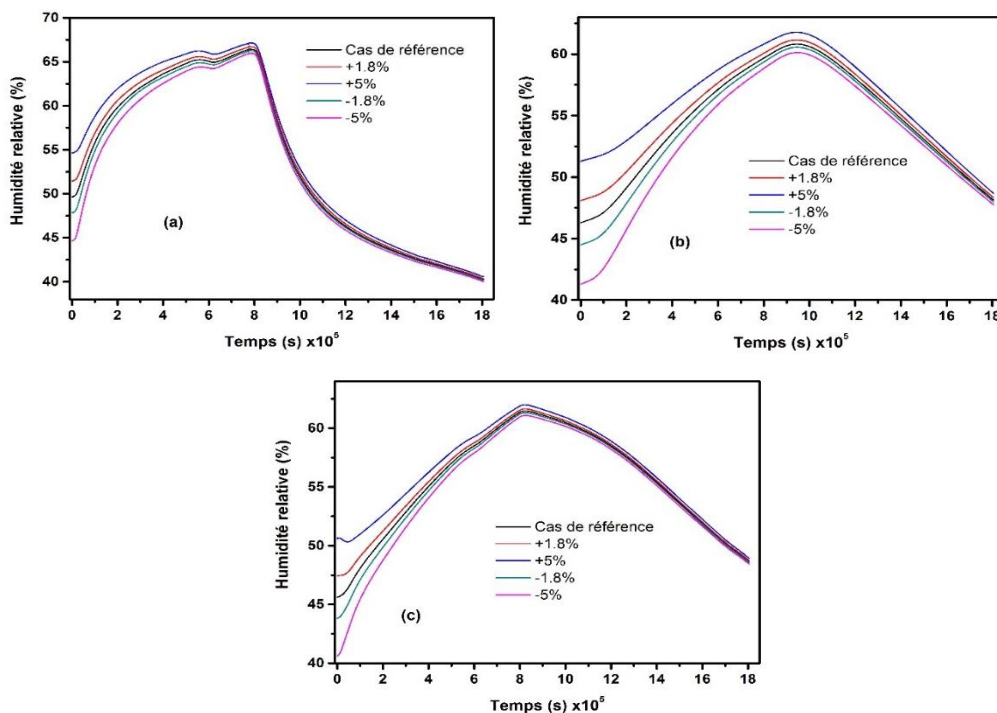


Figure IV-15. Effet du changement des conditions initiales sur les profils d'humidité relative à différentes profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)

## VI. Effet de la position des capteurs

Dans l'expérimental, l'utilisation des capteurs hygrothermiques nécessite de percer le mur afin de les insérer jusqu'aux profondeurs souhaitées, suivant l'épaisseur du mur. Des erreurs dans l'emplacement de perçage entraînent une inexactitude sur la localisation des profils résultants. Afin d'évaluer l'effet d'éventuels écarts dans la position des capteurs, nous comparons les profils à  $\pm 1$  cm des positions de référence et nous discutons les différences.

La figure IV-16 montre l'effet de la position des capteurs sur les profils de température à différentes profondeurs. La plus grande différence maximale a été obtenue à 3 cm et égale à 0.92 °C, tandis qu'à 7.5 cm et 12.5 cm de profondeur, les différences maximales sont respectivement de 0.34 °C et 0.56 °C. L'effet de la position des capteurs sur les profils d'humidité relative à différentes profondeurs est illustré sur la figure IV-17. Contrairement à la température, les différences à  $\pm 1$  cm des positions de référence sont beaucoup plus importantes et remarquables où la plus grande différence maximale a également été obtenue à 3 cm de profondeur (5.36%). A 7.5 cm et 12.5 cm, les différences maximales résultant valent respectivement 1.66% et 1.65%. Ces résultats doivent être comparés à la précision des capteurs qui doit également être prise en compte et mentionnée notamment lors de la comparaison des profils numériques aux mesures expérimentales. Dans notre cas, la précision de nos capteurs ( $\pm 0.5$  °C pour la température et  $\pm 1.8\%$  pour l'humidité relative) est comparable aux différences enregistrées pour la température mais bien inférieure à celles de l'humidité relative. Il convient d'accorder plus d'attention à la position des capteurs, en particulier ceux de l'humidité relative aux points les plus proches des variations externes, où ils se révèlent plus sensibles, montrant des écarts non négligeables. Les mêmes résultats et les conclusions ont été rapportés par Bart *et al.* [6] qui ont étudié l'effet de la position des capteurs dans une paroi en béton de chanvre de 30 cm d'épaisseur. Généralement, les capteurs doivent être introduits dans l'épaisseur des murs, perpendiculairement au sens du transfert, par la surface la plus proche aux endroits souhaités et assez éloignés les uns des autres pour éviter toute perturbation possible. Les diamètres des trous doivent être légèrement supérieurs aux diamètres des capteurs pour pouvoir d'une part introduire les capteurs avec le minimum de contact avec la surface interne des trous (risque de déformer ou détruire les capteurs) et d'autre part pour rester toujours dans la position souhaitée.

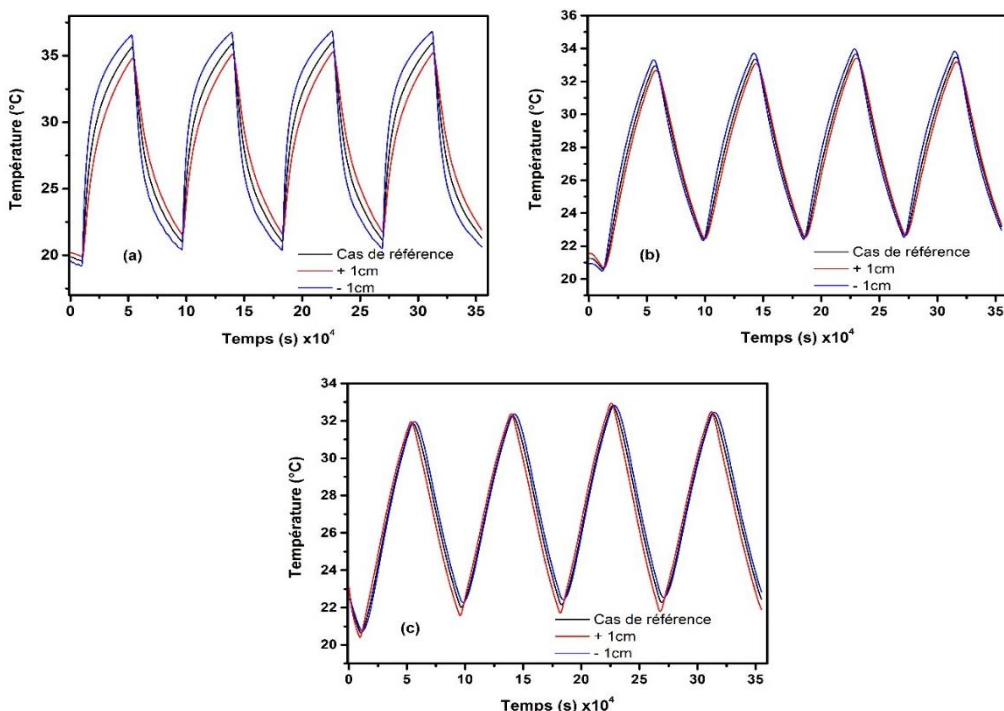


Figure IV-16. Effet de la position des capteurs sur les profils de température aux profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)

