



HAL
open science

Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre

Yacine Ait Oumeziane

► **To cite this version:**

Yacine Ait Oumeziane. Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre. Génie civil. INSA de Rennes, 2013. Français. NNT : 2013ISAR0007 . tel-00871004

HAL Id: tel-00871004

<https://theses.hal.science/tel-00871004>

Submitted on 8 Oct 2013

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

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

Résumé

Le béton de chanvre constitue une solution constructive conforme aux objectifs en matière de développement durable.

Sa morphologie structurale, induite par l'association de fibres végétales poreuses à une matrice minérale grenue, se traduit par une forte porosité et une densité limitée. Le béton de chanvre présente ainsi des propriétés hygrothermiques très intéressantes : sa faible conductivité thermique lui confère de bonnes capacités d'isolation et sa forte perméabilité au transport d'eau favorise le transfert d'humidité. En outre, il est caractérisé par un comportement thermohydrrique hystérétique gouverné en humidité et en température qui conditionne l'évolution de ses propriétés.

L'objectif de ce travail est d'évaluer sa réponse hygrothermique aux sollicitations climatiques, enjeu majeur pour le développement de cette solution technologique face aux problématiques énergétiques et de confort dans le bâtiment.

La difficulté d'évaluation de cette réponse réside dans la complexité des phénomènes couplés des transferts de masse et de chaleur auxquels est soumise la paroi. Le transfert d'humidité au sein de parois poreuses est régi par le transport diffusif d'eau sous forme liquide et vapeur. Le transfert de chaleur dans les milieux poreux humides est dû à plusieurs mécanismes simultanés comme la conduction thermique ou le phénomène d'évaporation-condensation. Par ailleurs, dans le cadre de la physique du bâtiment, les surfaces externes sont notamment soumises au rayonnement solaire, à la pluie ou aux phénomènes de convection mixte, naturelle et forcée, dus à la température d'air ambiant et au vent ou aux systèmes de ventilation.

Dans un premier temps, un modèle numérique de transferts hygrothermiques HAM (Heat, Air and Moisture) prenant en compte ces phénomènes a été développé.

Afin d'alimenter ce modèle numérique, l'étude est par ailleurs focalisée sur la modélisation des propriétés thermiques et hydriques du matériau en s'appuyant sur les résultats de différents essais de caractérisation. Elle permet également d'appréhender l'effet d'une variation de la masse volumique du béton de chanvre sur ses propriétés.

Les résultats du modèle sont alors confrontés aux mesures expérimentales réalisées sur une paroi en béton de chanvre placée dans une enceinte biclimatique dont les régulations suivent un programme choisi. Une analyse de sensibilité aux paramètres montre que le transfert thermo-hydrrique est très influencé par le paramètre teneur en eau.

La modélisation de l'effet hystérétique thermo dépendant qui conditionne la capacité de stockage hydrique et influe sur le transport de masse et de chaleur s'avère nécessaire pour bien appréhender le comportement du matériau. La prise en compte du phénomène d'hystérésis sur l'évolution de la teneur en eau produit ainsi des résultats de simulation pertinents en accord avec les réponses expérimentales obtenues sous sollicitations hydriques et thermiques cycliques.

En outre, le travail est étendu à l'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. Finalement, la notion de confort hygrothermique est discutée en configuration réelle d'utilisation sous sollicitations climatiques typiques annuelles.

Abstract

The use of hemp concrete, an environmentally friendly material, participates in a process of sustainable development in the residential sector.

The association of porous vegetable fibers and a grainy mineral matrix gives a strong porosity and a limited density. Therefore hemp concrete has very interesting hygrothermal properties: a low thermal conductivity which offers good insulation capacities and a high moisture permeability which favors moisture transport. Besides it is characterized by a hysteretic hygrothermal behavior governed by humidity and temperature which determines the evolution of its properties.

This work deals with the evaluation of the hemp concrete hygrothermal response to climatic stresses. This objective is a main issue for the development of that kind of material faced with energetics problems and the notion of comfort feeling in buildings.

The evaluation of the hygrothermal behavior of a hemp concrete wall is linked to coupled heat and mass transfer. Mass transfer is governed by moisture transport in liquid and vapor forms. Heat transfer is mainly carried out by conduction and phase change in pores. Moreover in building physics, external surfaces of porous walls are submitted to solar radiation, rain or phenomenon of natural and forced convection due to ambient temperature and wind or ventilation systems.

Firstly a numerical HAM transfer model (HAM: Heat, Air and Moisture) able to take into account these phenomena is built.

In order to feed this model, the modeling of hemp concrete hygrothermal properties is lead based on experimental characterization campaigns.

The study points out also the influence of the hemp concrete hygrothermal properties depending on a variation of the density.

The results of the model are thus compared to the experimental measures collected on a hemp concrete wall in a biclimatic room of which regulation follows a chosen program. A sensitivity analysis to the parameters of the model enables to show that the hygrothermal transfer is very influenced by the moisture content paramete .

The thermal dependence of the hysteretic effect determines the hydric capacity of moisture storage and the heat and moisture transport through the material. The consideration of this phenomenon is necessary to well understand and reproduce the hygrothermal behavior of the hemp concrete. The modeling of the hysteresis gives simulated results in good agreement with the experimental ones obtained under hydric and thermal cyclic stresses.

Moreover the work is extended to the numerical study of the influence of the nature and the thickness of a coating layer on the external surfaces of a hemp concrete wall. Finally a discussion about the notion of hygrothermal comfort is carried out on a wall in real configuration of operation under typical annual climatic conditions.

ueb

2013

Yacine Aït Ouméziane

Thèse



THESE INSA Rennes présentée par
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne pour obtenir le titre de **Yacine Aït Ouméziane**
DOCTEUR DE L'INSA DE RENNES ECOLE DOCTORALE : SDLM
Spécialité : Génie Civil LABORATOIRE : LGCGM

Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre

Arnaud Jay
Ingénieur R&D CEA INES / Membre invité

Thèse soutenue le 27.03.2013
devant le jury composé de :

Patrick Glouannec
Professeur, Université de Bretagne Sud / Président

Monika Woloszyn
Professeur, Université de Savoie / Rapporteur

Nicolas Burlion
Professeur, Université de Lille 1 / Rapporteur

Mike Lawrence
Maître de conférence, Université de Bath (GB) / Examineur

Marjorie Bart
Maître de conférence, Université de Rennes 1 / Co-encadrant

Sophie Moissette
Maître de conférence, Université de Rennes 1 / Co-encadrant

Lanos Christophe
Professeur, Université de Rennes 1 / Directeur de thèse

N° d'ordre : 13ISAR 07/D13-07

Institut National des Sciences Appliquées de Rennes

20, Avenue des Buttes de Coësmes • CS 70839 • F-35708 Rennes Cedex 7

Tel : 02 23 23 82 00 - Fax : 02 23 23 83 96



INSA
RENNES

Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre

Yacine Aït Ouméziane



En partenariat avec



Table des matières

Table des matières.....	3
Nomenclature.....	11
Introduction générale.....	15
1. Contexte d'étude	18
1.1. Contexte politique, environnemental et scientifique.....	21
1.2. Intérêt des matériaux bio sourcés : pourquoi le béton de chanvre?.....	24
1.2.1. Qualité environnementale des matériaux bio sourcés	24
1.2.2. Généralités sur le béton de chanvre.....	27
1.2.2.1. La chènevotte	27
1.2.2.2. La chaux	28
1.2.2.2.1. La chaux aérienne	28
1.2.2.2.2. La chaux hydraulique.....	29
1.2.3. Utilisation et mise en œuvre.....	29
1.3. Etat de l'art sur l'étude de l'utilisation du chanvre dans le bâtiment.....	32
1.3.1. Caractérisation expérimentale	32
1.3.2. Performances hygrothermiques du béton de chanvre et notion de confort	34
1.3.3. Etude numérique du comportement hygrothermique du béton de chanvre sous conditions climatiques réalistes.....	36
1.4. Objectifs et axes de recherche	41
1.4.1. Cadre de l'étude	41
1.4.2. Support et cadre expérimental.....	42
1.5. Méthodologie de travail	45

2. Modélisation des transferts de masse et de chaleur en milieu poreux.....	47
2.1. Introduction	50
2.2. Cadre de la modélisation	51
2.2.1. Description des milieux poreux.....	51
2.2.2. Un modèle de conservation	52
2.3. Transfert de masse	55
2.3.1. Stockage d'humidité.....	55
2.3.2. Lois de transfert.....	59
2.3.2.1. Phénomène de diffusion	60
2.3.2.1.1. Diffusion de la vapeur d'eau	61
2.3.2.1.2. Diffusion de l'eau liquide	63
2.3.2.1.3. Diffusion d'air.....	66
2.3.2.2. Phénomène d'advection	66
2.3.2.2.1. Advection de la vapeur d'eau.....	67
2.3.2.2.2. Advection d'air	68
2.3.3. Bilan de conservation	68
2.3.3.1. Equation de conservation de la masse d'air	68
2.3.3.2. Equation de conservation de la masse d'eau	69
2.4. Transfert de chaleur.....	70
2.4.1. Stockage de chaleur.....	70
2.4.2. Lois de transfert.....	71
2.4.2.1. Phénomène de conduction.....	72
2.4.2.2. Phénomène d'advection	73
2.4.2.3. Transfert thermique par chaleur sensible	73
2.4.2.4. Phénomène de changement de phase	74
2.4.3. Bilan de conservation	74
2.5. Bilan des transferts.....	75
2.6. Transferts en multicouche	76
2.7. Conditions aux limites.....	78
2.7.1. Le rayonnement.....	78
2.7.2. La convection thermique surfacique	80
2.7.2.1. Convection naturelle	81
2.7.2.2. Convection forcée	84
2.7.2.3. Convection mixte	85
2.7.3. La convection massique surfacique.....	86

2.7.4. L’advection de vapeur par circulation d’air humide	87
2.7.5. Le changement de phase de surface	87
2.7.6. La diffusion d’eau liquide	88
2.7.7. Bilan des échanges ambiance/milieu.....	88
2.8. Traitement numérique.....	90
2.8.1. Implémentation numérique.....	90
2.8.2. Résolution numérique	90
2.8.2.1. Comsol Multiphysics.....	90
2.8.2.2. Matlab.....	91
2.8.2.3. Comparaison et synthèse	94
2.9. Validation numérique	95
2.9.1. Propriétés des matériaux	96
2.9.2. Cas test n°1.....	97
2.9.3. Cas test n°2.....	100
2.9.4. Cas test n°3.....	101
2.9.5. Cas test n°4.....	102
2.9.6. Cas test n°5.....	105
2.10. Conclusion.....	107
3. Modélisation des propriétés isothermes du béton de chanvre	109
3.1. Introduction	111
3.2. Propriétés physiques	112
3.2.1. Masse volumique apparente normative à 23°C/50%HR.....	112
3.2.2. Masse volumique apparente à l’état sec	112
3.2.3. Porosité totale et porosité ouverte	114
3.2.4. Bilan des caractéristiques physiques	116
3.3. Propriétés thermiques.....	118
3.3.1. Conductivité thermique	118
3.3.2. Capacité thermique massique.....	120
3.3.3. Bilan des caractéristiques thermiques	122
3.4. Propriétés hydriques	123
3.4.1. Isothermes de sorption : points expérimentaux.....	123
3.4.2. Modélisation de la courbe d’adsorption principale	125
3.4.3. Perméabilité apparente à la vapeur : valeurs expérimentales.....	128
3.4.4. Modélisation du transport d’humidité	131
3.4.4.1. Evaluation expérimentale de la perméabilité apparente à la vapeur	131

3.4.4.2.	Modèle de perméabilité apparente	136
3.4.4.3.	Modèle de Künzle de séparation des contributions vapeur et liquide	137
3.4.4.4.	Comparaison des modèles	139
3.4.4.5.	Diffusion vapeur, liquide et totale	142
3.4.5.	Bilan des caractéristiques hydriques	143
3.5.	Influence de la masse volumique.....	145
3.5.1.	Porosité et teneur en eau.....	145
3.5.2.	Teneur en eau et courbe d'adsorption principale	146
3.5.2.1.	Processus et résultats expérimentaux	147
3.5.2.2.	Analyse.....	149
3.5.3.	Transport d'humidité.....	155
3.5.4.	Propriétés thermiques	158
3.5.4.1.	Conductivité thermique	158
3.5.4.2.	Capacité thermique massique.....	161
3.5.5.	Bilan de l'étude	161
3.6.	Conclusion.....	163
4.	Application à une paroi monocouche sous sollicitations isothermes.....	165
4.1.	Introduction	167
4.2.	Présentation de la paroi expérimentale.....	168
4.2.1.	Description de la paroi	168
4.2.2.	Métrologie mise en place	172
4.3.	Réponse hygrothermique expérimentale de la paroi	177
4.3.1.	Sollicitations climatiques imposées à la paroi.....	177
4.3.2.	Choix d'une séquence d'étude	178
4.3.3.	Analyse des résultats expérimentaux	179
4.4.	Analyse des résultats de la simulation	182
4.4.1.	Cadre de la simulation.....	182
4.4.2.	Etudes des conditions aux limites	182
4.4.3.	Influence de la variation de masse volumique	186
4.4.3.1.	Sensibilité aux paramètres.....	186
4.4.3.2.	Comparaison des bétons de chanvre Easy R et Easy P	190
4.4.3.3.	Analyse du comportement hygrothermique du béton de chanvre.....	191
4.4.4.	Analyse du transfert d'air à travers la paroi	194
4.4.5.	Influence de la position des capteurs.....	198
4.4.6.	Etude d'une autre séquence isotherme	198
4.4.6.1.	Conditions de l'étude	199

4.4.6.2. Résultats et analyse	199
4.5. Conclusion.....	201
5. Le phénomène d’hystérésis	203
5.1. L’hystérésis ou le retard de l’effet sur la cause	206
5.1.1. Pourquoi étudier le phénomène d’hystérésis?	206
5.1.2. Origine du phénomène d’hystérésis	206
5.1.3. L’histoire hydrique	208
5.2. Caractérisation expérimentale de l’hystérésis du béton de chanvre	209
5.3. Prise en compte du phénomène d’hystérésis.....	211
5.3.1. Modélisation du phénomène d’hystérésis	211
5.3.2. Le modèle physique de Carmeliet	211
5.3.3. Le modèle mathématique de Huang	213
5.3.4. Le modèle empirique de Pedersen	215
5.3.5. Comparaison théorique des modèles	216
5.3.5.1. Points d’inversion.....	216
5.3.5.2. La i ^{ème} branche d’adsorption	217
5.3.5.3. La i ^{ème} branche de désorption.....	219
5.3.6. Traitement numérique	220
5.3.7. Validation numérique	222
5.4. Application au béton de chanvre	226
5.4.1. Modélisation de la courbe de désorption principale du béton de chanvre	226
5.4.1.1. Principe mathématique	226
5.4.1.2. Application	228
5.4.1.2.1. Courbe de désorption principale Easy R.....	228
5.4.1.2.2. Courbe de désorption principale Easy R-bis.....	229
5.4.1.3. Bilan et synthèse.....	230
5.4.2. Analyse du phénomène d’hystérésis : étude du béton de chanvre Easy R-bis.....	231
5.4.2.1. Étude du modèle de Pedersen.....	231
5.4.2.2. Application du modèle de Carmeliet.....	233
5.4.2.3. Application du modèle de Huang	234
5.4.2.4. Comparaison des modèles	235
5.4.3. Analyse et conclusion.....	237
5.5. Validation de la modélisation de l’hystérésis sur des essais de capacité hydrique	239
5.5.1. Définition et caractérisation de l’essai	239
5.5.2. Application au béton de chanvre Easy R	241
5.5.2.1. Résultats expérimentaux	241

5.5.2.2. Etude numérique	242
5.5.3. Application au béton de chanvre Easy P	244
5.5.3.1. Courbe de désorption principale du béton de chanvre Easy P	244
5.5.3.1.1. Analyse de l'influence de la masse volumique	244
5.5.3.1.2. Analyse des capacités hydriques	245
5.5.3.1.3. Confrontation expérimentale	246
5.5.4. Bilan	249
5.6. Application à la paroi.....	250
5.6.1. Influence de la prise en compte de l'hystérésis	250
5.6.2. Histoire hydrique et teneur en eau initiale.....	251
5.6.2.1. Teneurs en eau initiale extrêmes	252
5.6.2.2. Teneurs en eau initiales intermédiaires	255
5.6.2.3. Gradients de teneur en eau initiale	257
5.6.2.4. Optimisation de la réponse numérique	260
5.6.3. Application à une autre séquence isotherme	261
5.7. Conclusion.....	263
6. Effet de la température sur le comportement	
hygrothermique du béton de chanvre	265
6.1. Introduction	267
6.2. Approche théorique et modélisation de la contribution de la température au	
comportement hydrique	268
6.2.1. Température et isothermes de sorption	268
6.2.1.1. Synthèse bibliographique	268
6.2.1.2. Hypothèse de modification de la structure porale	270
6.2.1.3. Approche de Milly	271
6.2.1.4. Approche de Poyet	272
6.2.2. Température et transport d'humidité.....	276
6.3. Modélisation du comportement hydrique en température du béton de chanvre	
Easy R-bis.....	278
6.3.1. Comportement hydrique expérimental du béton de chanvre en température.....	278
6.3.2. Température et teneur en eau	280
6.3.2.1. Influence de la température sur la teneur en eau à saturation	280
6.3.2.2. Application de l'approche de Poyet	281
6.3.2.3. Prédiction des isothermes.....	284
6.3.3. Température et hystérésis.....	285
6.3.4. Température et propriétés hygrothermiques	287
6.3.5. Conclusion.....	288