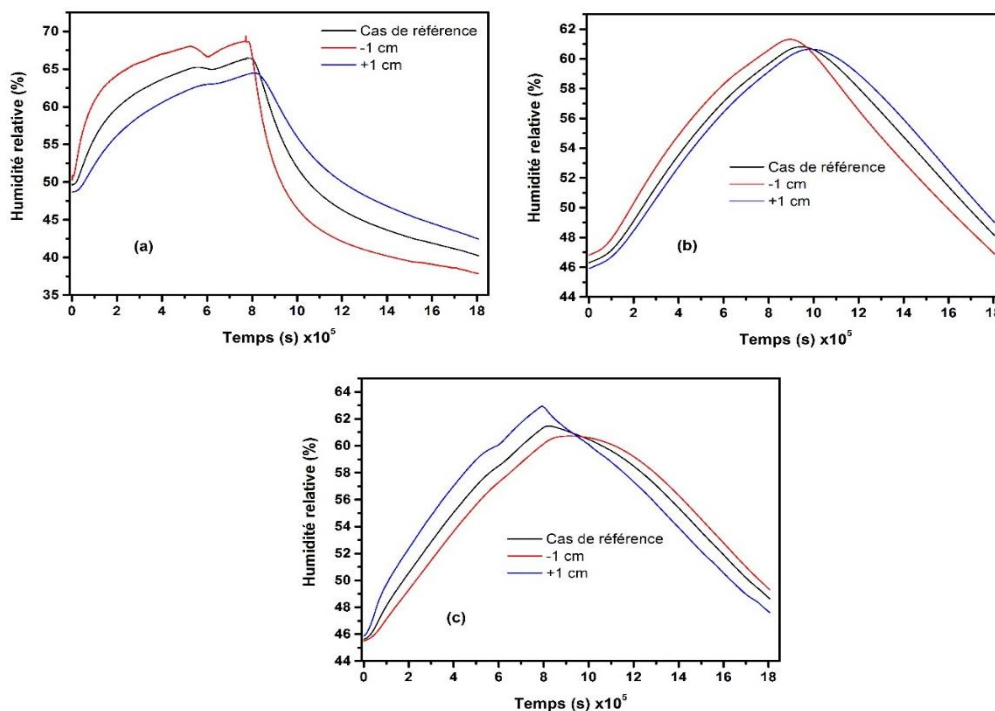


Figure IV-17. Effet de la position des capteurs sur les profils de l'humidité relative aux profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)

## VII. Modèles simplifiés

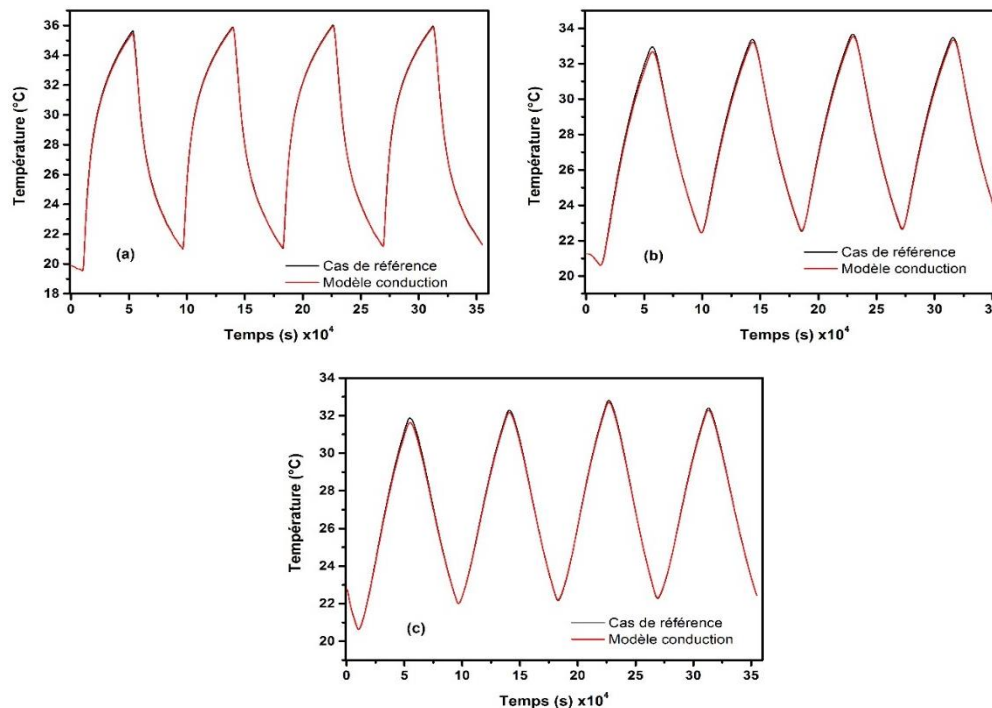
Dans la dernière partie, certains termes ont été négligés dans le modèle et les résultats sont comparés avec le cas de référence, dans le but d'évaluer des simplifications possibles dans les cas étudiés.

### VII.1.1. Modèle de conduction pure

Dans certains travaux antérieurs, le transfert de chaleur était modélisé uniquement par le processus de conduction. Ces modèles se sont avérés de donner de bons résultats en termes de prévisions des profils de température. Dans cette partie, le terme de changement de phase a été négligé dans l'équation de la chaleur (équation IV-2) dans le modèle hygrothermique en ne gardant que le terme de conduction thermique comme mode responsable du transfert de chaleur comme suit :

$$\left(\rho_0 c_{p_0} + c_{p_l} w\right) \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) \quad (\text{IV-7})$$

Le nouveau modèle a été résolu pour le cas du scénario 1 et les résultats ont été comparés à différentes profondeurs avec les solutions de référence obtenues par le modèle complet.



**Figure IV-18.** Les résultats du modèle à conduction pure comparé avec le modèle de référence à différentes profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)

Les résultats sont présentés sur la figure IV-18. Quelle que soit la profondeur, les différences entre le modèle de conduction pure et le modèle complet ne dépassent pas  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Cela montre que la conduction est le facteur responsable du transfert de chaleur le plus important dans le cas étudié. Cela peut être validé par le fait que les conditions aux limites de l'humidité relative sont restées constantes et que tout mouvement d'humidité dans le mur est dû au transfert de chaleur (effet faible) alors que, comme défini dans les équations du modèle, la chaleur à changement de phase est liée au flux de vapeur. La même observation a été notée par Oumeziane *et al.* [15] en absence de phénomènes de condensation-évaporation à l'intérieur du matériau. Nous pouvons conclure que dans les cas où seule la température change, le modèle à conduction pure est suffisant pour prédire les profils de température ce qui nous a permis dans notre cas de gagner environ 30% en temps de calcul en utilisant le modèle simplifié.