6.4. Application à la paroi.....	290
6.4.1. Isothermes de sorption et température du béton de chanvre Easy P	290
6.4.2. Comportement hygrothermique de la paroi en conditions non isothermes.....	291
6.4.2.1. Conditions climatiques imposées	291
6.4.2.2. Analyse des résultats expérimentaux	292
6.4.3. Simulation et analyse du comportement hygrothermique de la paroi	294
6.4.3.1. Cadre de la simulation.....	294
6.4.3.2. Résultats de la simulation sur la paroi.....	294
6.4.3.2.1. Influence de la température.....	294
6.4.3.2.2. Analyse des conditions aux limites.....	296
6.4.4. Etude d'autres séquences non isothermes	298
6.4.4.1. Séquence non isotherme n°2	298
6.4.4.1.1. Conditions de l'étude	298
6.4.4.1.2. Résultats et analyse	298
6.4.4.2. Séquence non isotherme n°3	299
6.4.4.2.1. Conditions de l'étude	299
6.4.4.2.2. Résultats et analyse	300
6.5. Conclusion.....	302
7. Application en configuration réelle	303
7.1. Introduction	305
7.2. Application une paroi enduite.....	306
7.2.1. Propriétés des enduits étudiés	306
7.2.2. Simulation numérique et analyse des résultats.....	310
7.2.2.1. Cadre de la simulation.....	310
7.2.2.2. Influence du type d'enduit.....	311
7.2.2.3. Influence de l'épaisseur de l'enduit.....	316
7.2.2.4. Bilan	319
7.3. Simulation en situation réelle	321
7.3.1. Configuration d'étude	321
7.3.2. Conditions climatiques	321
7.3.3. Résultats de la simulation.....	324
7.3.3.1. Analyse des résultats à l'échelle de l'année	324
7.3.3.2. Analyse des résultats sur trois années	328
7.3.3.3. Intérêt de l'enduit	329
7.4. Comparaison de différentes solutions constructives	331
7.4.1. Présentation des solutions constructives étudiées	331
7.4.2. Résultats de la simulation.....	333
7.4.2.1. Distributions d'humidité relative et de température annuelles.....	333

7.4.2.2. Comparaison des paramètres de surface intérieure	336
7.4.2.3. Discussion sur la notion de confort d'hiver / confort d'été.....	338
7.4.3. Bilan	339
7.5. Conclusion.....	340
Conclusions et perspectives.....	341
Références.....	345

Nomenclature

La nomenclature contient une liste non exhaustive des symboles et abréviations utilisés. La signification de certains symboles est précisée localement.

Symboles latins

a	Diffusivité thermique de l'air	$[m^2.s^{-1}]$
c	Capacité thermique massique isobare	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
c*	Capacité thermique massique équivalente	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
c_{inv}	Critère d'inversion	[-]
C_φ	Coefficient de Milly	$[K^{-1}]$
D_v^T	Coefficient de diffusion vapeur sous gradient de température	$[kg.K^{-1}.m^{-1}.s^{-1}]$
D_φ	Diffusivité hydrique	$[m^2.s^{-1}]$
D_T	Diffusivité thermique	$[m^2.s^{-1}]$
D_{l,w}^T	Coefficient de diffusion liquide isotherme	$[m^2.s^{-1}]$
D_l^T	Coefficient de diffusion liquide sous gradient de température	$[kg.K^{-1}.m^{-1}.s^{-1}]$
D_l	Coefficient de diffusion liquide isotherme	$[m^2.s^{-1}]$
D_v	Coefficient de diffusion vapeur isotherme	$[m^2.s^{-1}]$
D_t	Coefficient de diffusion hydrique total	$[m^2.s^{-1}]$
D_l^φ	Coefficient de conduction liquide	$[kg.m^{-1}.s^{-1}]$
e	Epaisseur	[m]
E_T	Effusivité thermique	$[J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-0.5}]$
E_φ	Effusivité hydrique	$[kg.m^{-2}.K^{-1}.s^{-0.5}]$
F	Facteur de forme	[-]
g	Densité de flux de masse	$[kg.m^{-2}.s^{-1}]$
G	Eclairement	$[W.m^{-2}]$
H	Enthalpie	$[J.m^{-3}]$
h	Coefficient d'échange thermique surfacique	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
I_N	Rayonnement solaire total incident normal à la paroi	$[W.m^{-2}]$
i	Ordre de la courbe intermédiaire de sorption	[-]
k	Perméabilité absolue	$[m^2]$
k_e	Perméabilité effective	[-]

k_r	Perméabilité relative	[-]
K_l	Conductivité hydraulique	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]
l_v	Chaleur latente de vaporisation	[J.kg ⁻¹]
L	Longueur caractéristique	[m]
Le	Nombre de Lewis	[-]
m	Masse	[kg]
M_i	Masse molaire de l'espèce i	[g.mol ⁻¹]
n_0	Porosité ouverte	[%]
n	Porosité totale	[%]
Nu	Nombre de Nusselt	[-]
p	Pression	[Pa]
p_v	Pression partielle de vapeur	[Pa]
p_{sat}	Pression partielle de vapeur saturante	[Pa]
p_{atm}	Pression atmosphérique	[Pa]
p_{suc}	Pression de succion (ou pression capillaire)	[Pa]
p_l	Pression liquide	[Pa]
p_t	Pression totale	[Pa]
Pr	Nombre de Prandtl	[-]
q_d	Chaleur différentielle de sorption	[J.kg ⁻¹]
q_{st}	Chaleur isostérique	[J.kg ⁻¹]
q	Densité de flux de chaleur	[W.m ⁻²]
r_m	Rapport de mélange	[-]
R	Constante des gaz parfaits	[8,314 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
R_f	Coefficient de rugosité de surface	[-]
r	Rayon de pore	[m]
r_k	Rayon de ménisque	[m]
Ra	Nombre de Rayleigh	[-]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
S_e	Saturation effective	[-]
s	Sensibilité relative	[%]
T	Température	[K]
T_{ref}	Température de référence	[296,15 K]
t	Temps	[s]
u	Teneur en eau massique	[kg.kg ⁻¹]
u_{sat}	Teneur en eau massique à saturation	[kg.kg ⁻¹]
u_m	Teneur en eau moléculaire	[kg.kg ⁻¹]
u_{cr}	Teneur en eau critique	[kg.kg ⁻¹]
u_{max}	Teneur en eau maximale	[kg.kg ⁻¹]
V	Volume	[m ³]

v	Vitesse de l'air	[m.s ⁻¹]
w	Teneur en eau	[kg.m ⁻³]
x	Distance à la surface intérieure de paroi	[m]

Symboles grecs

(α, η, m)	Paramètres du modèle VG	[-]
α	Absorptivité	[-]
β^*	Coefficient de dilatation thermique	[K ⁻¹]
β	Coefficient d'échange massique surfacique	[kg.Pa ⁻¹ .m ⁻² .s ⁻¹]
$\delta_{p,a}$	Perméabilité à la vapeur de l'air	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]
$\delta_{p,app}$	Perméabilité apparente à la vapeur	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]
δ_p	Perméabilité à la vapeur	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]
δ_{air}	Perméabilité à l'air du matériau	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]
ε	Emissivité	[-]
θ	Angle de contact	[°]
θ	Teneur en eau volumique	[m ³ .m ⁻³]
λ	Conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
μ_0	Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur	[-]
μ^*	Facteur de résistance apparent à la diffusion de la vapeur	[-]
μ_i	Viscosité dynamique de l'espèce i	[Pa.s]
ν	Viscosité cinématique	[m ² .s ⁻¹]
ρ_r	Masse volumique réelle	[kg.m ⁻³]
ρ_0	Masse volumique apparente à l'état sec	[kg.m ⁻³]
ρ	Masse volumique apparente	[kg.m ⁻³]
σ_b	Constante de Stefan-Boltzmann	[5,67.10 ⁻⁸ W.m ⁻² .K ⁻⁴]
σ	Tension superficielle	[J.m ⁻²]
τ	Tolérance relative de calcul	[-]
φ	Humidité relative	[-]

Indices

0	relatif à l'état sec
a	relatif à l'air
ads	relatif à l'adsorption principale
adv	relatif à l'advection
atm	relatif à l'atmosphère
ciel	relatif au ciel
cond	relatif à la conduction
conv	relatif à la convection
des	relatif à la désorption principale
ext	relatif à l'extérieur

forcée	relatif à la convection forcée
g	relatif à la phase gazeuse
init	relatif à l'instant initial
int	relatif à l'intérieur
l	relatif à l'eau liquide
lat	relatif à la chaleur latente
mixte	relatif à la convection mixte
naturelle	relatif à la convection naturelle
rad	relatif au rayonnement
sat	relatif à l'état saturé
sen	relatif à la chaleur sensible
sol	relatif au sol
surf	relatif aux surfaces externes
v	relatif à la vapeur

Abréviations

ACC	Aerated Cellular Concrete
ANR	Agence Nationale de la Recherche
Easy P	Béton de chanvre Easychanvre ($\rho_0=320 \text{ kg.m}^{-3}$)
Easy R	Béton de chanvre Easychanvre ($\rho_0=450 \text{ kg.m}^{-3}$)
Easy R-bis	Béton de chanvre Easychanvre ($\rho_0=396 \text{ kg.m}^{-3}$)
ECC	Enduit Chanvre-Chaux
Ecl	Enduit classique
ECP	Enduit Chaux-Plâtre
GES	Gaz à Effet de Serre
HAM	Heat Air and Moisture
HR	Humidité Relative
INSA	Institut National des Sciences Appliquées
LGCGM	Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique
LIMATB	Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne
MBV	Moisture Buffer Value
PRIR	Programme de Recherche d'Initiative Régionale
UEB	Université Européenne de Bretagne
VER	Volume Elémentaire Représentatif
VG	Van Genuchten

I Introduction générale

Les problématiques énergétiques et environnementales sont des enjeux majeurs dans la perspective globale de développement durable. Le secteur de l'habitat étant particulièrement énergivore, émetteur de gaz à effet de serre et consommateur de ressources naturelles, des objectifs d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments ont été proposés.

Le Grenelle de l'environnement lancé en France en 2007 participe à cette logique. La création de labels (BBC, HQE...) et de nouvelles normes constructives (RT 2012) sont autant d'outils qui permettent de répondre à ces objectifs.

Ce contexte conduit la communauté scientifique à réévaluer les performances du matériau de construction constitutif de l'enveloppe d'un bâtiment sur la base de son bilan énergétique et de son impact environnemental (épuisement des ressources naturelles, consommation d'énergie, émissions polluantes...).

Dans ce cadre, les matériaux bio-sourcés intégrant une composante végétale comme le béton de chanvre offrent une alternative intéressante aux solutions constructives traditionnelles. Ce matériau fait l'objet de différentes études scientifiques visant à évaluer les caractéristiques intrinsèques du matériau (performances thermiques, hydriques, mécaniques) ainsi que la caractérisation à l'échelle de la paroi. Cependant, le développement de modélisations du transfert thermo-hydrique au sein d'une paroi de béton de chanvre reste embryonnaire.

L'analyse de la morphologie structurelle du béton de chanvre, induite par l'association de fibres végétales poreuses en chanvre à une matrice minérale grenue généralement à base de chaux, indique une forte porosité et une densité limitée. Ce matériau composite complexe présente ainsi des propriétés hygrothermiques très intéressantes : sa faible conductivité thermique lui confère de bonnes capacités d'isolation et sa forte perméabilité au transport d'eau favorise le transfert d'humidité. Cependant, il est caractérisé par un comportement thermohydrique hystérétique gouverné en humidité et en température qui conditionne l'évolution de ces propriétés. Il est ainsi essentiel de tenir compte des spécificités de ce comportement pour évaluer la réponse hygrothermique dynamique d'une paroi en conditions d'utilisation.

La connaissance de cette réponse doit ainsi permettre d'aborder de façon optimale les étapes de conception de parois et d'optimisation des formulations sur la base d'un cahier des charges intégrant les notions de confort thermohydrrique et d'utilisation rationnelle de l'énergie.

La difficulté d'évaluation de cette réponse réside dans la complexité des phénomènes couplés des transferts de masse et de chaleur auxquels est soumise la paroi. Le transfert d'humidité au sein de parois en béton de chanvre est régi par le transport diffusif d'eau sous forme liquide et vapeur. La circulation d'air au sein du réseau poreux participe également au transport advectif de vapeur. Le transfert de chaleur dans un tel milieu poreux humide est dû à plusieurs mécanismes simultanés comme la conduction thermique, l'advection ou le changement de phase de l'eau lié aux phénomènes d'évaporation-condensation.

Les transferts dans la paroi sont également influencés par les conditions aux limites du problème. Dans le cadre de la physique du bâtiment, les surfaces externes des parois poreuses sont notamment soumises au rayonnement solaire, à la pluie ou aux phénomènes de convection mixte, naturelle et forcée, dus à la température d'air ambiant et au vent ou aux systèmes de ventilation.

L'objectif de ce travail est donc d'étudier à l'échelle de la paroi les phénomènes de transferts hygrothermiques en s'appuyant sur les résultats d'expérimentations réalisées en ambiance contrôlée afin d'aboutir au développement de modèles numériques de simulation aptes à reproduire les phénomènes de transfert et de transport dans la paroi ainsi que des interactions ambiance/paroi.

Ce travail est construit autour de sept chapitres qui ont pour but de répondre à la problématique d'étude du comportement hygrothermique du béton de chanvre et d'évaluation de la réponse d'une paroi.

Le premier chapitre précise ainsi le contexte environnemental et scientifique dans lequel s'inscrit ce travail. La synthèse bibliographique des dernières études sur le béton de chanvre vient justifier la démarche et la méthodologie retenues.

L'objectif du second chapitre est de proposer une modélisation qui soit capable de reproduire les phénomènes de transport et de stockage d'humidité, d'air et de chaleur au sein de milieux poreux. Elle doit prendre en compte les différents phénomènes de transfert auxquels peut être soumise une paroi en conditions réelles. Le problème sera limité à un transfert monodimensionnel.

Le chapitre 3 aborde la modélisation mathématique de l'évolution des paramètres caractéristiques traduisant les propriétés hygrothermiques d'un béton de chanvre référence. Ce travail est réalisé en s'appuyant sur les données issues de caractérisations expérimentales.

Au chapitre 4, les résultats issus du modèle de transferts alimenté par les propriétés hygrothermiques du béton de chanvre constitutif de la paroi sont ensuite confrontés aux résultats expérimentaux recueillis sur une paroi test placée dans une enceinte biclimatique. L'analyse de la sensibilité de la réponse hygrothermique de la paroi aux paramètres du modèle est réalisée en conditions isothermes et permet d'identifier les paramètres les plus

influent. Les effets d'une modification de la masse volumique du béton de chanvre sur les résultats de la simulation font l'objet d'une analyse particulière.

Le cinquième chapitre a pour objectif de caractériser expérimentalement le comportement hydrique hystérétique du béton de chanvre et de proposer une modélisation de ce phénomène. L'impact de la prise en compte de l'hystérésis sur la réponse simulée de la paroi en béton de chanvre est finalement analysé.

Le chapitre 6 est focalisé sur l'étude de l'influence de la température sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre en s'appuyant sur des données expérimentales complémentaires réalisées à l'échelle du matériau. La modélisation ainsi complétée est appliquée au cas de transferts non isothermes en comparant résultats numériques et expérimentaux obtenus à l'échelle de la paroi.

Le dernier chapitre présente une application directe de la modélisation complète du comportement hygrothermique du béton de chanvre en conditions d'utilisation réalistes. L'étude réalisée correspond à l'analyse du comportement d'une paroi multicouche typique d'une habitation (enduit + béton de chanvre) soumise à des sollicitations climatiques réalistes. Par ailleurs, les performances hygrothermiques d'une paroi en béton de chanvre sont finalement comparées à celles d'autres solutions constructives. La discussion menée est focalisée sur l'analyse des paramètres qui participent à l'évaluation de la notion de confort hygrothermique.

1

Contexte d'étude

Les préoccupations énergétiques et environnementales actuelles incitent au développement de solutions innovantes et efficaces, en particulier dans le secteur de l'habitat. Dans cette perspective, en quoi le béton de chanvre offre-t-il une alternative crédible aux solutions constructives traditionnelles? Qu'est-ce qui motive son utilisation dans le secteur de l'habitat ? Dans le cadre de cette problématique, ce chapitre s'appuie sur les données de la littérature pour justifier la démarche d'étude des transferts thermohydriques au sein d'une paroi en béton de chanvre.

SOMMAIRE

<u>1.1.</u>	<u>Contexte politique, environnemental et scientifique</u>	21
<u>1.2.</u>	<u>Intérêt des matériaux bio sourcés : pourquoi le béton de chanvre?</u>	24
1.2.1.	Qualité environnementale des matériaux bio sourcés	24
1.2.2.	Généralités sur le béton de chanvre.....	27
1.2.2.1.	La chènevotte	27
1.2.2.2.	La chaux	28
1.2.2.2.1.	La chaux aérienne	28
1.2.2.2.2.	La chaux hydraulique.....	29
1.2.3.	Utilisation et mise en œuvre.....	29
<u>1.3.</u>	<u>Etat de l'art sur l'étude de l'utilisation du chanvre dans le bâtiment</u>	32
1.3.1.	Caractérisation expérimentale	32
1.3.2.	Performances hygrothermiques du béton de chanvre et notion de confort	34
1.3.3.	Etude numérique du comportement hygrothermique du béton de chanvre sous conditions climatiques réalistes.....	36
<u>1.4.</u>	<u>Objectifs et axes de recherche</u>	41
1.4.1.	Cadre de l'étude	41
1.4.2.	Support et cadre expérimental.....	42
<u>1.5.</u>	<u>Méthodologie de travail</u>	45

1.1. Contexte politique, environnemental et scientifique

Le réchauffement du système climatique est une problématique vaste et complexe dont les enjeux sont multiples pour l'humanité. Selon les rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), outre l'augmentation des températures globales moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive des neiges et des glaces et une élévation du niveau moyen de la mer sont clairement identifiées. Localement, les écosystèmes naturels se trouvent perturbés par ces transformations climatiques.

L'essentiel du réchauffement climatique est attribuable à l'augmentation de concentration des Gaz à Effet de Serre (GES) d'origine anthropique dans l'atmosphère. Il trouve son origine dans une volonté humaine de développement irréfléchié lourde de conséquences pour la planète. Ainsi, les émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine, comme le CO₂, dans l'atmosphère participent activement au bouleversement climatique.

Comme le montre la figure 1-1, le secteur de l'énergie est le principal émetteur de CO₂ à l'échelle de la planète [GIEC 2007].

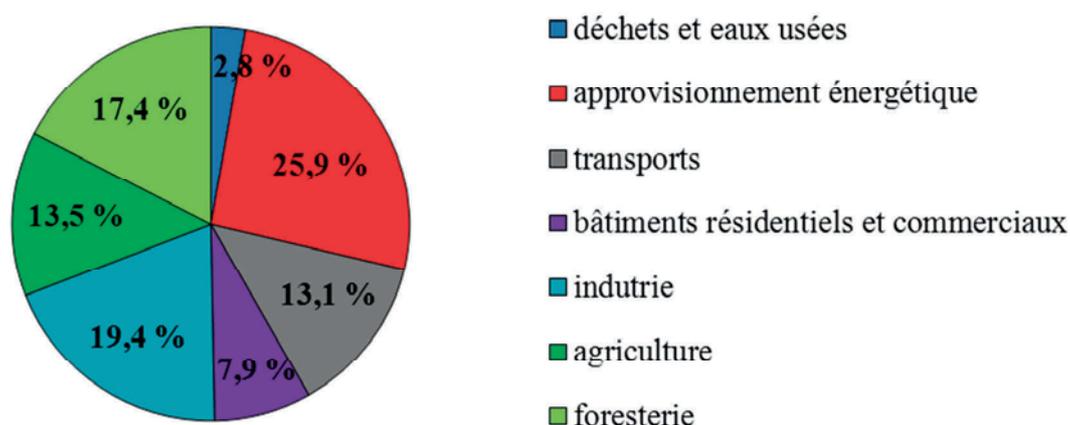


Figure 1-1 Part des émissions de CO₂ de différents secteurs économiques en 2007

Selon l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE), en 2009, en France métropolitaine, le secteur du bâtiment demeure le premier poste de consommation d'énergie (figure 1-2) avec près de 45%. Cette consommation est en hausse de 42% depuis 1970.

Il est en outre responsable de 25 % des émissions de CO₂, contre 28 % pour les transports, 22 % pour l'industrie, 12 % pour l'agriculture/sylviculture et 10 % pour les secteurs divers¹ (figure 1-3).

¹ Source INSEE

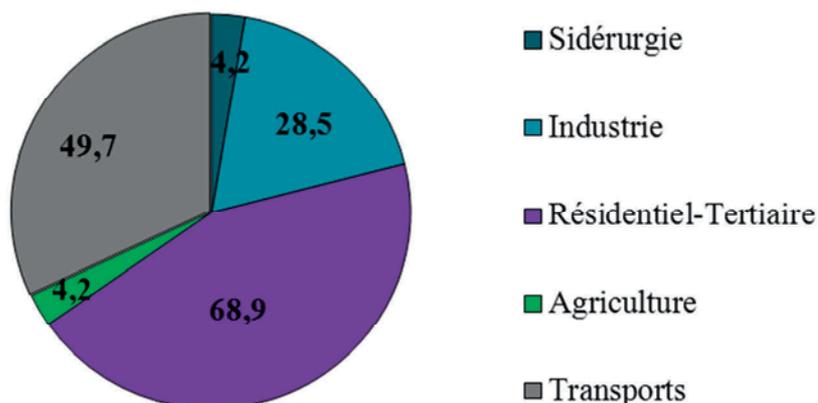


Figure 1-2 Consommation énergétique de différents secteurs économiques en 2009 (en millions de tep : tonnes d'équivalent pétrole)

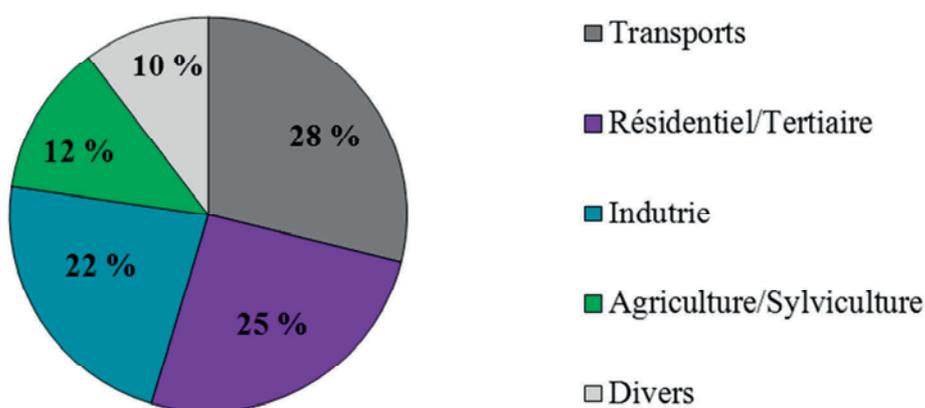


Figure 1-3 Part d'émission de CO₂ de différents secteurs économiques en 2009

Le domaine de l'habitat est ainsi un secteur sensible tant au niveau national qu'international. Il contribue largement aux émissions de GES. Les exigences environnementales ont conduit tout d'abord à identifier les sources de dépenses énergétiques et d'émission de GES dans le bâtiment. Selon les chiffres de l'INSEE, en 2007, 66 % de l'énergie consommée par le résidentiel-tertiaire est consacrée au chauffage (46 Mtep), 14 % à l'eau chaude sanitaire et à la cuisson, et 20% à l'électricité spécifique (éclairage, climatisation...). Les deux tiers de l'énergie consommée concernent les bâtiments résidentiels et un tiers le secteur tertiaire.

Ces observations ont conduit à une politique environnementale incitative d'économie d'énergie. En 2006, l'Union européenne a promulgué son « plan 20-20-20 »² dont l'objectif d'ici 2020, est de réduire de 20% l'émission de GES, d'augmenter de 20% l'utilisation des énergies renouvelables et d'améliorer de 20% l'efficacité énergétique de manière générale. En

² Communication de la Commission Européenne du 19 octobre 2006 intitulée : «Plan d'action pour l'efficacité énergétique : réaliser le potentiel»

2010, le parlement européen instaure une directive³ qui stipule que d'ici 2020, tout nouveau bâtiment doit être proche d'un bâtiment à « zéro énergie », objectif qui doit être atteint pour les bâtiments publics en 2018. La France a lancé en 2007 un Grenelle de l'environnement qui définit une feuille de route en faveur de l'écologie, du développement et de l'aménagement durable.

Le respect de ces objectifs nationaux et internationaux et leur application passe notamment par la création de labels. Au niveau européen, les labels Passivehaus en Allemagne et Minergie en Suisse font figure de labels référents. En France, un bâtiment basse consommation selon la réglementation RT 2012 est un bâtiment dont la consommation conventionnelle en énergie primaire pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage et les systèmes auxiliaires techniques est inférieur de 80% à la consommation réglementaire. En parallèle de l'appellation générique « bâtiment de basse consommation », un label a été créé, avec la dénomination Bâtiment de Basse Consommation. C'est une norme officielle française qui a été créée par l'arrêté du 3 mai 2007 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « haute performance énergétique ». Elle s'inspire notamment du label suisse Minergie. La norme fixe pour les logements neufs une exigence énergétique de 50 kWh_{ep}/(m²SHON.an)⁴. Il existe également un label Basse Consommation - Rénovation qui atteste de la conformité des travaux de rénovation à des exigences énergétiques établies (entre 64 et 120 kWh/m²/an). On peut également citer l'ensemble de labels officiels publics français Haute Performance Énergétique (HPE) qui intègrent et évaluent les performances énergétiques, sanitaires et environnementales d'un bâtiment au niveau de sa conception et de son entretien⁵.

Les objectifs imposés par ces labels stimulent la recherche et le développement de solutions constructives énergétiquement efficaces à l'empreinte environnementale réduite. En particulier, le choix du matériau de construction constitutif de l'enveloppe d'un bâtiment conditionne largement ses performances énergétiques et son impact environnemental. L'orientation vers des matériaux intégrant des composants bio sourcés et/ou des systèmes constructifs élaborés assurant plusieurs fonctions (isolation thermique, acoustique, régulation hydrique...) s'inscrit dans cette démarche.

³ Directive du parlement européen et du conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments (refonte)

⁴ kWh_{ep} : kWh d'énergie primaire SHON : surface hors œuvre nette

⁵ Décret n° 2009-1154 du 29 septembre 2009 créant un label « haute performance énergétique rénovation » pour certains bâtiments existants

1.2. Intérêt des matériaux bio sourcés : pourquoi le béton de chanvre?

1.2.1. Qualité environnementale des matériaux bio sourcés

La qualité environnementale d'une construction vise généralement à prendre en compte les trois "piliers" et enjeux du développement durable : environnementaux, sociaux et économiques, durant le cycle de vie du bâtiment (figure 1-4). La limitation des impacts environnementaux et la préservation d'une ambiance intérieure saine et confortable sont les moteurs scientifiques de ce développement. La recherche d'une viabilité économique et le respect d'une certaine équité sociale participent également à la transformation du mode de développement traditionnel vers un développement durable.

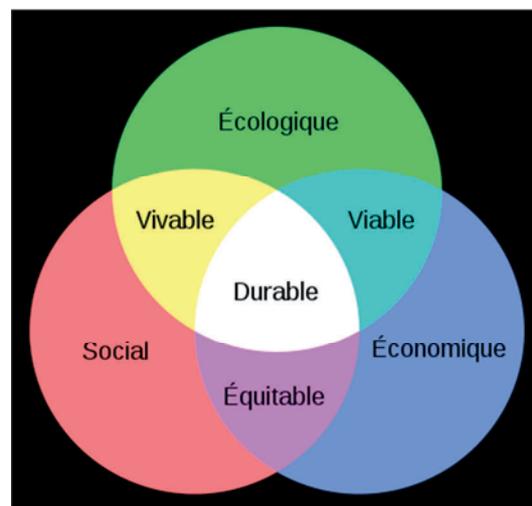


Figure 1-4 Diagramme de principe du développement durable

A ce titre, le choix du matériau de construction est un facteur clé de cette démarche globale de développement durable. Pour justifier l'utilisation d'un matériau, de nombreux critères économiques et environnementaux notamment sont pris en considération. L'analyse de cycle de vie du matériau qui prend en compte toute la chaîne depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa démolition est un indicateur de qualité environnementale (figure 1-5).

Dans le domaine de l'habitat, les matériaux d'origine végétale comme le chanvre, la paille ou le lin offrent une alternative sérieuse aux matériaux classiques. Leurs propriétés structurales et physiques permettent de répondre à la fois à des exigences sanitaires et à des besoins de confort et de réduction des impacts environnementaux. A ce titre, le grenelle de l'environnement préconise une utilisation de matériaux à base végétale hors bois d'œuvre à hauteur de 10% d'ici 2020. Parmi les matériaux d'origine végétale - matériaux « bio sourcés » - les matériaux à base de chanvre tiennent une place de choix.

D'un point de vue énergétique, les matériaux à base de chanvre possèdent une faible énergie grise par rapport à d'autres matériaux usuels de construction. Cette énergie grise est définie par

la quantité d'énergie nécessaire au cycle de vie d'un matériau, soit la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, à la transformation à la fabrication, au transport, à l'utilisation, à l'entretien et enfin au recyclage du matériau en fin de vie. Les processus de fabrication ainsi que le transport sont les principaux contributeurs à cette consommation d'énergie [Garnier 2012].



Figure 1-5 Analyse du cycle de vie⁶

Dans le domaine de la culture de chanvre, en 2003, la France était leader à l'échelle européenne avec 61% de la production totale (figure 1-6). Ce leadership provient d'une longue tradition de culture chanvrière française.

⁶ Image issue du site www.qualitae.fr

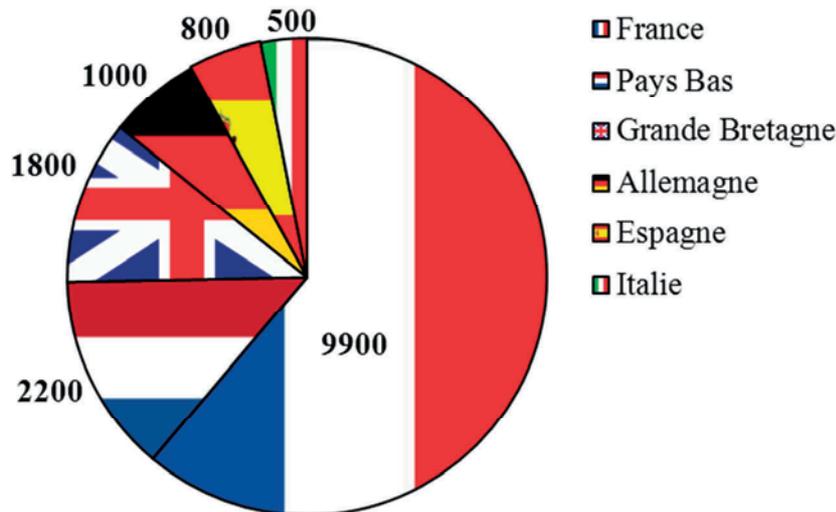


Figure 1-6 Surfaces cultivées en hectares des principaux pays européens producteurs de chanvre en 2003⁷

La proximité des lieux de production et d'utilisation est un facteur favorable à la fois environnemental par la réduction des émissions de GES liée aux transports et également économique par la diminution des coûts et temps de transport.

A plusieurs égards le chanvre est une plante respectueuse de l'environnement. Il participe à l'amélioration de la qualité des sols grâce à son réseau racinaire important qui favorise la mise en jachère. Même utilisée à l'échelle industrielle, sa culture nécessite peu d'engrais chimiques et ne requiert aucun traitement phytosanitaire (désherbant, fongicide, insecticide...). En outre, le phénomène de photosynthèse participe à la consommation du CO₂ atmosphérique d'autant plus que le chanvre bénéficie d'une croissance très rapide⁸.

Le processus de défibrage mécanique peu coûteux en énergie et sans traitement chimique nécessite cependant un outillage lourd et performant. Les résidus issus de ce processus sont valorisables par le grand nombre d'utilisations qu'ils proposent. Ainsi, le chènevis (graine de chanvre) offre de nombreuses perspectives dans l'industrie agroalimentaire ou les cosmétiques. Les fibres sont utilisées dans la confection de matières textiles, de cordages ou même dans la production de pâte à papier. Dans le domaine de l'habitat, elles sont utilisées comme laine d'isolation. Enfin, la chènevotte entre dans la formulation de bétons de chanvre employés comme matériau de construction (figure 1-7).