### VII.1.2. Transfert de liquide négligé

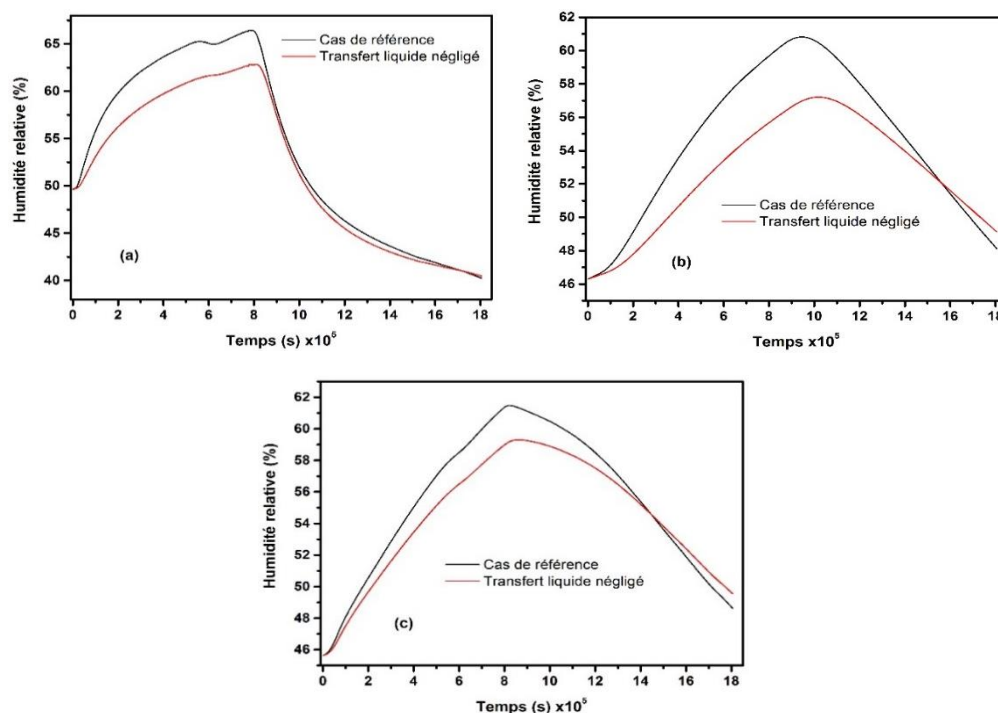
Dans les matériaux poreux de construction, plus d'importance a été généralement accordée au transfert de vapeur au détriment du transfert d'eau liquide lors de la modélisation des phénomènes de transfert pour prédire les variations d'humidité relative. Afin d'estimer la contribution de la diffusion d'eau liquide dans le transfert d'humidité et la prédiction des profils

d'humidité relative, elle a été négligée dans le modèle hygrothermique en mettant à zéro les coefficients de transfert de liquide (présentés dans le chapitre II section 1.1.1.2) dans l'équation de transfert de masse (équation IV-1) pour avoir :

$$\xi_{\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \frac{\partial(p_{sat}\varphi)}{\partial x} \right) \quad (IV-8)$$

Ce modèle avec seulement la diffusion de vapeur est responsable du transfert d'humidité, a été résolu en utilisant les conditions du scénario 3 et les résultats ont été comparés avec ceux obtenus par le modèle complet de référence à trois profondeurs différentes (Figure IV-19).

Comme nous pouvons voir, négliger le transfert d'eau liquide a conduit à des différences importantes dans les profils d'humidité relative aux trois profondeurs par rapport aux résultats du modèle complet. Ces différences augmentent au cours de la phase d'adsorption où elles atteignent respectivement 3.8%, 4% et 2.3% à 3 cm, 7.5 cm et 12.5 cm. Pendant la phase de désorption, les différences diminuent à des valeurs négligeables, notamment à 3 cm de profondeur. Le même cas a été étudié par Oumeziane *et al.* [15] et les mêmes résultats ont été obtenus où ils ont noté que le transfert de liquide est aussi important que le transfert de vapeur pendant la phase d'adsorption, mais pendant la phase de désorption, la différence est presque négligeable. En effet, le transfert de liquide est naturellement présent à ce niveau d'humidité relative principalement par le biais du processus de diffusion surfacique qui se produit dans la région hygroscopique [1]. Ce processus contribue au transfert d'humidité et accélère sa cinétique. Cela interprète la courbe résultante du modèle complet qui augmente plus rapidement pendant l'adsorption et diminue également plus rapidement pendant la désorption par rapport au modèle avec transfert de liquide négligé. Par conséquent, il est recommandé de ne pas négliger le transfert de liquide lors de la modélisation du transfert hygrothermique dans les matériaux poreux de construction.



**Figure IV-19.** Effet du transfert d'eau liquide sur les profils de l'humidité relative à différentes profondeurs : 3 cm (a), 7.5 cm (b) et 12.5 cm (c)

### VIII. Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse de sensibilité a été réalisée sur le transfert transitoire de chaleur et d'humidité décrit par le modèle de Kunzel. Premièrement, une analyse paramétrique a été effectuée sur l'influence des différents paramètres sur les résultats du modèle. Les effets en fonction du temps, de la profondeur et du pourcentage de variation ont été démontrés. Les résultats montrent que le transfert de chaleur est influencé par les variations de la capacité thermique et de la masse volumique tandis que les paramètres qui influent le transfert d'humidité sont l'isotherme de sorption et les facteurs de résistance à la diffusion de vapeur. Selon notre étude, les auteurs doivent prêter attention à ces paramètres lors de la caractérisation expérimentale et à leur utilisation aux échelles de mur et de bâtiment. Deuxièmement, l'effet des incertitudes sur les conditions initiales et la position des capteurs a été étudié. Il a été noté que le transfert d'humidité est très sensible à toute erreur dans les conditions initiales ou la position des capteurs. Finalement, certains termes ont été négligés dans le modèle afin de mettre en évidence d'éventuelles simplifications du modèle. La négligence de la diffusion d'eau liquide dans le modèle a conduit à des sous-estimations importantes dans les profils d'humidité relative pendant la phase d'adsorption.



## References

- [1] H. M. Künzle, Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters, Stuttgart: IRB-Verlag, 1995.
- [2] J. Morio, «Global and local sensitivity analysis methods for a physical system,» *European journal of physics*, vol. 32, 2011.
- [3] H. M. Wainwright, S. Finsterle, Y. Jung, Q. Zhou et J. T. Birkholzer, «Making sense of global sensitivity analyses,» *Computers & Geosciences*, vol. 65, pp. 84-94, 2014.
- [4] N. Mendes, F. Winkelmann, R. Lamberts et P. Philippi, «Moisture effects on conduction loads,» *Energy and Buildings*, vol. 35, p. 631–644, 2003.
- [5] A. T. Le, C. Maalouf, T. H. Mai, E. Wurtz et F. Collet, «Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope,» *Energy and buildings*, vol. 42, pp. 1797-1806, 2010.
- [6] M. Bart, S. Moissette, Y. Ait Oumeziane et C. Lanos, «Transient hygrothermal modelling of coated hemp-concrete walls,» *Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 18, pp. 927-944, 2014.
- [7] Y. Ait Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, F. Collet, S. Pretot et C. Lanos, «Influence of hysteresis on the transient hygrothermal response of a hemp concrete wall,» *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 10, pp. 256-271, 2017.
- [8] I. Othmen, P. Poullain et N. Leklou, «Sensitivity analysis of the transient heat and moisture transfer in a single layer wall,» *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-19, 2018.
- [9] A. Boudenne, L. Ibos et Y. Candau, «Analysis of uncertainties in thermophysical parameters of materials obtained from a periodic method,» *Measurement Science and Technology*, vol. 17, 2006.
- [10] A. T. Le, Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment, Reims: Thèse de doctorat, 2010.
- [11] M. Van Belleghem, H. J. Steeman, M. Steeman, A. Janssens et M. De Paepe, «Sensitivity analysis of CFD coupled non-isothermal heat and moisture modelling,» *Building and Environment*, vol. 45, pp. 2485-2496, 2010.
- [12] F. Collet et S. Prétot, «Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content,» *Construction and building materials*, vol. 65, pp. 612-619, 2014.
- [13] F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot et C. Lanos, «Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes,» *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 294-303, 2013.
- [14] Y. A. Oumeziane, M. Bart, S. Moissette et C. Lanos, «Hysteretic behaviour and moisture buffering of hemp concrete,» *Transport in porous media*, vol. 103, pp. 515-533, 2014.
- [15] Y. Ouméziane Aït, Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre, Rennes: Thèse de doctorat, 2013.