⁷ [Goudet 2008]

⁸ Source Construire en Chanvre (www.construction-chanvre.asso.fr)

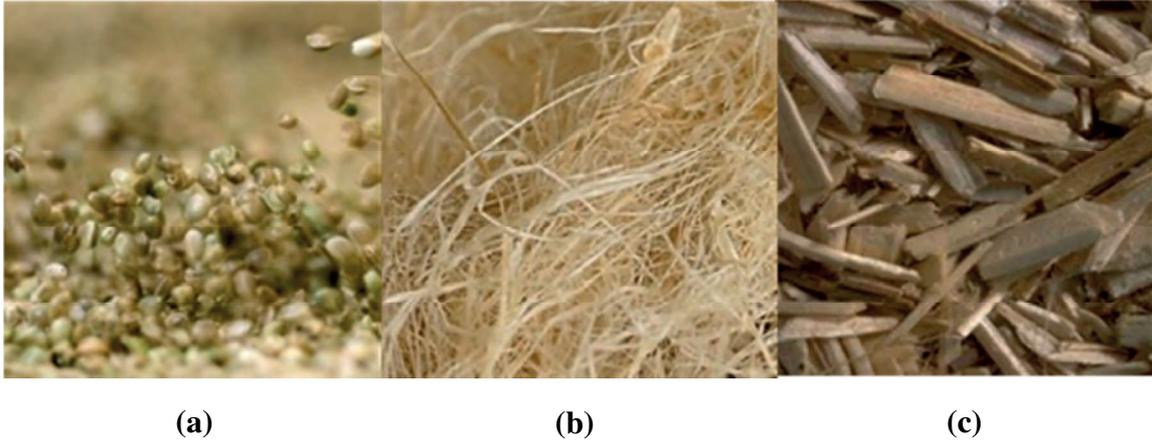


Figure 1-7 Chènevis (a), fibres (b) et chènevottes (c)

Dans le cadre de cette thèse, l'étude porte sur le béton de chanvre, mélange d'un liant minéral avec de la chènevotte. Le paragraphe suivant détaille sa constitution et sa mise en œuvre.

1.2.2. Généralités sur le béton de chanvre

Le béton de chanvre est obtenu en mélangeant de la chènevotte, un liant minéral généralement mais pas exclusivement à base de chaux et de l'eau. La proportion massique des constituants pour une utilisation en mur est généralement voisine de 1/3 de chènevotte et de 2/3 de liant.

1.2.2.1. La chènevotte

La chènevotte est le résidu fibreux obtenu à partir du défibrage de la plante de chanvre. Sa structure interne est composée de nombreux capillaires qui permettent à la sève de s'écouler tout le long de la tige. La figure 1-8 met en évidence sa structure tubulaire par une image prise au microscope électronique à balayage (MEB).

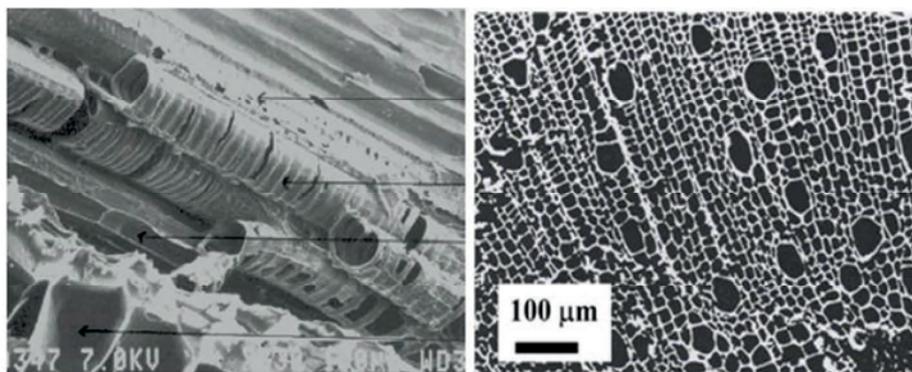


Figure 1-8 Grossissement au MEB d'une particule de chanvre⁹

Sa morphologie lui confère une forte porosité et une faible densité.

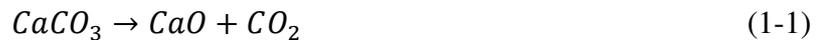
⁹ [Garcia-Jaldon 1995]

1.2.2.2. *La chaux*

La chaux est obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle fait office de liant du mélange. Le liant utilisé dans la fabrication de blocs de béton de chanvre et d'enduits étudiés dans le cadre de cette thèse est un mélange de chaux aérienne et de chaux hydraulique.

1.2.2.2.1. *La chaux aérienne*

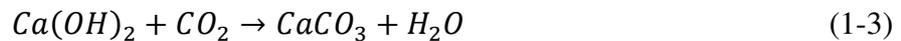
La chaux vive, de formule chimique CaO, est obtenue par calcination du calcaire (CaCO₃) à des températures d'environ 900°C. La réaction issue de cette cuisson induit une perte de masse de la matière en raison de l'émission de dioxyde de carbone CO₂ :



L'hydratation de la chaux vive forme de la chaux éteinte. Ce processus d'apport d'eau, appelé extinction, est très exothermique et produit l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ :



La prise de la chaux aérienne s'effectue par carbonatation, c'est-à-dire par absorption du dioxyde de carbone CO₂ de l'air ambiant. C'est de ce processus qu'elle tire son nom d'« aérienne ». La réaction de carbonatation s'écrit :



En milieu humide, la vapeur d'eau se lie au dioxyde de carbone de l'air pour former de l'acide carbonique. En fixant le dioxyde de carbone contenu dans cet acide, la chaux aérienne exposée à une atmosphère humide se transforme à nouveau en calcaire. Le mécanisme de prise par carbonatation s'effectue en présence d'eau, d'où une maîtrise indispensable des conditions de mise en œuvre. Ce phénomène de carbonatation peut s'étendre sur plusieurs années.

Le cycle complet de la chaux est synthétisé figure 1-9.

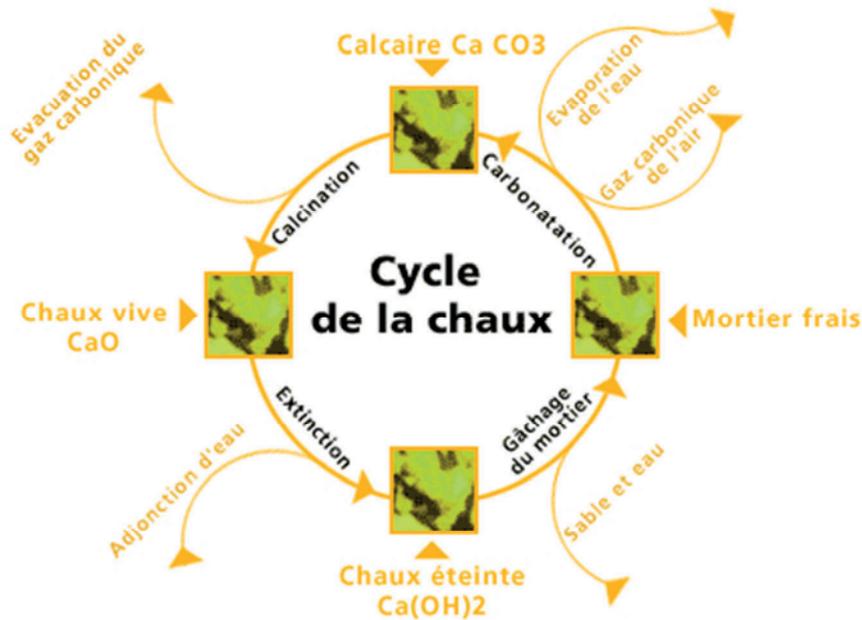


Figure 1-9 Cycle de la chaux¹⁰

1.2.2.2.2. La chaux hydraulique

La chaux hydraulique est obtenue à partir de la calcination de calcaire contenant 10 à 20 % d'argile. Elle tient son appellation au fait qu'elle fait prise au contact de l'eau. Riches en silice, fer et aluminium, le calcium, majoritaire, se combine avec ces éléments pour former des silicates, des aluminates et des ferro-aluminates de calcium. Toutefois, l'intervention des silico-aluminates ou des ferro-aluminates est le plus souvent négligeable puisque les proportions d'alumine et surtout de fer sont souvent très faibles dans les calcaires à chaux. La prise hydraulique est donc essentiellement due à la réaction entre le CaO et les silicates.

Par ailleurs, les chaux hydrauliques font une double prise : une première prise de type hydraulique au moment de la mise en œuvre puis une prise secondaire de type aérienne pendant laquelle la chaux et les hydrates de calcium vont se carbonater au contact de l'air humide pour redonner le carbonate de calcium. Cette carbonatation au contact de l'air est très lente et peut prendre plusieurs années.

L'impact environnemental de la chaux est donc favorable puisque, outre l'énergie grise associée à son élaboration, le CO_2 émis durant sa fabrication est susceptible d'être recapté en fin de vie.

1.2.3. Utilisation et mise en œuvre

Le béton de chanvre a une utilisation très variée (dalles isolantes, murs, isolation de toiture, etc.) car ce matériau présente des propriétés thermiques, acoustiques et hydriques intéressantes liées à sa formulation tout en présentant des caractéristiques mécaniques

¹⁰ Source : Ecole d'Avignon

suffisantes pour le rendre autoporteur ([Collet 2004], [Cerezo 2005]). Toutefois, dans le cadre de cette thèse, l'étude est axée sur les mélanges utilisés pour réaliser des parois (murs).

Il existe trois principales manières de réaliser une paroi à partir du matériau béton de chanvre :

- à l'aide de blocs préfabriqués que l'on dispose généralement autour d'une ossature en bois

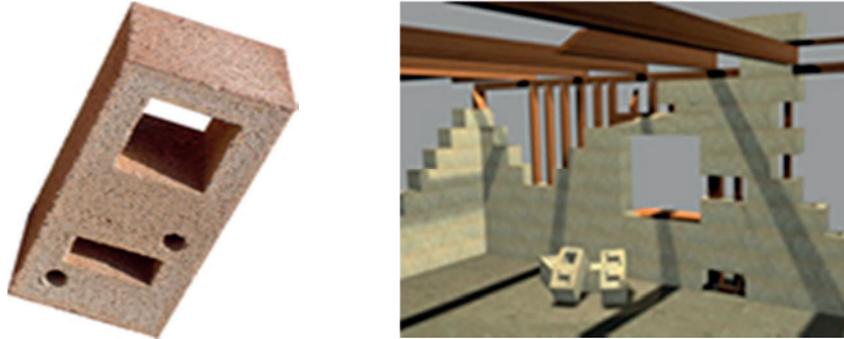


Figure 1-10 Bloc préfabriqué et vue de synthèse d'une réalisation¹¹

Lorsque les blocs de béton de chanvre sont fabriqués de façon industrielle, la pâte de chaux aérienne, la chaux hydraulique et le chanvre sont mélangés avant d'être versés dans des moules (figure 1-11). Le remplissage est fait sous vibration.



Figure 1-11 Malaxage avant compactage-vibrage

¹¹ Images issues du site www.easychanvre.fr

- par moulage en place



Figure 1-12 Mise en place d'une paroi par moulage en place¹²

- par projection



Figure 1-13 Réalisation d'une paroi par projection¹³

Avec la technique de projection (figure 1-13), le mélange de liant et de chènevottes est brassé à sec, l'apport d'eau se fait au niveau de la buse au moment de la projection.

Le béton de chanvre durci utilisé en parois présente généralement une masse volumique comprise entre 300 et 450 kg.m⁻³. Ce mélange s'avère assez isolant thermiquement pour constituer une isolation répartie (pour une épaisseur courante de 30 cm). La structure du mélange est assez poreuse ce qui contribue probablement à la sensation de confort thermo-hydrrique ressentie par les utilisateurs d'un bâtiment dont les parois sont en béton de chanvre.

Dès lors, la question se pose : comment ces matériaux à base de chanvre régulent-ils les échanges thermiques et hydriques ?

La connaissance du matériau intrinsèquement en termes de propriétés physiques, thermiques et hydriques est un préambule essentiel à l'optimisation de son utilisation.

¹² Photographie issue du site www.terrevivante.org

¹³ Photographie issue du site www.chanvre-terre-chaux.com

1.3. Etat de l'art sur l'étude de l'utilisation du chanvre dans le bâtiment

1.3.1. Caractérisation expérimentale

Les études expérimentales sur le béton de chanvre sont relativement récentes. Les premiers travaux initiés au début des années 2000 ([Arnaud 2000], [Collet 2004], [Cerezo 2005], [O'Dowd et al. 2005], [Arnaud et al. 2006], [Evrard 2008], [Chamoin 2013]) s'inscrivent dans une démarche de caractérisation du matériau d'un point de vue mécanique, thermique, hydrique et dans une moindre mesure acoustique.

Le tableau 1-1 synthétise les ordres de grandeur des propriétés usuelles du béton de chanvre issues de la littérature qui caractérisent son comportement hygro-thermo-mécano-acoustique pour ses différentes applications.

Caractéristique	Ordre de grandeur	Conséquence comportemental
Masse volumique	200 à 700 kg.m ⁻³	-
Porosité (ouverte)	0,5 à 0,85	-
Résistance mécanique	0,25 à 1 MPa	Faible
Conductivité thermique	0,1 à 0,3 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Bonne capacité d'isolation thermique
Perméabilité à la vapeur	10 ⁻¹¹ à 10 ⁻¹⁰ kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹	Autorise la circulation de l'humidité
Coefficient d'absorption acoustique	0,5 à 0,9	Bonne capacité d'isolation acoustique

Tableau 1-1 Ordres de grandeur des caractéristiques du béton de chanvre

L'ensemble de ces travaux concorde sur l'intérêt de l'utilisation de ce type de matériau dans la construction. La mise en œuvre et la formulation du béton de chanvre, c'est-à-dire sa composition en liant et chènevotte, justifient ces valeurs.

La proportion de chaux dans la composition du béton de chanvre entraîne des variations de sa structure interne (porosité, connectivité de la porosité...). En conséquence, ses performances mécaniques et hygrothermiques s'en trouvent modifiées.

Comme le montre Evrard dans ses travaux [Evrard 2008], suivant la formulation établie, il est possible d'utiliser le béton de chanvre dans différentes zones de l'habitat (cf. figure 1-14).

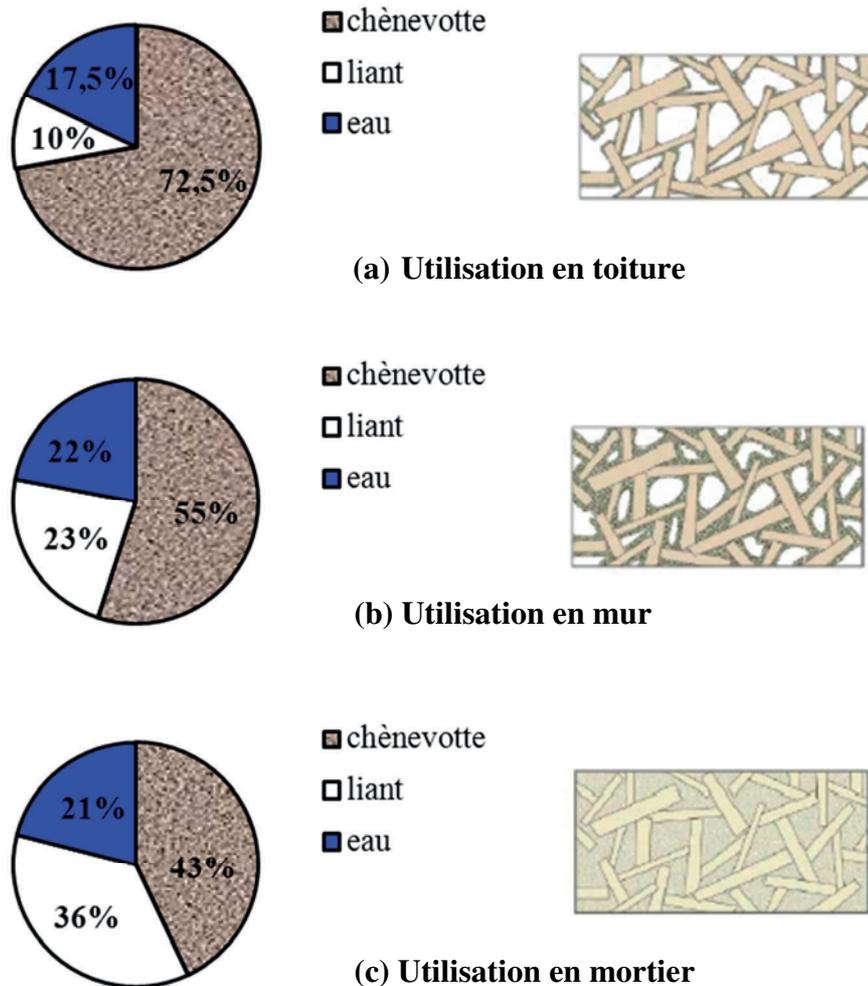


Figure 1-14 Pourcentage volumique de chaque constituant et vue schématisée de la structure pour obtenir 1 m^3 de béton de chanvre pour une utilisation en toiture (a), en mur (b) et en mortier de remplissage (c)

Dans ces formulations Evrard utilise de la chènevotte Chanvribat et du liant Tradical 70 composé de 75% de chaux aérienne, de 15% de chaux hydraulique et de 10% de pouzzolane. La proportion de liant modifie ainsi la structure du béton de chanvre.

Cibler une utilisation se justifie notamment par le fait que des propriétés thermomécaniques différentes sont obtenues avec chaque formulation. En effet, plus le dosage de liant est grand, plus grandes seront la conductivité thermique et la résistance mécanique. Lorsque la proportion en liant est faible par rapport à celle de la chènevotte, le matériau est un très bon isolant thermique bénéficiant de la contribution prédominante de la chènevotte.

Par ailleurs, [Collet 2004] et [Evrard 2008] notamment, ont montré la forte dépendance des propriétés hygrothermiques à la teneur en eau du matériau à une température de référence de 23°C . Ces études ont également mis en évidence le fort caractère hystérétique du matériau. Cet aspect complexe du comportement du béton de chanvre est inhérent à sa structure poreuse. Ce comportement se traduit par le fait que le matériau n'accumule pas l'humidité de

la même manière qu'il la libère. L'isotherme de sorption du matériau à une température donnée, caractérisée par la teneur en eau exprimée en fonction de l'humidité, présente une branche d'adsorption obtenue à humidité croissante en partant d'un état sec, et une branche de désorption non superposée, obtenue à humidité décroissante à partir d'un état saturé en eau (figure 1-15).

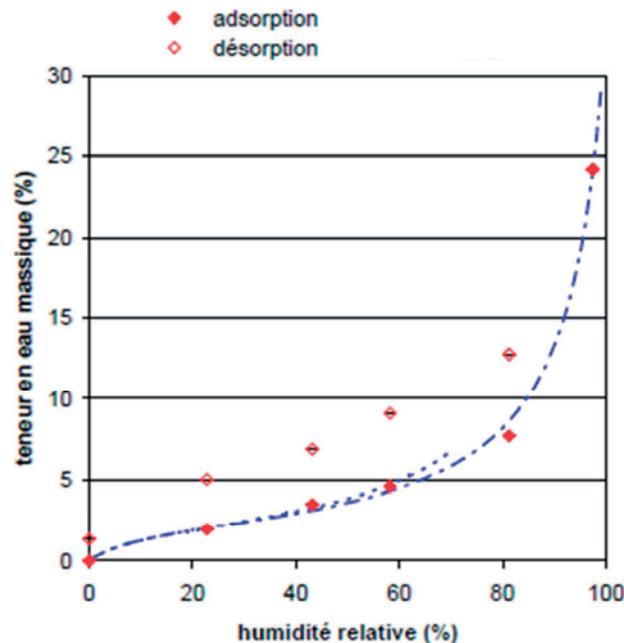


Figure 1-15 Isotherme de sorption d'un béton de chanvre de masse volumique 400 kg.m^{-3} [Collet 2004]

Le caractère hystérique du béton de chanvre est analogue à celui que l'on retrouve pour un milieu poreux à porosité répartie.

Cependant, cette caractérisation expérimentale ne fournit qu'une vision partielle de la réponse du matériau. En effet, en conditions réelles d'utilisation, le béton de chanvre est conditionné par des variations simultanées de température, d'humidité et de pression. Son comportement hygrothermique hystérique doit en conséquence induire une évolution complexe des paramètres de transfert et de stockage.

1.3.2. Performances hygrothermiques du béton de chanvre et notion de confort

Les performances techniques de matériaux à base de chanvre, qu'elles soient mécaniques, thermiques, acoustiques ou de durabilité, se doivent de répondre aux exigences des constructions actuelles. Il est à noter que la faible résistance mécanique du béton de chanvre (cf. tableau 1-1) ne permet pas de satisfaire les normes constructives relatives à un matériau porteur ($> 2 \text{ MPa}$). A ce titre, la réalisation d'une habitation avec ce matériau est donc généralement conçue autour d'une ossature en bois qui assure la stabilité de l'ensemble (cf. figure 1-16).



Figure 1-16 *Habitation en béton de chanvre à ossature en bois*

Les coefficients de conductivité thermique de matériau à base de chanvre (autour de $0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour les enduits chanvre/chaux, $0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le béton de chanvre et $0,05 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour la laine de chanvre) relativement faibles fournissent des résistances thermiques de paroi élevées qui leurs permettent de répondre aux exigences des réglementations thermiques ainsi que de s'adapter aux besoins des constructions à haute performance énergétique (BBC, Energie positive...).

D'autre part, les usagers ont constaté qu'ils atteignent un niveau de confort thermique satisfaisant à des températures ambiantes relativement faibles (17 ou 18°C , parfois moins), ce qui entraîne une diminution significative de la consommation d'énergie¹⁴.

La notion de confort ressenti est difficile à paramétrer mais des travaux récents ont montré l'influence de l'humidité relative sur le confort thermique et la qualité d'air intérieur [Woloszyn 2006]. Or, les dernières recherches sur le béton de chanvre ont permis de mettre en évidence sa très bonne capacité de régulation hygrothermique ([Evrard 2010], [Tran Le 2011], [Collet 2012]). La capacité de régulation de l'humidité des matériaux poreux comme le béton de chanvre serait donc un moyen efficace pour améliorer le confort puisqu'ils participent à la stabilisation du niveau d'humidité intérieur ambiant sans consommation d'énergie. Paramétrer cette capacité hydrique en fonction de l'état hydrique et de la température constitue un objectif scientifique majeur. Sur le plan expérimental, mesurer la capacité hydrique tampon du matériau (Moisture Buffering Value MBV en anglais) est une première étape. Ce paramètre est susceptible de retraduire la quantité d'eau adsorbée ou désorbée lorsque le matériau est soumis à une variation cyclique d'humidité relative. Sur le plan numérique, retraduire cet effet n'est pas accessible à ce jour.

¹⁴ Source Construire en Chanvre

Pourtant, connaître et maîtriser l'évolution de la température, de l'humidité relative et de la quantité d'eau au sein du mur sont des moyens fondamentaux qui permettent de répondre à de nombreuses problématiques du génie civil :

- leurs évolutions conditionnent l'ambiance hygrothermique intérieure d'une habitation
- elles permettent d'évaluer les performances hygrothermiques d'une habitation et attestent des performances énergétiques et de l'intérêt environnemental de la solution constructive choisie
- elles définissent et influent sur le confort de vie et la qualité d'air intérieur
- elles permettent par ailleurs d'évaluer le risque de dégâts fonctionnels et sanitaires liés à l'humidité (détérioration des propriétés mécaniques, moisissures...)

1.3.3. Etude numérique du comportement hygrothermique du béton de chanvre sous conditions climatiques réalistes

Dans le but de caractériser la performance hygrothermique du béton de chanvre et de la comparer à celle d'autres matériaux, des études de réponse hygrothermique d'une paroi à des sollicitations climatiques variables ont été réalisées ([Samri, 2008], [Evrard 2008]). Ces auteurs ont tout d'abord modélisé le comportement hygrothermique de différents matériaux, dont le béton de chanvre, à partir des résultats de campagnes expérimentales. Ces données leur ont permis d'alimenter un modèle couplé de transfert de masse et de chaleur. D'un point de vue numérique, Samri a utilisé le logiciel Comsol Multiphysics 3.2 et Evrard le logiciel Wufi 4.1 Pro. Parallèlement à son approche numérique, Samri a également réalisé un suivi expérimental à l'échelle de la paroi pour confronter les résultats issus de son modèle numérique aux résultats expérimentaux qu'il a recueilli (cf. figure 1-17).

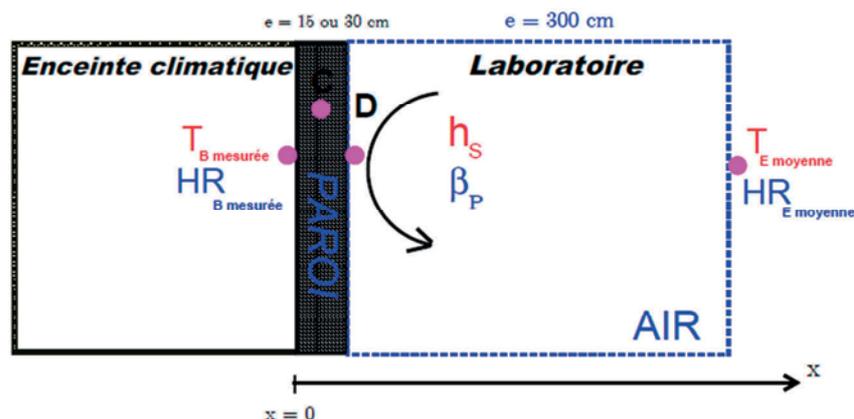


Figure 1-17 Configuration d'étude de paroi [Samri 2008]

Les sollicitations climatiques imposées à l'enceinte par Samri sont indiquées figure 1-18 (humidité relative et température en A) tandis que les conditions de laboratoire sont contrôlées. La concordance entre les résultats expérimentaux et numériques obtenus par Samri sur une paroi en béton de chanvre provient du calage des paramètres thermohydriques (cf. figure 1-18). Cette approche a néanmoins permis de mettre en évidence l'ordre de

grandeur élevée des paramètres de transport hydrique et de montrer l'influence des transferts de masse sur les transferts de chaleur.

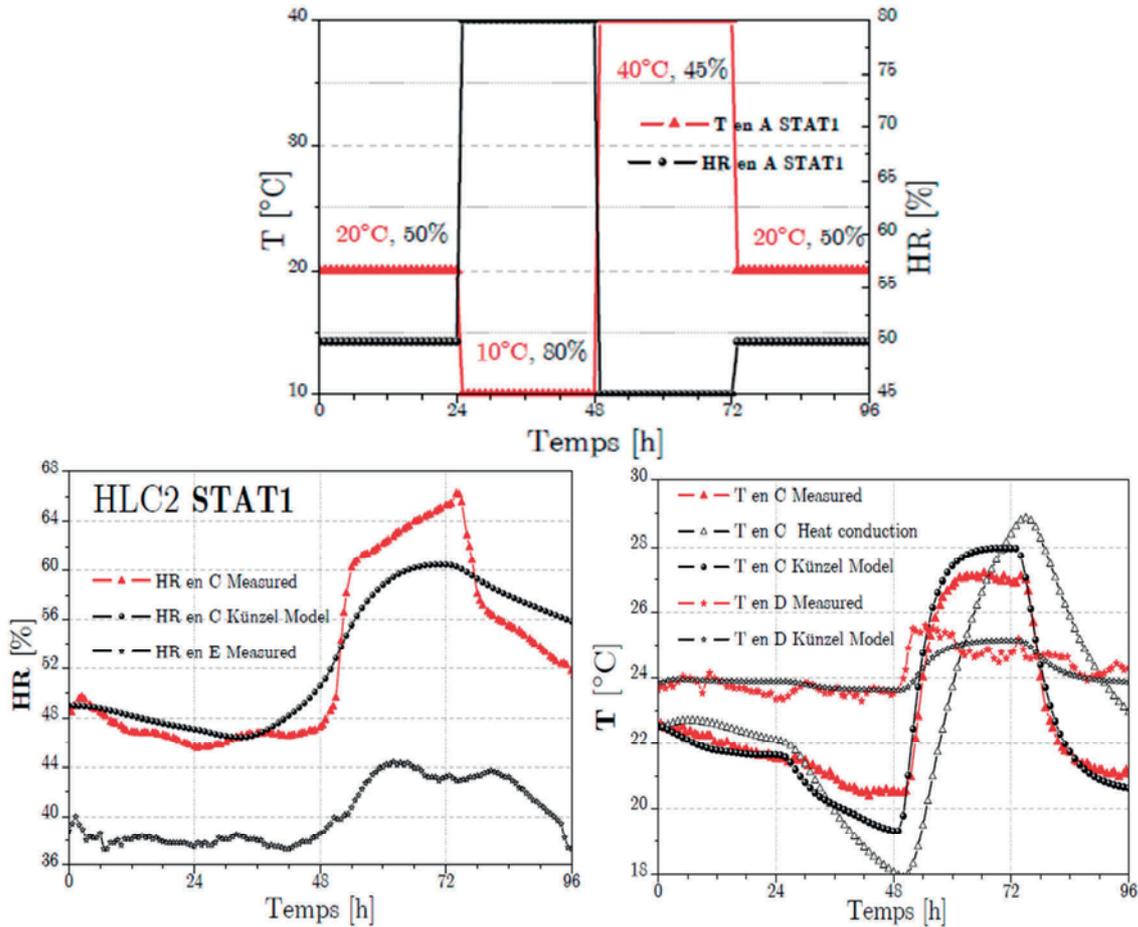


Figure 1-18 Evolutions expérimentales et théoriques de l'humidité relative et de la température [Samri 2008]

Il souligne l'insuffisance de son approche notamment en régime dynamique par l'utilisation de propriétés hygrothermiques constantes indépendantes de la teneur en eau et par la non prise en compte du phénomène d'hystérésis.

Evrard, pour sa part, s'est orienté sur une approche exclusivement numérique dans l'étude de la réponse hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre sous sollicitations climatiques. Il s'est ainsi intéressé aux réponses numériques en température et humidité relative de parois en béton de chanvre à d'autres matériaux (béton cellulaire, brique en terre cuite, laine minérale...). Ces parois sont étudiées en configuration réelle d'utilisation, c'est-à-dire avec une couche d'enduit apposée sur les surfaces externes de la partie courante (cf. figure 1-19).

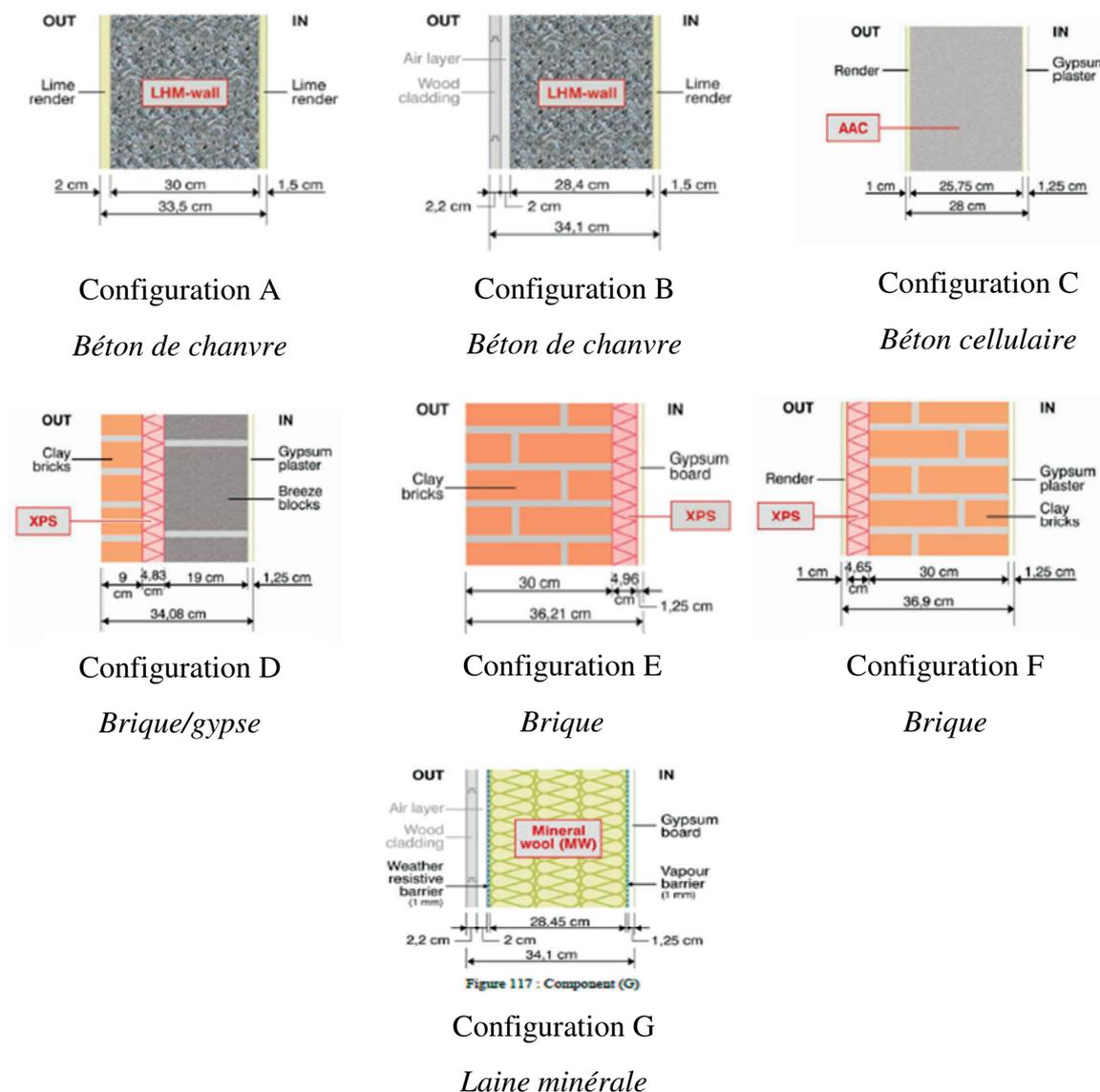


Figure 1-19 Configurations d'étude des parois [Evrard 2008]

En termes de sollicitations climatiques, Evrard a tout d'abord analysé séparément l'effet de gradients de température et d'humidité relative sur le comportement des matériaux étudiés tout d'abord à l'échelle de la journée puis conjointement à l'échelle de l'année. A ce titre, Evrard a privilégié une approche d'analyse de performance au détriment d'une étude du comportement hygrothermique réel du béton de chanvre. Il s'intéresse ainsi plus particulièrement aux indicateurs de confort que sont les températures et humidités de paroi intérieure et les flux de chaleur et de masse entrants vers l'ambiance intérieure.