# **Conclusion générale et perspectives**

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre des études sur de nouveaux éco-matériaux renouvelables dans le but de réduire l'énorme consommation d'énergie dans le secteur de l'habitat et minimiser les émissions de CO<sub>2</sub>. Un nouveau matériau à base de déchets de palmier dattier est adopté dans cette étude afin de mieux comprendre son comportement à grande échelle. L'étude se répartie en trois parties majeures :

- La modélisation des phénomènes de transfert de chaleur et de masse selon plusieurs approches de la littérature.
- La validation des modèles développés avec des données expérimentales pour le cas d'un mur en béton de bois de palmier dattier et évaluation de la performance du matériau par rapport à un matériau classique.
- L'étude de l'influence des différents paramètres, conditions et coefficients de transfert sur les résultats du modèle.

Ces travaux ont permis de bien avancer dans l'étude numérique à l'échelle du mur sur le béton de bois de palmier dattier où on peut tirer les conclusions suivantes :

Tout d'abord, l'étude bibliographique présentée a permis de mieux cerner la problématique liée à la grande consommation énergétique dans les bâtiments et les émissions des gaz à effet de serre. Les matériaux biosourcés sont définis et proposés comme une des solutions qui peuvent répondre à la problématique citée. Nous avons pu également présenter les travaux sur les composites à base de fibres de bois de palmier dattier en citant leurs propriétés intéressantes et leurs applications. La dernière partie du chapitre I a mis en évidence les principaux modèles hygrothermiques et les outils de simulation qui servent à prédire le comportement des matériaux à différentes échelles.

Dans un deuxième lieu, le développement des modèles hygrothermiques à partir des équations de conservation a été présenté. Cette partie nous a permis de bien comprendre les phénomènes responsables du transfert de chaleur et de masse dans les matériaux poreux de construction. Nous avons pu aussi citer toutes les simplifications habituelles qui sont utilisées pour réduire la complexité des systèmes d'équation. Un phénomène très important a été modélisé dans cette étude qui est le phénomène d'hystérésis, à l'aide de plusieurs modèles de la littérature.

Ensuite, une étude de validation, incluant l'effet d'hystérésis, est effectuée pour valider deux modèles hygrothermiques, à savoir les modèles de Kunzel et de Mendes, qui sont résolus

numériquement en utilisant la méthode des éléments finis. La comparaison des résultats obtenus avec les données expérimentales a révélé des performances acceptables pour les deux modèles, en particulier, pour la prédiction des variations de température. De même, la prise en compte du phénomène d'hystérésis a permis une meilleure prédiction des profils d'humidité relative dans le mur en DPC. Finalement, la comparaison du comportement du mur en DPC avec le mur en béton cellulaire autoclavé, a mis en évidence les performances prometteuses du DPC en termes d'inertie thermique et de la capacité de stockage d'humidité.

Dans la dernière partie du travail, une analyse de sensibilité est réalisée sur le modèle de Kunzel. Dans un premier temps, une analyse paramétrique sur l'effet des différents paramètres en fonction du temps, de la profondeur et du pourcentage de variation, a été effectuée. Les résultats montrent que le transfert de chaleur est influencé par les variations de la capacité thermique et de la masse volumique tandis que les paramètres qui influent le transfert d'humidité sont l'isotherme de sorption et les facteurs de résistance à la diffusion de vapeur. Plus d'attention doit être prêtée à ces paramètres lors de la caractérisation expérimentale et à leur utilisation à grandes échelles. Dans un deuxième temps, l'effet des incertitudes sur les conditions initiales et la position des capteurs a été étudié. Il a été noté que le transfert d'humidité est très sensible à toute erreur dans les conditions initiales ou la position des capteurs. Finalement, la négligence de la diffusion d'eau liquide dans le modèle a conduit à des sous-estimations importantes dans les profils d'humidité relative pendant la phase d'adsorption.

D'un point de vue global, cette étude montre la validité des modèles hygrothermiques pour les études numériques sur le béton de bois de palmier dattier. Elle montre aussi les performances prometteuses du DPC, ce qui permet de conduire plus d'études sur ce matériau aux échelles mur et bâtiment. De plus, l'étude de sensibilité surligne les principales sources d'erreurs dans la simulation du comportement hygrothermique des matériaux biosourcés afin d'optimiser la précision des résultats numériques.

### **Perspectives :**

Les travaux réalisés dans cette thèse ouvrent de nombreuses pistes où plusieurs études peuvent encore être menées, notamment :

- L'étude de validation peut être élargie pour étudier d'autres cas où les conditions aux limites de température et d'humidité relative varient simultanément. Ceci afin de bien

mettre en évidence les phénomènes de couplages entre le transfert de chaleur et le transfert de masse.

- Ces dernières conditions simultanées peuvent être également appliquées dans l'étude de sensibilité pour déterminer l'effet des erreurs sur les résultats dans des conditions réelles.
- L'effet de la température sur les courbes de sorption doit être étudié expérimentalement en déterminant les isothermes de sorption à différentes températures. Cet effet peut être également pris en compte dans les calculs numériques à l'aide des modèles de la littérature.
- Pour des résultats plus représentatifs de la réalité, des murs multicouches en béton de bois de palmier dattier doivent être étudiés numériquement. Le but de cette étude est de déterminer l'utilisation appropriée du DPC en le combinant avec différents matériaux classiques.
- Plus d'investigations doivent être menées sur le taux élevé d'humidité dans le mur en DPC obtenu dans l'étude comparative dans le chapitre III. Le risque de développement de moisissure doit être mis en évidence expérimentalement et numériquement.
- Finalement, la validation des modèles hygrothermiques pour le DPC à l'échelle mur permet de passer à l'échelle bâtiment où le comportement du matériau doit être étudié en termes du confort hygrothermique et de la consommation énergétique.