Bien qu'il ne se distingue pas des autres matériaux par sa capacité d'isolation, Evrard montre que le béton de chanvre grâce à ses performances de régulation hygrothermique se singularise par la qualité de confort qu'il permet (cf. figure 1-20).

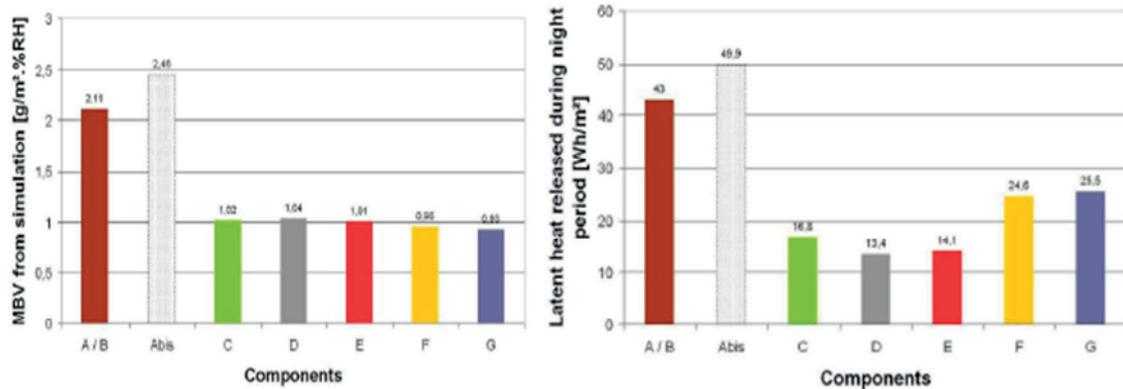


Figure 1-20 Capacité de régulation hydrique (MBV) à gauche et chaleur latente libérée durant un cycle nocturne à droite pour les différentes configurations étudiées [Evrard 2008]

La capacité de régulation hydrique simulée présentée par Evrard est obtenue à partir de résultats numériques qui ne concordent pas exactement avec les résultats expérimentaux en termes d'évolution de masse d'eau (cf. figure 1-21).

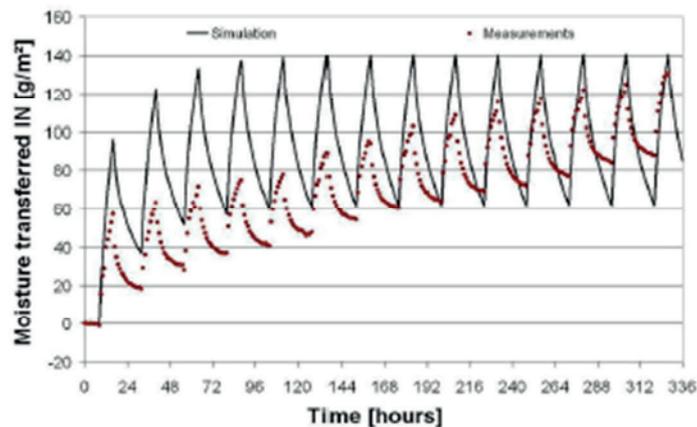


Figure 1-21 Capacité hydrique tampon du béton de chanvre : résultats numériques et expérimentaux

Les divergences observées n'invalident pas les conclusions d'Evrard mais démontrent une mauvaise appréhension de l'évolution de la teneur en eau du béton de chanvre et donc de son comportement hygrothermique et de sa réponse à des sollicitations climatiques à l'échelle de la paroi.

D'autres études numériques portant sur le béton de chanvre ont également été réalisées en adoptant un axe de recherche différent. Ainsi, [Tran Le 2011] a porté son étude à une autre échelle en s'intéressant au comportement d'un local réalisé en béton de chanvre soumis à des conditions climatiques variées. Il a notamment considéré dans son étude l'impact de systèmes complémentaires (chauffage, ventilation). Tran Le, avant de présenter son étude à l'échelle du local, a validé son modèle à l'échelle de la paroi à partir des résultats de Samri et en présente ainsi ses défauts. [Zaknune 2012] s'est orientée sur l'étude du séchage du béton de chanvre. Sa démarche de détermination des paramètres hygrothermiques du béton de chanvre par méthode inverse se heurte toutefois à l'absence de confrontation expérimentale.

Bien que conscient de son impact, aucun des travaux réalisés jusqu'à ce jour ne prend en compte le phénomène d'hystérésis qui conditionne pourtant le comportement hydrique du béton de chanvre. L'évaluation de la quantité d'eau stockée dans le matériau est en effet une problématique clé dans la compréhension du comportement thermohydrique du béton de chanvre. Ne serait-ce que par son impact sur les propriétés du matériau, elle conditionne les transferts de masse et de chaleur au sein de la paroi.

En outre, l'influence de la température sur les propriétés du béton de chanvre n'est que très superficiellement abordée et aucune démarche expérimentale n'a été menée en ce sens.

Par ailleurs, les modèles numériques proposés souffrent d'un manque de confrontation expérimentale et/ou de trop grandes simplifications des mécanismes de transport et de stockage.

Les limites de ces études numériques justifient la nécessité de mieux comprendre le comportement hygrothermique réel du béton de chanvre en prenant en compte le caractère hystérétique et les effets de température. La démarche théorique et numérique adoptée nécessite d'être accompagnée d'une confrontation expérimentale à la fois à l'échelle du matériau et à l'échelle de la paroi pour attester de la pertinence et de la cohérence de l'approche.

1.4. Objectifs et axes de recherche

1.4.1. Cadre de l'étude

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de deux projets de recherche du laboratoire :

- projet ANR (Agence Nationale pour la Recherche) *betonchanvre*
- projet PRIR (Projet de Recherche d'Initiative Régionale) *Ecomatx* soutenu par la Région Bretagne

Les objectifs du projet ANR *betonchanvre* sont de caractériser différents bétons de chanvre dont les formulations ont été orientées de façon à garantir une optimisation des conditions de séchage, de durcissement ou de transferts thermo-hydriques.

Le projet PRIR *Ecomatx* a pour ambition de répondre à trois objectifs majeurs :

- améliorer les procédés de fabrication du béton de chanvre par l'étude des cycles de séchage, de la chimie du matériau, de sa caractérisation physique et mécanique et de son évolution dans le temps (étape n°1)
- déterminer les propriétés thermiques et hydriques pour différents taux d'humidité des matériaux béton de chanvre de référence (étape n°2)
- étudier à l'échelle de la paroi les phénomènes de transferts thermique et hydrique par l'expérimentation en ambiance contrôlée (cellule d'essai climatique) et le développement de modèles numériques de simulation des phénomènes de transfert et de transport dans la paroi et des interactions ambiance/paroi (étape n°3)

Les objectifs du projet ANR viennent ainsi conforter ceux du projet PRIR. Dans le cadre du projet ANR *betonchanvre*, de nombreuses formulations issues des productions de partenaires industriels ont été étudiées. La Société SI2C® (Société Innovante de Construction en Chanvre), implantée en Ille et Vilaine à La Mézière, met en œuvre le béton de chanvre directement sur les chantiers grâce à une machine à projeter. La société Easychanvre®, créée en 2005, est présente sur le territoire breton et spécialisée dans la conception de blocs en béton de chanvre.

Dans le cadre du projet PRIR *Ecomatx*, les essais sont menés sur des parois constitués de ces deux types de béton de chanvre :

- une paroi mise en œuvre par projection selon le mode opératoire de la société SI2C et testée par le LIMATB de Lorient
- une paroi mise en œuvre par maçonnerie de blocs de béton de chanvre selon le mode opératoire de la société Easychanvre et testée par l'équipe Matériau-Thermo-Rhéologie du LGCGM de Rennes

La démarche adoptée dans ce travail de thèse converge vers un objectif final de **développement d'un outil numérique capable de simuler le comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre soumise à des conditions climatiques réalistes.**

La modélisation numérique qui repose sur la compréhension du comportement physique du matériau permet d'évaluer sa réponse thermohydrrique à l'échelle de la paroi pour, in fine, pouvoir l'anticiper. Elle ne peut néanmoins s'affranchir de l'aspect expérimental. Ces deux approches numériques et expérimentales sont indissociables et garantes de la fiabilité de cette étude.

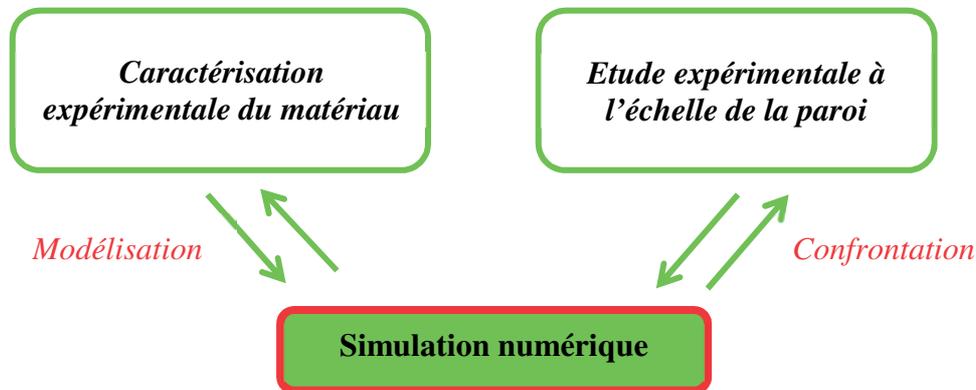


Figure 1-22 : Principe d'étude

1.4.2. Support et cadre expérimental

Le travail de cette thèse est orienté sur l'étude de la paroi en béton de chanvre fabriqué par la société Easychanvre.

La paroi en béton de chanvre réalisée par la société Easychanvre est construite dans une chambre biclimatique capable d'imposer indépendamment à la paroi des conditions typiques de climat intérieur et extérieur (cf. figure 1-23).



Figure 1-23 Chambre biclimatique (photographie de celle du LIMATB)

Cette paroi en béton de chanvre est instrumentée en thermocouples et capteurs d'humidité permettant de suivre expérimentalement les évolutions et les distributions de température et d'humidité relative au sein du mur. Les simulations numériques peuvent ainsi s'appuyer sur

de nombreuses séquences d'acquisition réalisées au sein de la paroi placée dans l'enceinte biclimatique dont la régulation suit un scénario varié.

A l'échelle du matériau, la caractérisation expérimentale des propriétés du béton de chanvre Easychanvre est effectuée dans le cadre des travaux de thèse de [Chamoin 2013].

Afin de caractériser les propriétés hygrothermiques de ce béton de chanvre, l'entreprise a fourni au laboratoire une série d'échantillons réalisée par moulage dans des alvéoles de dimension 30x30x16 cm³ (cf. photo 1-24).



Figure 1-24 Photographie des alvéoles fournies

La formulation utilisée pour réaliser cet échantillonnage est précisée dans le tableau 1-2 :

Chènevotte	374 kg	
Liant	Chaux vive (sans son eau d'hydratation)	415 kg
	Chaux hydraulique	158 kg
	Eau d'hydratation	207 kg

Tableau 1-2 Formulation utilisée pour les blocs de bétons de chanvre

La quantité d'eau d'hydratation indiquée correspond à l'eau d'hydratation de la chaux vive.

Il est à noter que le rapport massique chènevotte/béton est de 1/3 et de 2/3 pour le rapport massique liant/béton.

Le calcul de la masse volumique réelle (ou absolue) ρ_r [kg.m⁻³] fournit une valeur d'environ 2100 kg.m⁻³ obtenue à partir de la relation (1-4).

$$\rho_r = \frac{M_s}{V_s} \quad (1-4)$$

M_s [kg] et V_s [m³] désignent respectivement la masse totale et le volume total de solide.

L'obtention de cette valeur s'appuie notamment sur la connaissance des masses volumiques réelles des différents constituants :

- $\rho_{r, \text{chènevotte}} = 1670 \text{ kg.m}^{-3}$
- $\rho_{r, \text{chaux}} = 2400 \text{ kg.m}^{-3}$

Ce béton de chanvre sert de référence à l'étude à l'étude des propriétés hygrothermiques. Il est noté par la suite Easy R. A partir de cet échantillonnage, [Chamoin 2013] a notamment déterminé :

- les caractéristiques physiques (porosité, masse volumique)
- les caractéristiques hydriques (isotherme de sorption et perméabilité à la vapeur à 23°C)

La masse volumique apparente à l'état sec de ces échantillons Easy R a été évaluée à 450 kg.m^{-3} .

Le béton de chanvre constitutif des blocs utilisés pour réaliser la paroi provient d'une formulation identique à celui du béton de chanvre Easy R. Cependant, à l'état sec, sa masse volumique apparente se situe autour de 320 kg.m^{-3} . La différence de masse volumique entre ces deux bétons de chanvre ne provient pas de la formulation qui est identique mais résulte en réalité du procédé de fabrication des blocs de béton de chanvre. En effet, le béton de chanvre Easy R a été vibro-compacté alors que le béton de chanvre de la paroi est mis en œuvre selon le procédé de bloc évidé de la société Easychanvre. Ce dernier est noté par la suite Easy P.

Cette différence de masse volumique engendre des différences de structure porale ce qui implique que les propriétés du béton de chanvre Easy R ne sont pas représentatives du béton des blocs de la paroi.

La réalisation des essais de caractérisation du béton de chanvre Easy P a été amorcée par [Chamoin 2008]. La production d'échantillons représentatifs est très difficile à cause de la fragilité et de la friabilité du matériau et l'identification des propriétés hygrothermiques du béton de chanvre Easy P n'a pas été poursuivie.

Il apparaît ainsi nécessaire de trouver le moyen d'estimer les propriétés du béton de chanvre Easy P en s'affranchissant de sa caractérisation expérimentale avant d'envisager de simuler le comportement du matériau constitutif de la paroi.

1.5. Méthodologie de travail

La construction de ce travail de thèse s'articule autour de six chapitres qui ont pour but de répondre à la problématique d'étude du comportement hygrothermique du béton de chanvre. Déjà entrevue en introduction, la méthodologie de travail est ici précisée, justifiée par le contexte d'étude développé dans ce chapitre.

Chapitre 2 :

L'objectif initial est de proposer une modélisation qui traduit les phénomènes de transport et de stockage d'humidité, d'air et de chaleur au sein de milieux poreux. Le modèle développé se veut volontairement général et capable de prendre en compte les différents phénomènes de transfert auxquels peut être soumise une paroi en conditions réelles.

Chapitre 3 :

Au terme du travail de collecte des données expérimentales sur le béton de chanvre Easy R, une modélisation mathématique de ses propriétés hygrothermiques est proposée. Elle a pour but de servir de référence à l'évaluation des propriétés du béton de chanvre Easy P constitutif de la paroi. Cette évaluation repose sur une argumentation physique s'appuyant sur les travaux de la littérature et sur des données expérimentales complémentaires. Ainsi, afin d'étudier notamment l'impact de la masse volumique sur la teneur en eau du matériau, un béton de chanvre issu de la même série de blocs que le béton de chanvre Easy R mais de masse volumique apparente à l'état sec plus faible (396 kg.m^{-3}) est étudié. La modélisation proposée s'appuie sur l'exploitation des branches d'adsorption des isothermes de sorption. Ce matériau est nommé Easy R-bis. La différence de masse volumique entre les blocs de béton de chanvre Easychanvre est liée à l'irrégularité du processus de fabrication artisanale.