# **Annexes**

## Annexe A : Code Matlab pour la détermination des courbes intermédiaires d'hystérésis

- Définir des courbes d'adsorption et de désorption principales à l'aide des fonctions obtenues par le modèle GAB dans l'étude expérimentale :

### Adsorption :

```
function ads=adsorp1(v)
ads=(7.795e13)*v./((1-1.07236*v).* (1-1.07236*v+(1.263e16)*v));
end
```

### désorption :

```
function des=desorp1(v)
des=0.32737*v./((1-0.00937*v).* (1-0.00937*v+0.82256*v));
end
```

- Écrire le script qui calcule la courbe intermédiaire d'hystérésis à l'aide du modèle de Mualem (présenté dans le chapitre III section VI.7.1) :

### Pour le processus de désorption intermédiaire :

```
rh=[0.9:-0.005:0.1]; %valeurs d'humidité relative
us=0.4497; %teneur en eau de saturation
A=(desorp1(rh(2:length(rh)))-adsorp1(rh(2:length(rh))))/(us-
adsorp1(rh(2:length(rh)))); %A représente la fonction H primitive de la
fonction d'accessibilité h
u=0.1254-(1-A).*(adsorp1(0.7032)-adsorp1(rh(2:length(rh)))); %teneur en eau
de la courbe intermédiaire de désorption
%0.1254 correspond à la teneur en eau avant le point d'inversion (i-1)
x=[0.1:0.005:0.9];
ads=adsorp1(x);
des=desorp1(x);
rh1=rh(2:length(rh));
plot(rh1,u) %plot de la courbe intermédiaire obtenue
hold on
plot(x,ads) %plot de la courbe principale d'adsorption
plot(x,des) %plot de la courbe principale de désorption
%----- Enregistrement des valeurs de la courbe obtenue -----
% Create a table with the data and variable names
%T = table(rh, u1, 'VariableNames', { 'rh', 'u' } )
% Write data to text file
%writetable(T, 'mualem.txt')
```

### Pour le processus d'adsorption intermédiaire :

```
rh=[0.4964:0.005:0.9]; %0.4964 correspond au point i-1
us=0.4497; %teneur en eau de saturation
A=(desorp1(rh(1))-adsorp1(rh(1)))/(us-adsorp1(rh(1)));
u=desorp1(rh(1))+(1-A).*(adsorp1(rh(2:length(rh)))-adsorp1(rh(1))); %teneur
en eau de la courbe intermédiaire d'adsorption
u1=[desorp1(rh(1)),u]; %la courbe intermédiaire obtenue
x=[0:0.005:0.9];
ads=adsorp1(x);
des=desorp1(x);
plot(rh,u1) %plot de la courbe intermédiaire obtenue
```

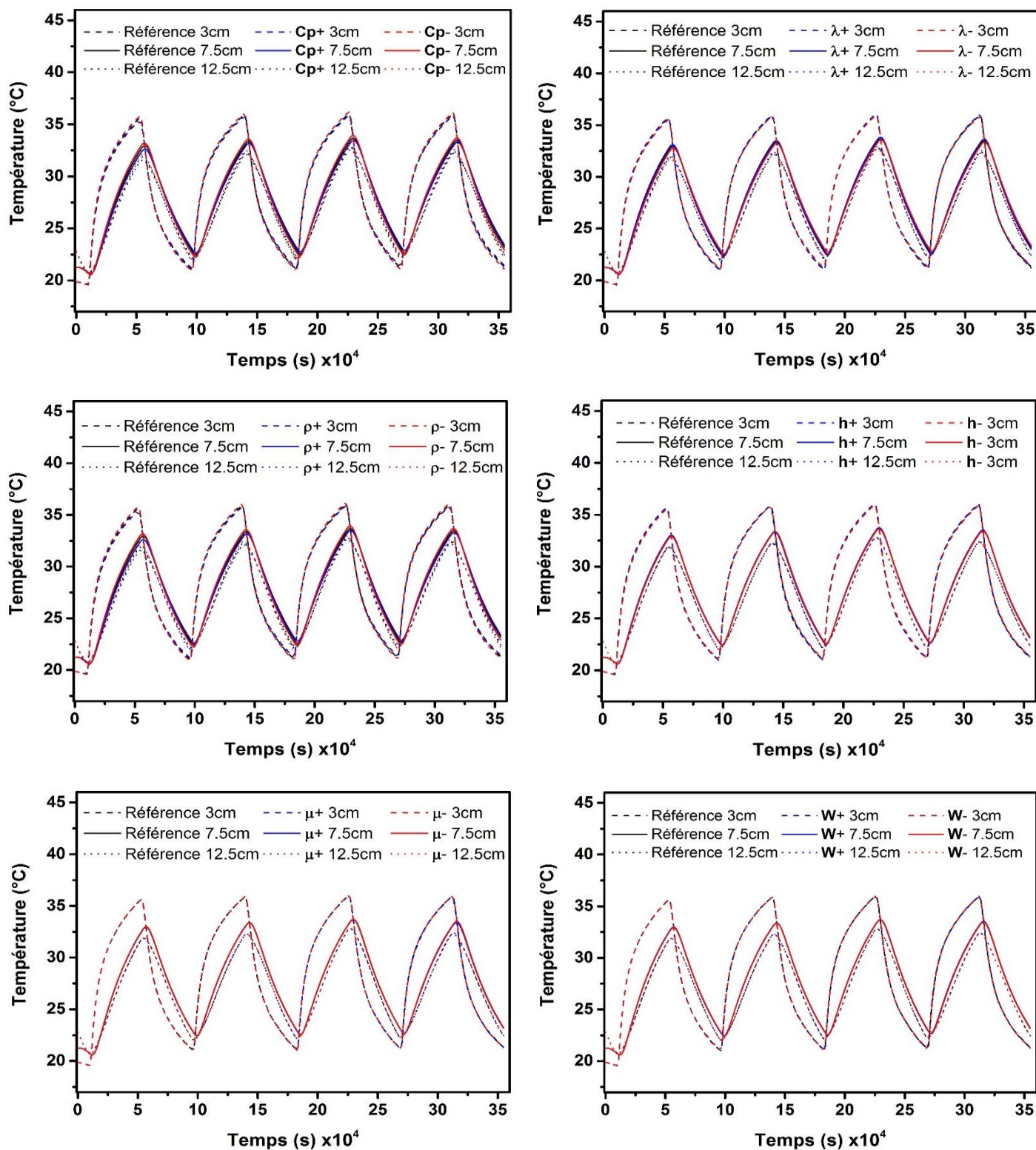
---

```
hold on
plot(x,ads) %plot de la courbe principale d'adsorption
plot(x,des) %plot de la courbe principale de désorption

%----- Enregistrement des valeurs de la courbe obtenue -----
%Create a table with the data and variable names
%T = table(rh, u1, 'VariableNames', { 'rh', 'u' } )
%Write data to text file
%writetable(T, 'muaelem.txt')
```