Chapitre 4 :

La modélisation des propriétés hygrothermiques du béton de chanvre Easy P permet d'alimenter le modèle de transferts présenté au chapitre 2 et ainsi d'envisager une confrontation des résultats numériques avec les résultats expérimentaux recueillis sur la paroi pour un scénario climatique choisi. Le comportement hygrothermique expérimental de la paroi sous sollicitations climatiques réalistes est dans un premier temps analysé. Dans un second temps, une analyse de la sensibilité du comportement hygrothermique du béton de chanvre est réalisée en conditions isothermes en orientant l'étude sur les effets d'une modification de la masse volumique.

Chapitre 5 :

Ce chapitre a tout d'abord pour objectif de caractériser expérimentalement le comportement hystérique du béton de chanvre en identifiant des branches de sorption intermédiaires isothermes générées lors de cycles d'adsorption/désorption. Dans le but de simuler numériquement de tels phénomènes, différents modèles d'hystérésis sont comparés et intégrés au modèle complet de transferts hygrothermiques afin d'évaluer l'impact de ce phénomène sur la réponse simulée de la paroi en béton de chanvre.

Chapitre 6 :

L'étude du comportement hygrothermique du béton de chanvre en conditions non isothermes est abordée dans ce chapitre. Dans un premier temps, des données expérimentales complémentaires permettent d'évaluer l'effet de la température sur l'évolution de la teneur en eau du béton de chanvre. La prise en compte de l'influence de la température sur le comportement du béton de chanvre s'appuie sur l'évolution des équilibres thermodynamiques des mécanismes de sorption. Un modèle hygrothermique hystérétique thermo dépendant est ainsi proposé.

Chapitre 7 :

Ce chapitre présente une application directe de la modélisation complète du comportement hygrothermique du béton de chanvre (hystérésis, effet température) en conditions d'utilisation réelles. Le travail est ainsi étendu à l'étude numérique d'une paroi multicouche formée par un béton de chanvre enduit sur ses deux faces. L'analyse à l'échelle annuelle des performances hygrothermiques d'une paroi en béton de chanvre est ainsi évaluée comparativement à d'autres solutions constructives. Le tout permet de discuter de la notion de confort hygrothermique.

2

Modélisation des transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux

Quels phénomènes régissent les échanges de chaleur et d'humidité au sein de matériaux poreux comme le béton de chanvre ? Comment les représenter ? Ce chapitre a pour objectif de répondre à ces questions en proposant un modèle numérique de transferts couplés d'air, de masse et de chaleur (appelé dans la suite modèle HAM pour Heat, Air and Moisture). Ce chapitre s'appuie sur une étude bibliographique complète et constitue un travail de synthèse étendu.

SOMMAIRE

2.1. Introduction	50
2.2. Cadre de la modélisation	51
2.2.1. Description des milieux poreux	51
2.2.2. Un modèle de conservation	52
2.3. Transfert de masse	55
2.3.1. Stockage d'humidité	55
2.3.2. Lois de transfert	59
2.3.2.1. Phénomène de diffusion	60
2.3.2.1.1. Diffusion de la vapeur d'eau	61
2.3.2.1.2. Diffusion de l'eau liquide	63
2.3.2.1.3. Diffusion d'air	66
2.3.2.2. Phénomène d'advection	66
2.3.2.2.1. Advection de la vapeur d'eau	67
2.3.2.2.2. Advection d'air	68
2.3.3. Bilan de conservation	68
2.3.3.1. Equation de conservation de la masse d'air	68
2.3.3.2. Equation de conservation de la masse d'eau	69
2.4. Transfert de chaleur	70
2.4.1. Stockage de chaleur	70
2.4.2. Lois de transfert	71
2.4.2.1. Phénomène de conduction	72
2.4.2.2. Phénomène d'advection	73
2.4.2.3. Transfert thermique par chaleur sensible	73
2.4.2.4. Phénomène de changement de phase	74
2.4.3. Bilan de conservation	74
2.5. Bilan des transferts	75
2.6. Transferts en multicouche	76
2.7. Conditions aux limites	78
2.7.1. Le rayonnement	78
2.7.2. La convection thermique surfacique	80
2.7.2.1. Convection naturelle	81
2.7.2.2. Convection forcée	84
2.7.2.3. Convection mixte	85
2.7.3. La convection massique surfacique	86
2.7.4. L'advection de vapeur par circulation d'air humide	87
2.7.5. Le changement de phase de surface	87

2.7.6. La diffusion d'eau liquide	88
2.7.7. Bilan des échanges ambiance/milieu.....	88
2.8. Traitement numérique	90
2.8.1. Implémentation numérique.....	90
2.8.2. Résolution numérique	90
2.8.2.1. Comsol Multiphysics.....	90
2.8.2.2. Matlab.....	91
2.8.2.3. Comparaison et synthèse	94
2.9. Validation numérique	95
2.9.1. Propriétés des matériaux	96
2.9.2. Cas test n°1	97
2.9.3. Cas test n°2.....	100
2.9.4. Cas test n°3.....	101
2.9.5. Cas test n°4.....	102
2.9.6. Cas test n°5.....	105
2.10. Conclusion.....	107

2.1. Introduction

Les matériaux poreux exploités dans le domaine de la construction offrent un compromis intéressant en matière de réduction de consommation énergétique et de confort intérieur d'une habitation en raison de leur capacité de régulation des transferts hygrothermiques. Il apparaît ainsi un couplage fort entre les transferts de masse et de chaleur dans ces milieux poreux perméables et la connaissance de ces phénomènes est indispensable pour modéliser les mécanismes de régulation qu'offrent ces types de matériaux.

Dans ce chapitre, il convient tout d'abord d'identifier la manière dont un milieu poreux stocke l'humidité. La connaissance de ce mécanisme permet ainsi de nous intéresser aux transferts thermohydriques qui sont gouvernés par des phénomènes à la fois complexes et simultanés. Diffusion et convection d'eau sous forme vapeur et liquide, circulation d'air, conduction et convection thermique entre autres sont ainsi abordées. Par ailleurs, l'environnement ambiant du milieu poreux conditionne ces phénomènes. La deuxième partie de ce chapitre est donc consacrée à l'étude des conditions aux limites du système. La complexité de la modélisation de l'ensemble de ces phénomènes rend impossible toute approche analytique et nécessite l'utilisation de modèles numériques et le recours à l'outil informatique. Le traitement numérique du problème complet est le troisième axe de cette partie. Enfin, la validité du modèle numérique développé est testée par confrontation à d'autres modèles numériques référents dans des configurations diverses usuellement rencontrées dans le cadre de la physique du bâtiment.

2.2. Cadre de la modélisation

2.2.1. Description des milieux poreux

Un milieu poreux est un domaine matériel lacunaire qui possède des interstices susceptibles d'accueillir des fluides liquides ou gazeux. La physique des milieux poreux est étudiée depuis très longtemps aussi bien dans le domaine du génie civil que de l'étude hydrogéologique des roches. L'approche adoptée se contente d'étudier les milieux poreux pour une utilisation dans le cadre de la construction. Les hypothèses émises par la suite ne sont ainsi valables que dans ce cadre.

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

- une matrice solide (figure 2-1) cellulaire, alvéolaire ou fibreuse qui constitue le squelette matériel du milieu.

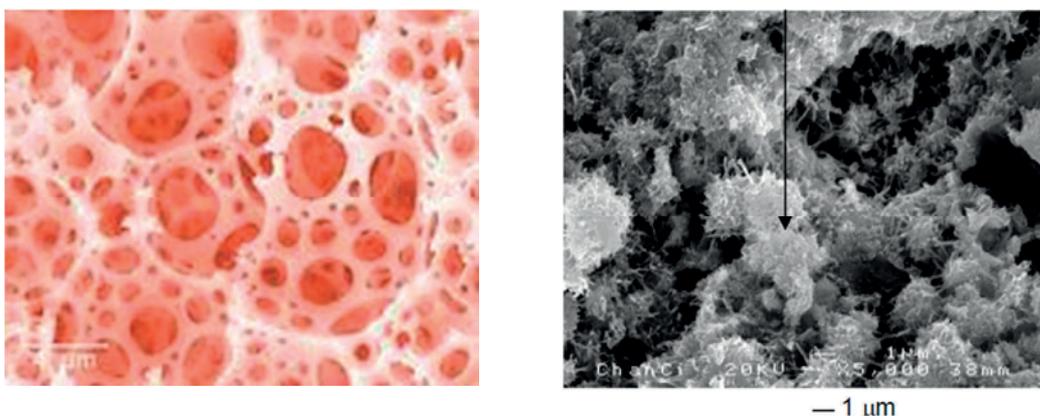


Figure 2-1 Image MEB d'un monolithe poreux¹⁵ (à gauche) et de la matrice minérale du béton de chanvre¹⁶ (à droite)

- une phase liquide constituée d'eau pure.
- une phase gazeuse constituée d'un mélange d'air et de vapeur d'eau. Air et vapeur d'eau sont considérés comme des gaz parfaits.

La structure du milieu poreux est caractérisée par :

- sa masse volumique et sa porosité totale
- la nature de sa matrice solide : la distribution du diamètre des grains, sa composition minéralogique et chimique et la masse volumique des grains
- la nature et la structure de son réseau poral : la distribution du diamètre des pores, la surface spécifique, la géométrie du réseau

Dans le cadre de cette étude, la matrice solide est supposée homogène, isotrope, indéformable et inerte chimiquement.

¹⁵ Source CNRS Photothèque / ISM / DELEUZE Hervé, BIROT Marc

¹⁶ Extrait de [Collet 2004]

L'interconnectivité et l'accessibilité des pores participent au transport de matière à travers le matériau qui conditionne son comportement hygrothermique. Ce transport de matière est soumis aux conditions de température, d'hygrométrie et de pression dans lesquelles le milieu est placé. Dans ce cadre, la conception d'un modèle permet de prévoir des résultats à partir de l'application d'une ou plusieurs théories à un niveau d'approximation donné.

2.2.2. *Un modèle de conservation*

Les dernières décennies ont connues l'émergence de nombreux modèles HAM (Heat, Air and Moisture). L'essor continu de l'outil informatique a permis le développement de modèles de plus en plus complexes, fiables et rapides. De nombreux supports différents sont ainsi utilisés (Wufi, Comsol Multiphysics, TRNSYS, Fortran, Energy Plus, Matlab/Simulink...).

Les différences entre ces modèles proviennent essentiellement des potentiels de calcul choisis et du niveau d'approximation retenu. Ces modèles sont utilisés pour évaluer le comportement thermohydrrique de nombreux matériaux poreux du génie civil. A titre informatif on peut citer les travaux récents de [Janssen 2002], [Tariku 2010] ou [Van Schjindel 2007] qui illustrent les manières différentes avec lesquelles peut être décrit le modèle.

Cependant, l'ensemble de ces modèles reposent sur la même physique de conservation que l'on peut synthétiser par l'équation de continuité écrite localement sous forme différentielle (2-1) :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\nabla(j) + S \quad (2-1)$$

Dans cette équation, X, j et S sont des vecteurs. X est homogène à une densité volumique, j désigne un flux exprimé par unité de surface et de temps et S représente un terme source. $\frac{\partial X}{\partial t}$ représente le terme d'instationnarité et $\nabla(j)$ le terme de transport.

Dans le cadre d'une modélisation en milieu poreux en usage courant, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices peuvent être formulées :

- matériau isotrope – pour un matériau dont le volume est supérieur ou égal au volume élémentaire représentatif (VER)
- équilibre thermodynamique local atteint
- la phase gazeuse constituée de vapeur d'eau et d'air sec est un fluide parfait incompressible
- transferts radiatifs à l'intérieur du matériau négligés
- absence de réaction chimique à l'intérieur des matériaux (osmose)
- absence de gel (dans le domaine de température utilisé $>0^{\circ}\text{C}$)
- effet de la gravité sur les transferts de masse négligé

Justifiés par [Künzel 1995], les transferts de chaleur et de masse sont essentiellement basés sur la dynamique des fluides et les phénomènes d'advection, diffusion et conduction.

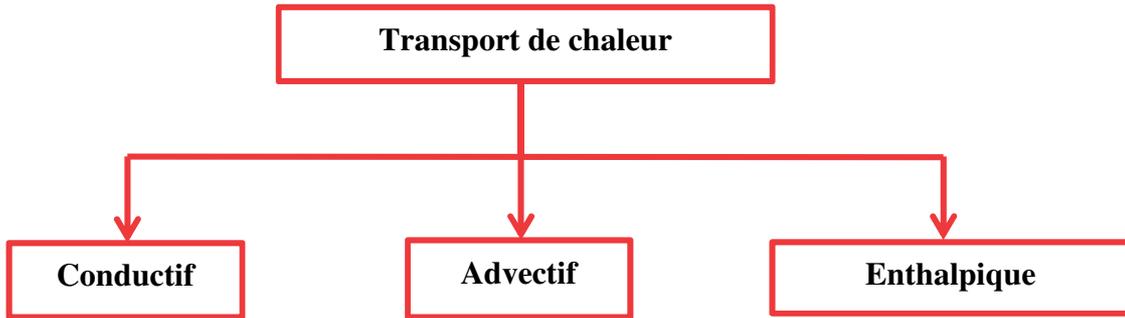


Figure 2-2 Phénomènes de transport de chaleur

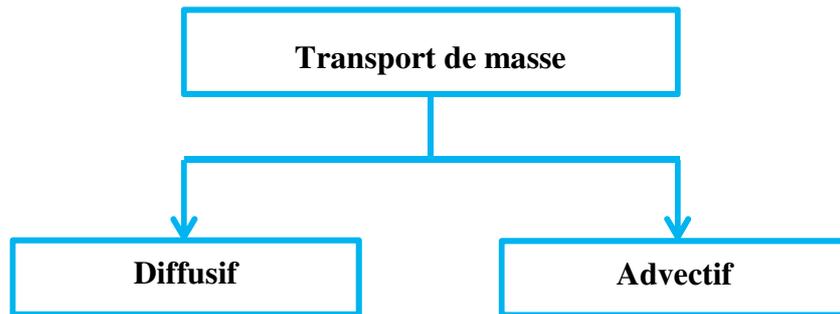


Figure 2-3 Phénomènes de transport de masse d'eau

Il est à noter que le transport advectif est souvent appelé convectif par abus de langage. Il résulte du déplacement de matière généré par la circulation d'air. La convection au sens physique du terme est définie comme la somme des flux diffusif et advectif.

Sous ces hypothèses, l'équation de conservation de masse d'eau s'écrit :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(g_{t,diff} + g_{t,adv}) + S \quad (2-2)$$

w [kg.m^{-3}] représente la quantité d'eau à la fois sous forme liquide et vapeur contenue dans le milieu. Sa définition et sa caractérisation font l'objet du paragraphe suivant. $g_{t,diff}$ et $g_{t,conv}$ [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$] désignent respectivement les termes de densité de flux totaux advectif et diffusif.

L'équation de de conservation de masse d'air s'écrit :

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = -\nabla(g_{a,diff} + g_{a,adv}) + S \quad (2-3)$$

ρ_a [kg.m^{-3}] désigne la densité volumique du mélange gazeux d'air.

Enfin, l'équation de conservation de la chaleur est basée sur la conservation de l'enthalpie du système :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla(q_{cond} + q_{adv} + q_{sen} + q_{lat} + q_s) + S \quad (2-4)$$

H [$J.m^{-3}$] représente l'enthalpie totale et q_{cond} , q_{adv} , q_{lat} et q_{sen} [$W.m^{-2}$] les termes de densité de flux respectivement conductif, advectif et enthalpique de chaleur latente et sensible. q_s [$W.m^{-2}$] désigne l'enthalpie de sorption. Il est à noter que la conduction est un mode de transport diffusif. Le terme de conduction est d'ailleurs parfois remplacé par le terme de diffusion thermique.

L'expression de l'ensemble de ces termes fait l'objet de ce chapitre.

Les potentiels gouvernant les transferts de chaleur et de masse choisis sont la température T , l'humidité relative ϕ et la pression totale p_t . L'intérêt du choix de ces variables réside dans leur continuité au niveau des interfaces et des surfaces externes ce qui n'est pas le cas de la teneur en eau w par exemple (figure 2-4).