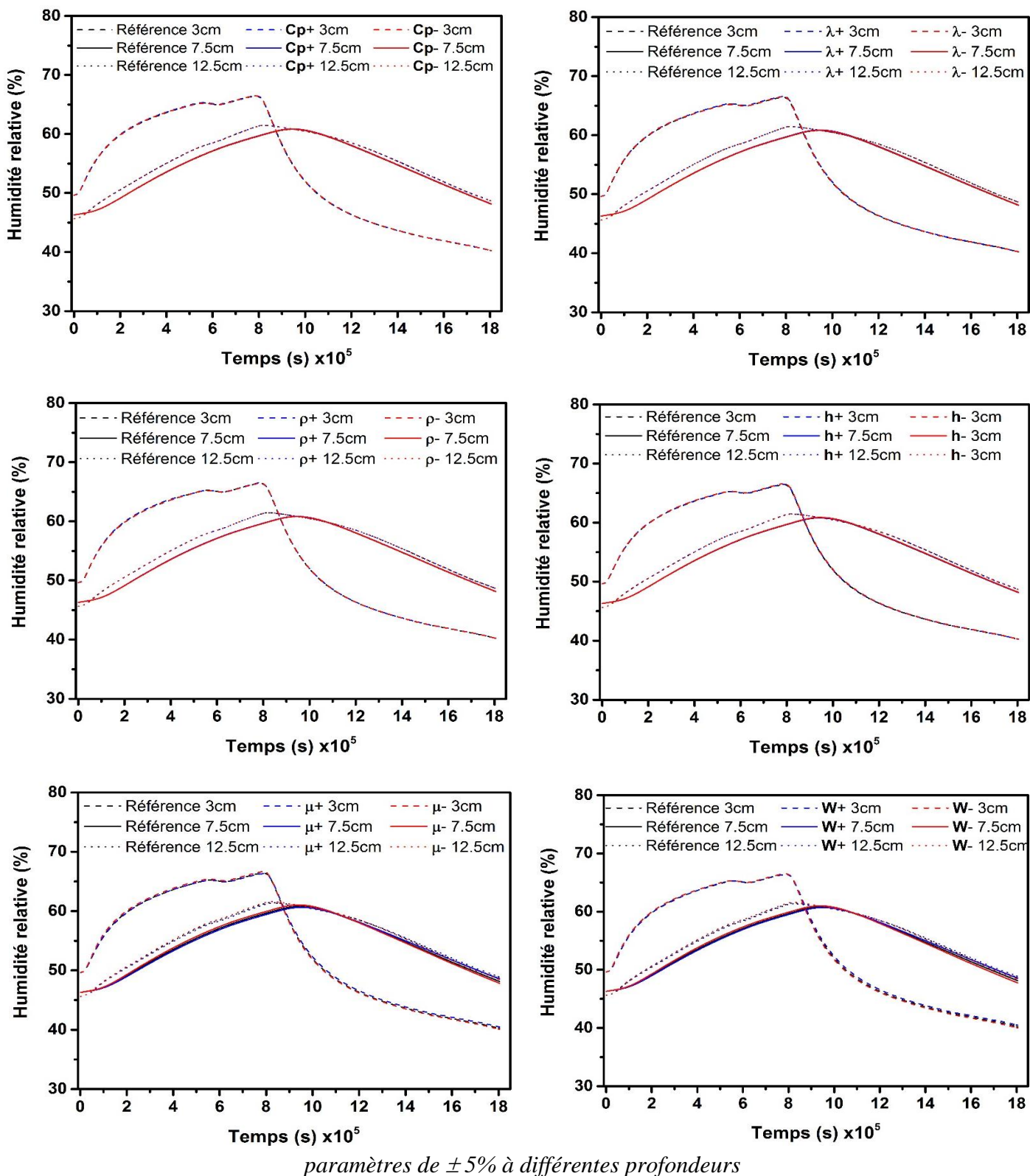


**Annexe B :** Nouveaux profils de température et d'humidité relative obtenus après avoir varié les différents paramètres de  $\pm 5\%$ ,  $\pm 15\%$  et  $\pm 25\%$



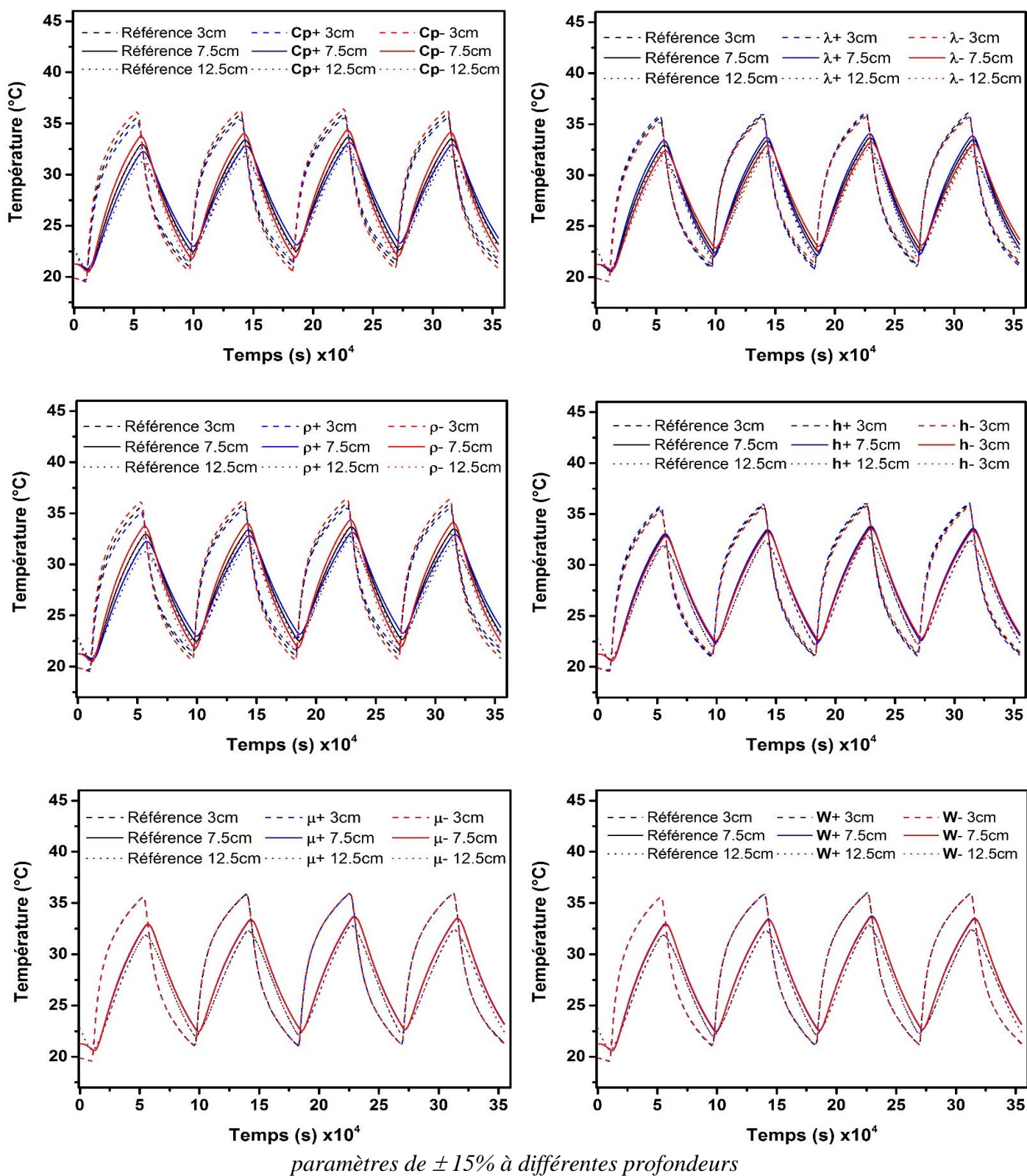
**Figure 1.** Profils de température obtenus montrant l'effet de la variation des différents paramètres de  $\pm 5\%$  à différentes profondeurs

Figure 2. Profils d'humidité relative obtenus montrant l'effet de la variation des différents



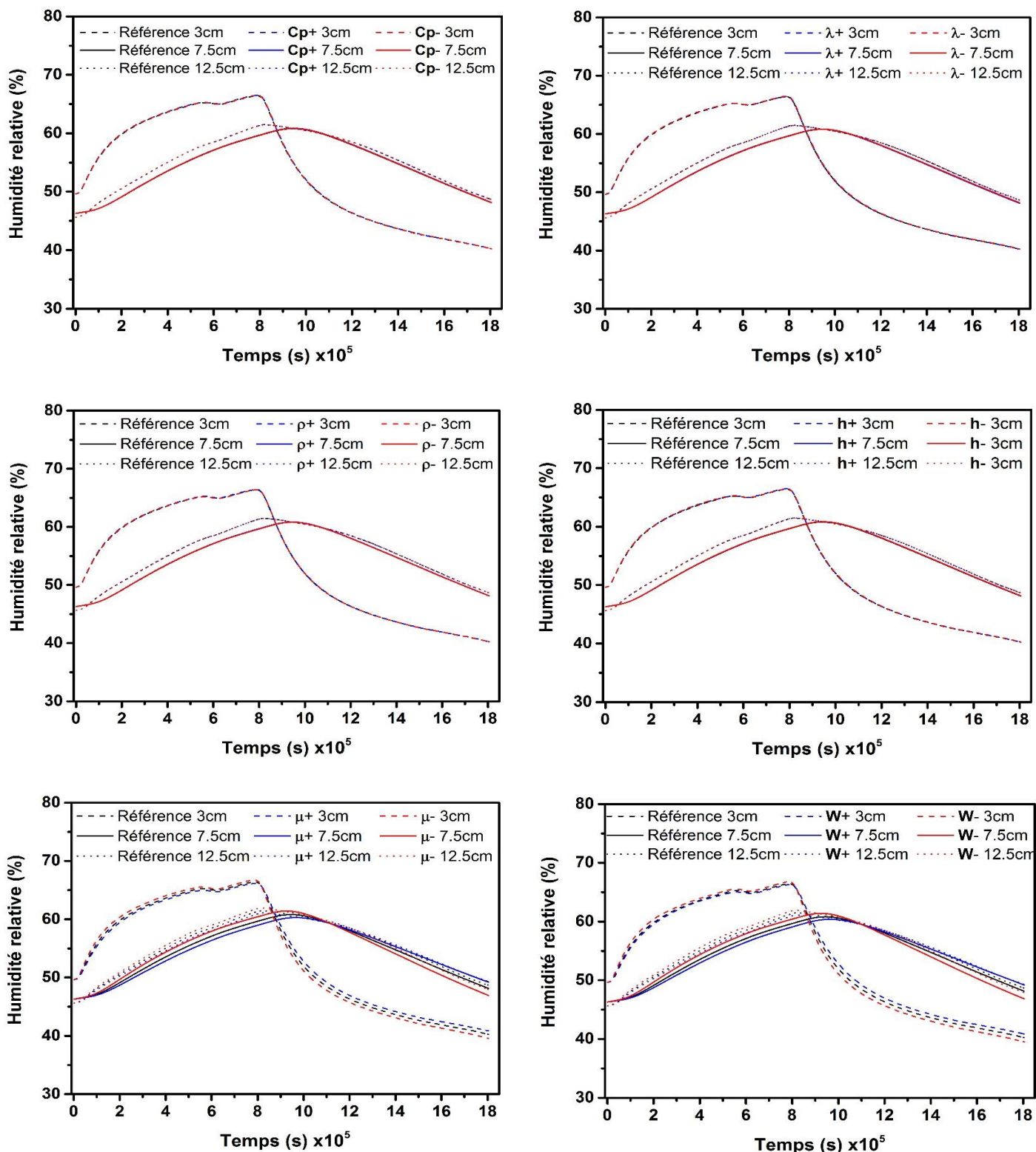
paramètres de  $\pm 5\%$  à différentes profondeurs

Figure 3. Profils de température obtenus montrant l'effet de la variation des différents



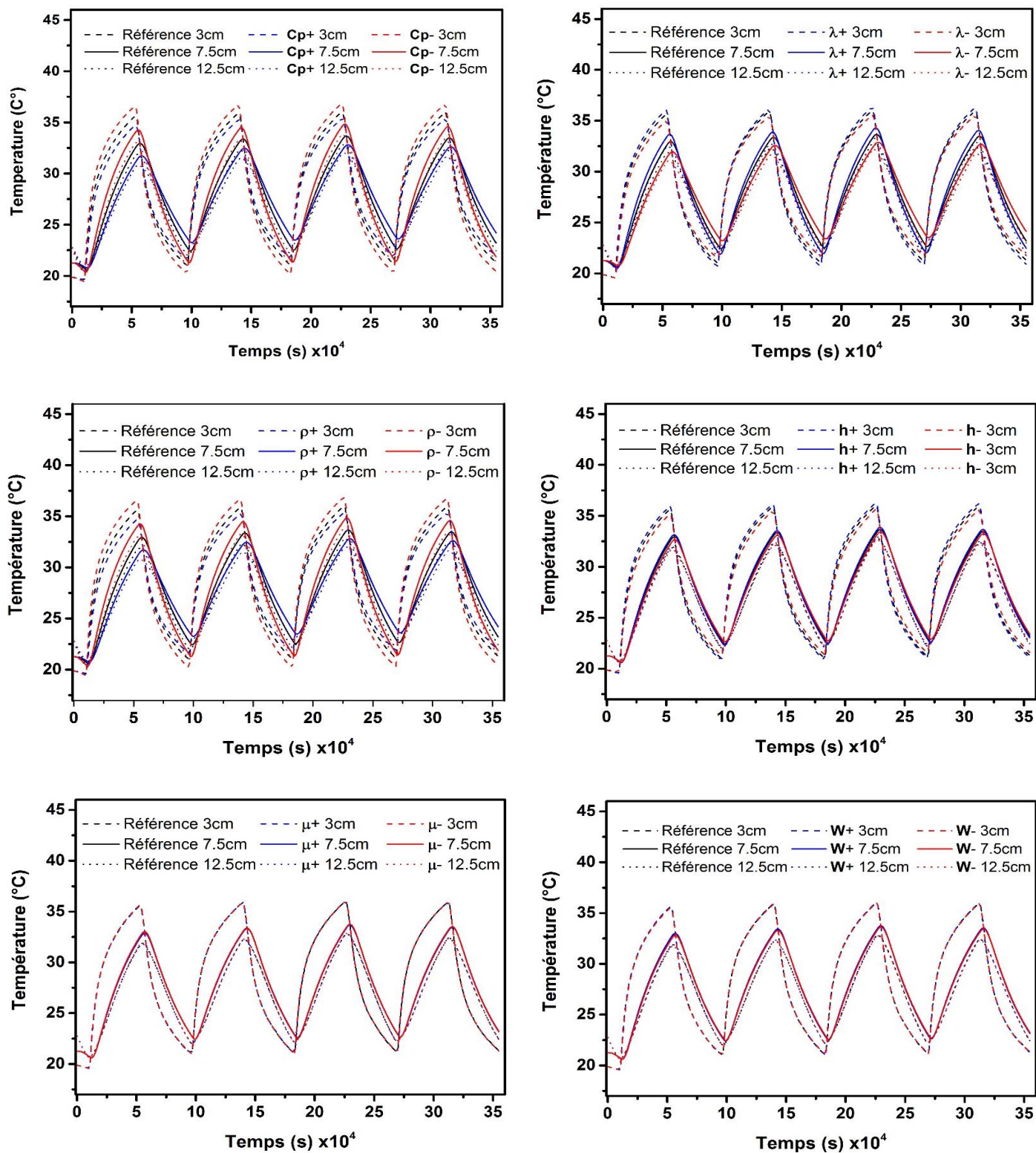
paramètres de  $\pm 15\%$  à différentes profondeurs

Figure 4. Profils d'humidité relative obtenus montrant l'effet de la variation des différents



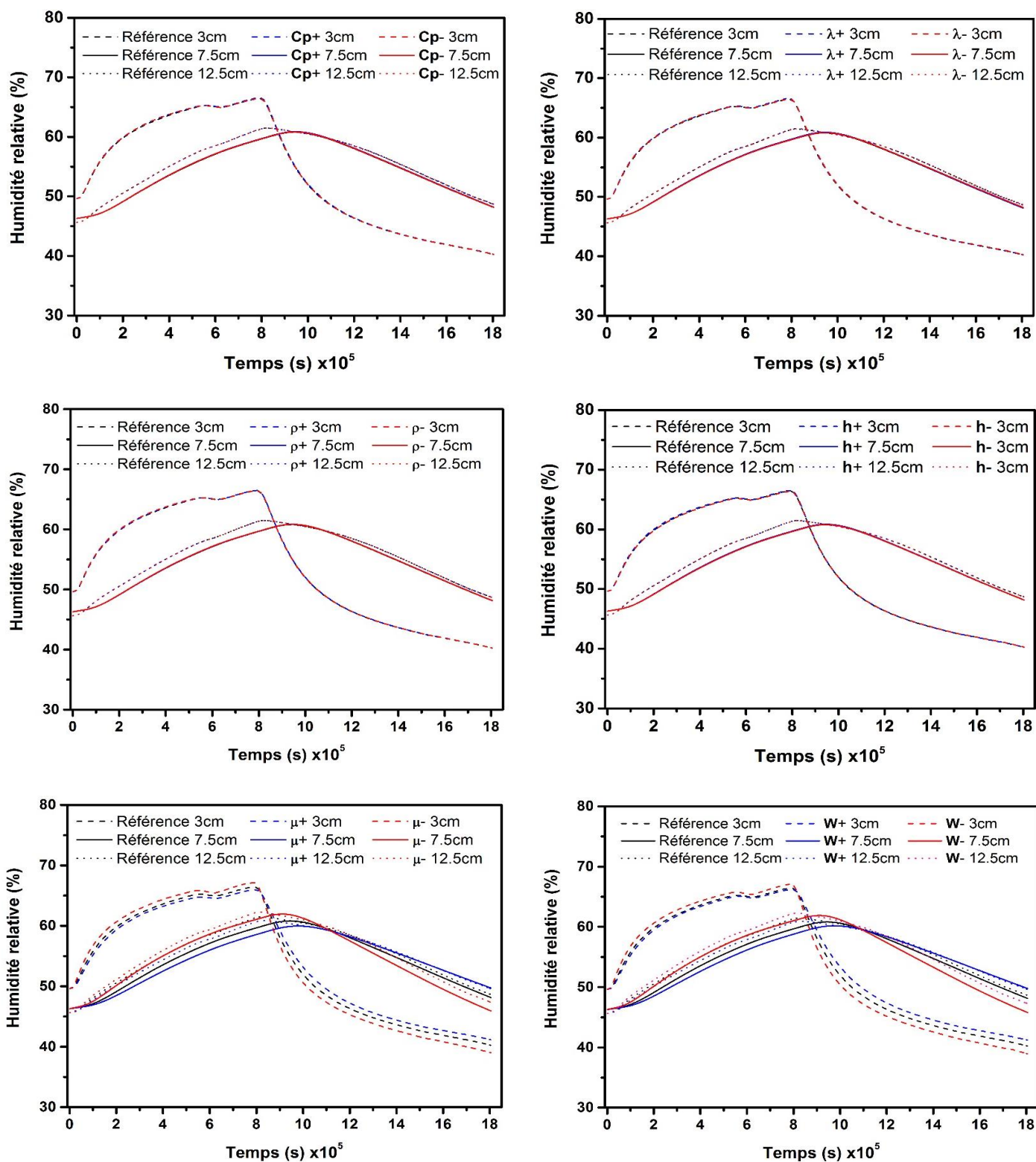
paramètres de  $\pm 15\%$  à différentes profondeurs

Figure 5. Profils de température obtenus montrant l'effet de la variation des différents



paramètres de  $\pm 25\%$  à différentes profondeurs

Figure 6. Profils d'humidité relative obtenus montrant l'effet de la variation des différents



paramètres de  $\pm 25\%$  à différentes profondeurs

**Titre du mémoire :** Etude, à l'échelle du mur, des transferts hygrothermiques dans les composites biosourcés

**Auteur :** ALIOUA Tarek

**Mots clés :** Béton de bois de palmier dattier, transfert de chaleur et de masse, modélisation, matériaux biosourcés.

### **Résumé**

Dans ce travail de thèse, le transfert hygrothermique dans le béton de bois de palmier dattier (DPC) a été étudié numériquement à l'échelle de la paroi. Dans une première partie, les phénomènes de transferts de chaleur et de masse sont modélisés. Ensuite, l'effet du maillage sur la précision des résultats numériques a été étudié pour les modèles développés. Dans la deuxième partie du travail, les modèles développés ont été validés avec des données expérimentales pour le cas d'un mur en DPC. Les résultats ont montré que les modèles étudiés donnent de bonnes prédictions des profils de température et d'humidité relative. De plus, la prise en compte d'un modèle d'hystérésis permet d'améliorer les résultats du transfert hydrique. L'étude de validation a été suivie par une étude numérique comparative de la performance hygrothermique d'un mur en DPC par rapport à un matériau d'isolation classique. Il a été constaté que le DPC possède de meilleures performances en termes d'isolation et d'inertie thermiques. Dans la dernière partie de ce travail, une étude de sensibilité a été réalisée pour évaluer l'effet des différents paramètres et des conditions sur les résultats du modèle hygrothermique. Les résultats obtenus ont permis de mettre l'accent sur les sources possibles d'erreurs dans les profils numériques. Le transfert de chaleur est influencé par les incertitudes sur les valeurs de la capacité thermique et de la masse volumique tandis que les paramètres qui influent le transfert d'humidité sont l'isotherme de sorption et les facteurs de résistance à la diffusion de vapeur. Par ailleurs, Il a été noté que le transfert d'humidité est très sensible à toute erreur dans les conditions initiales ou la position des capteurs. De plus, La négligence de la diffusion d'eau liquide dans le modèle a conduit à des sous-estimations importantes dans les profils d'humidité relative pendant la phase d'adsorption.

**Title:** Study, at wall scale, of hygrothermal transfer in bio-based composites

**Keywords:** Date palm concrete, heat and mass transfer, modelling, bio-based building materials.

### **Abstract**

In this thesis work, the hygrothermal transfer in date palm concrete (DPC) has been studied numerically at wall scale. In the first part, the phenomena of heat and mass transfer are modeled. Then, the effect of mesh on the precision of the numerical results was studied for the developed models. In the second part, the developed models have been validated with experimental data for the case of a DPC wall. The results show that the studied models give good predictions of the temperature and relative humidity profiles. In addition, taking into account a hysteresis model improves the results of moisture transfer. The validation study was followed by a comparative numerical investigation of the hygrothermal performance of a DPC wall compared to a conventional insulation material. DPC was found to perform better in terms of thermal insulation and thermal inertia. In the last part of this work, a sensitivity analysis was carried out to assess the effect of the different parameters and conditions on the hygrothermal model outcome. The obtained results highlighted the possible sources of errors in the resulting numerical profiles. Heat transfer is influenced by errors in heat capacity and density, while the parameters that influence moisture transfer are the sorption isotherm and the vapor diffusion resistance factors. Furthermore, it was noted that moisture transfer is very sensitive to any errors in initial conditions or sensors position. In addition, the neglect of liquid water diffusion in the model led to significant underestimates in the relative humidity profiles during the adsorption phase.