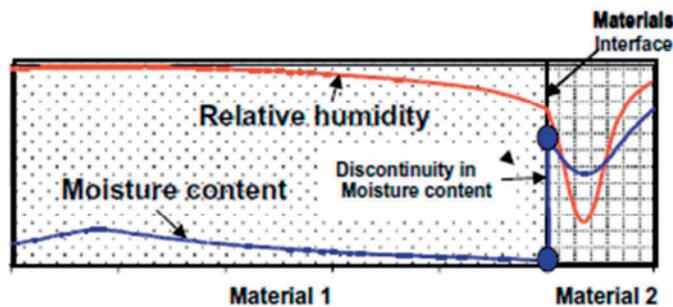


Figure 2-4 Distribution spatiale d'humidité relative et de teneur en eau à l'interface entre deux matériaux différents¹⁷

¹⁷ [Tariku 2010]

2.3. Transfert de masse

2.3.1. Stockage d'humidité

L'humidité relative s'exprime comme le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau p_v [Pa] sur la pression partielle de vapeur saturante p_{sat} [Pa]. Elle caractérise le degré d'humidité d'une ambiance.

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{sat}} \quad (2-5)$$

La pression de vapeur saturante est établie de manière empirique en fonction de la température T exprimée en Kelvin :

$$p_{sat} = e^{23,5771 - \frac{4042,9}{T-37,58}} \quad (2-6)$$

Elle traduit, à une température donnée, l'équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'air. Le domaine de validité de la relation (2-6) se situe entre 0°C et 80°C.

Les matériaux poreux avec une structure poreuse ouverte ont la capacité de fixer l'humidité contenue dans l'air ambiant. Ainsi lorsque l'humidité de l'air augmente la masse apparente du matériau augmente. Physiquement, cette augmentation de la masse est due à la fixation des particules d'eau sur la surface des pores du matériau. A l'inverse, lorsque l'humidité de l'air diminue, la masse apparente du matériau diminue. Ces phénomènes sont respectivement appelés adsorption et désorption. Le processus d'adsorption peut être décomposé en plusieurs phases (figure 2-5).

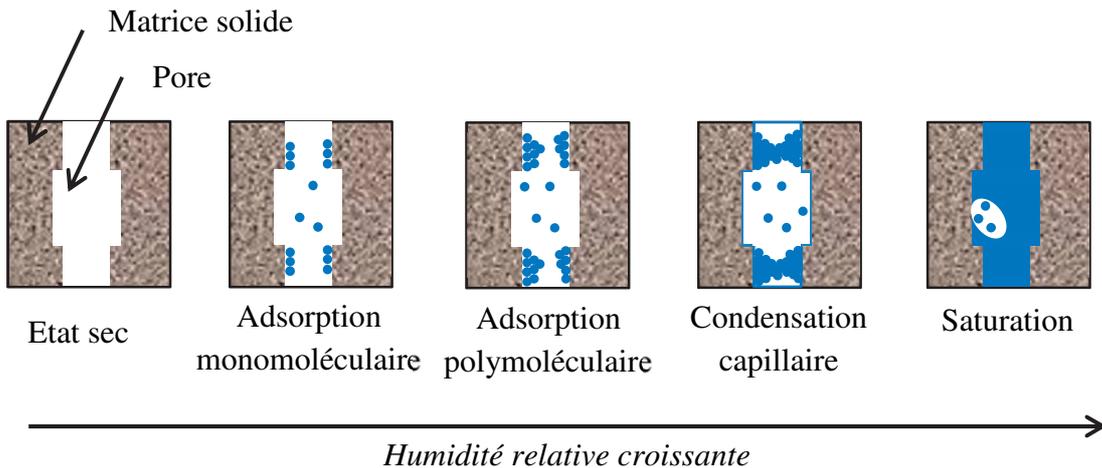


Figure 2-5 Représentation schématique des états hydriques d'un milieu poreux au niveau d'un pore

A l'état sec, l'eau que contient le matériau est évacuée. Cependant, il se peut que l'on retrouve de petites poches d'eau piégée à l'intérieur du matériau. Dès que l'humidité augmente, l'eau est progressivement adsorbée au niveau de la surface des pores d'abord au niveau des pores

les plus gros puis à l'ensemble du matériau. Elle se fixe d'abord en une couche (adsorption monomoléculaire) puis à mesure que l'humidité croît sur plusieurs couches (adsorption polymoléculaire). Ce phénomène est appelée adsorption hygroscopique. Simultanément, se produit le phénomène de diffusion liquide de surface au niveau de la surface des pores dès lors que se forme une couche de molécules d'eau. Aux plus fortes humidités, il apparait le phénomène de conduction capillaire par la formation de ponts liquides. Ils affectent en premier lieu les pores les plus fins puis les autres. A terme lorsque l'humidité est de 100%HR, la teneur en eau atteint une certaine valeur appelée teneur en eau de saturation w_{sat} qui dépend de la porosité du matériau. La quantité d'eau à l'intérieur du matériau est caractérisée par la teneur en eau. Afin d'explicitier cette notion, le formalisme utilisé est basé sur le diagramme des phases de la figure 2-6.



Figure 2-6 Diagramme des phases d'un milieu poreux non saturé¹⁸

Les notations utilisées dans ce schéma sont décrites dans le tableau 2-1.

Symbole	Quantité	Unité
V	Volume total	m ³
V _s	Volume solide	m ³
V _l	Volume liquide	m ³
V _g	Volume gazeux	m ³
V _p	Volume des pores	m ³
m	Masse totale	kg
m _s	Masse solide	kg
m _l	Masse liquide	kg
m _g	Masse de gaz	kg

Tableau 2-1 Paramètres de caractérisation de l'état hydrique d'un milieu poreux

¹⁸ [Collet 2004]

Ces quantités sont reliées par les relations de base suivantes :

- Masse totale

$$m = m_s + m_l + m_g \quad (2-7)$$

- Volume total

$$V = V_s + V_l + V_g \quad (2-8)$$

- Volume des pores

$$V_p = V_l + V_g \quad (2-9)$$

- Masse volumique apparente

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-10)$$

- Masse volumique apparente à l'état sec

$$\rho_0 = \frac{m_s}{V} \quad (2-11)$$

Ces expressions permettent d'obtenir la teneur en eau. Elle peut s'écrire de différentes manières.

- La teneur en eau volumique [m^3/m^3]

$$\theta = \frac{V_l}{V} \quad (2-12)$$

- La teneur en eau massique exprimée par unité de masse [kg/kg]

$$u = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (2-13)$$

- La teneur en eau massique exprimée par unité de volume [kg/m^3]

$$w = \rho_0 u \quad (2-14)$$

La teneur en eau ainsi définie est une teneur en eau totale qui regroupe les formes vapeur et liquide w_v [$kg.m^{-3}$] et w_l [$kg.m^{-3}$] respectivement. La construction du modèle proposé nécessite de les exprimer :

$$w_l = \frac{n_0 - \frac{w}{\rho_v}}{\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v}} \quad (2-15)$$

$$w_v = \frac{\frac{w}{\rho_l} - n_0}{\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v}}$$

n_0 désigne la porosité ouverte du milieu, ρ_v [kg.m^{-3}] et ρ_l [kg.m^{-3}] les masses volumiques respectivement de la vapeur d'eau et de l'eau liquide. Compte tenu de l'écriture formulée, il est à noter que :

$$w = w_v + w_l \quad (2-16)$$

La teneur en eau s'exprime en fonction de l'humidité relative. En phase d'adsorption, la figure 2-7 permet de représenter cette évolution de manière générale. On y retrouve les différentes phases du phénomène décrit précédemment. Les courbes d'adsorption et de désorption sont définies à une température donnée constante. On parle ainsi d'isothermes de sorption.

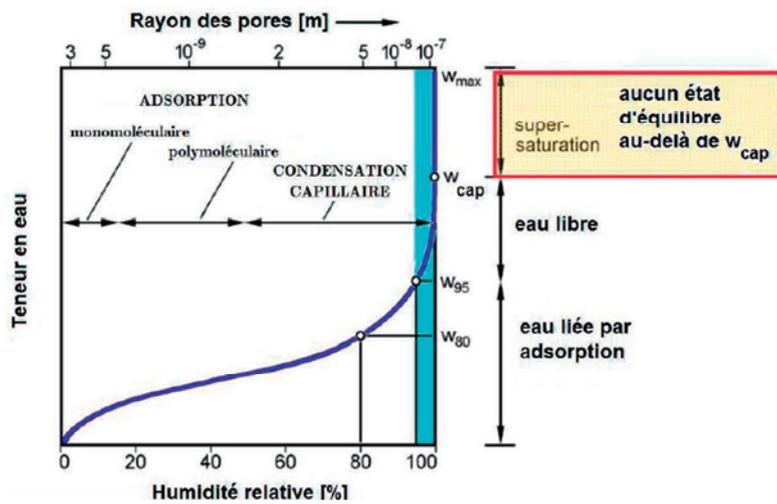


Figure 2-7 Allure de l'isotherme d'adsorption¹⁹

La dérivée de cette courbe (ou pente) caractérise la capacité hydrique également appelée capacité de stockage du matériau. Souvent notée ξ_φ , elle se traduit par la relation (2-17) :

$$\xi_\varphi = \left. \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right|_T \quad (2-17)$$

Sa valeur nous renseigne sur la capacité du matériau à stocker l'humidité en son sein et caractérise ainsi l'inertie hydrique du matériau en conditions isothermes.

La teneur en eau dépend également de la température. La contribution de la température au stockage de l'humidité s'écrit ainsi :

$$\xi_T = \left. \frac{\partial w}{\partial T} \right|_\varphi \quad (2-18)$$

¹⁹ Extrait de [Samri 2008]

2.3.2. Lois de transfert

De nombreux travaux s'appuient sur une description des lois de transfert à l'échelle microscopique pour les appliquer à l'échelle macroscopique ([Whitaker 1977], [Gray 1983]). Sous couvert de l'hypothèse d'état de gaz parfait de la vapeur d'eau, il est montré que la diffusion de la phase vapeur est initiée sous l'effet d'un gradient de pression de vapeur. Le transport de vapeur est régi par trois modes fonction du libre parcours moyen d'une molécule d'eau à travers le réseau poral :

- par effusion déterminée par le nombre de collisions des particules d'eau avec les parois des pores
- par diffusion moléculaire libre déterminée par le nombre de collisions entre les particules elles-mêmes
- par diffusion mixte déterminée à la fois par les collisions particules/parois des pores et par les collisions entre particules

La structure du réseau poral conditionne ainsi largement le transport d'eau par voie vapeur. Le transport d'eau liquide est lié au gradient de pression capillaire et obéit microscopiquement à la loi de Poiseuille.

Par ailleurs, la détermination des propriétés d'un matériau repose sur la mesure de grandeurs macroscopiques résultant de la combinaison de phénomènes à l'échelle microscopique. Toutefois, un certain nombre de précautions sont à prendre pour passer de lois établies à l'échelle microscopique à des lois à l'échelle macroscopique :

- comme pour la détermination expérimentale des caractéristiques physiques du matériau, le milieu est considéré macroscopiquement homogène ce qui suppose un volume d'étude supérieur au volume élémentaire représentatif (VER).
- la loi de Fick qui décrit localement ce transport diffusif doit être réadaptée au cas d'un milieu poreux en tenant compte de la structure globale du réseau poral.
- la définition d'un coefficient de transfert macroscopique de la phase liquide peut être déterminée soit expérimentalement, soit à partir de modèles empiriques, ou estimé au regard de la structure poreuse car la distinction des flux vapeur et liquide est difficile.

D'autres auteurs ont construit leur modèle à partir d'une approche phénoménologique basée sur une description macroscopique des phénomènes mis en jeu ([Philip & De Vries 1957], [Taylor & Cary 1964]).

Ces deux approches, microscopique et macroscopique, conduisent à une formulation continue des transferts d'humidité et de chaleur et au final sont donc rigoureusement équivalentes.

Dans notre contexte d'étude, le raisonnement est mené dans le cadre d'une description macroscopique.

A l'instar de la loi de Fourier pour la diffusion thermique, le transport diffusif de masse d'eau est généré par un gradient de concentration. Conjointement, ce transport de matière peut également être généré par un gradient de température.

Par ailleurs, le transport advectif a pour origine la circulation d'air dans le milieu et contribue ainsi au transport de masse. L'eau sous forme liquide n'est pas affectée par le transport par advection car elle ne se déplace pas de la même manière que la phase gazeuse.

Le schéma de la figure 2-8 synthétise ces modes de transport et leurs moteurs respectifs dans le cas du transport d'eau.

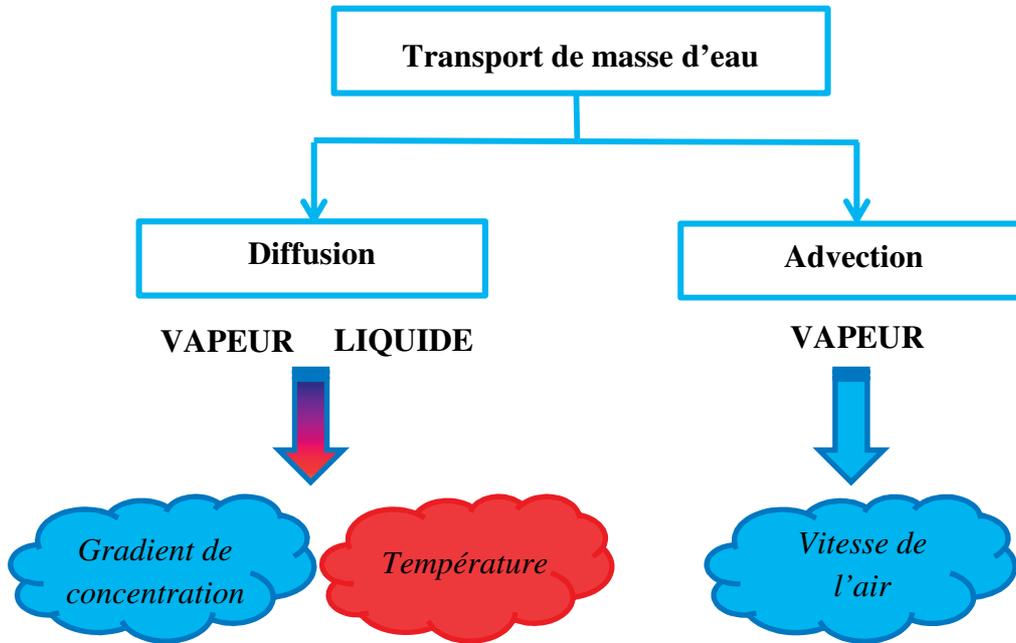


Figure 2-8 Moteurs du transport de masse

Ainsi, dans ce cas, on a :

$$g_{diff} = -D_v \nabla \gamma_v - D_l \nabla \gamma_l + (D_{T,v} + D_{T,l}) \nabla T \quad (2-19)$$

et

$$g_{adv} = C_v V \quad (2-20)$$

Dans ces relations, les γ_i représentent les concentrations des phases vapeur et liquide, les D_i sont homogènes à des coefficients de diffusion et C_v à un coefficient de convection (ou d'advection). L'objectif de cette section est de les déterminer.

2.3.2.1. Phénomène de diffusion

D'un point de vue macroscopique, Lefebvre [Lefebvre 2006] montre que l'écoulement d'un fluide à une température donnée en milieu poreux est décrit par la forme généralisée de la loi de Darcy. Il démontre qu'elle est valable aussi bien pour un gaz que pour un liquide.

De manière générale, on écrit :

$$g_{diff} = -\rho \frac{k_e}{\mu_{dyn}} \nabla p \quad (2-21)$$

k_e [m^2] représente la perméabilité effective du milieu au fluide, μ_{dyn} [Pa.s] la viscosité dynamique du fluide, ρ [$kg.m^{-3}$] sa masse volumique et p [Pa] sa pression.

La perméabilité est définie comme la capacité d'un milieu poreux à transmettre un fluide. La perméabilité effective du matériau se comprend alors comme une pondération de la perméabilité absolue du milieu au fluide considéré :

$$k_e = k k_r \quad (2-22)$$

k [m^2] désigne la perméabilité absolue et k_r la perméabilité relative. La référence de perméabilité absolue choisie est celle de l'air sec.

Le moteur de l'écoulement de chaque fluide est cependant différent. Il s'agit de la pression partielle de vapeur pour la phase vapeur, de la pression capillaire pour la phase liquide et de la pression partielle d'air pour l'air.

2.3.2.1.1. Diffusion de la vapeur d'eau

La diffusion de vapeur d'eau dans l'air, en supposant que l'air humide est un gaz parfait, est décrite suivant la relation :

$$g_{v,diff} = -\delta_{p,a} \nabla p_v \quad (2-23)$$

où $\delta_{p,a}$ [$kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$] désigne la perméabilité à la vapeur de l'air et p_v [Pa] la pression partielle de vapeur.

Cette relation (2-23) dérive de la loi de Fick qui exprime la densité de flux diffusif de vapeur en fonction du gradient de concentration en vapeur. Il est à noter que cette écriture est toutefois assimilable à une application directe de la loi de Darcy.

La perméabilité à la vapeur de l'air s'écrit :

$$\delta_{p,a} = 2,31.10^{-5} \frac{M_l}{RT} \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,81} \quad (2-24)$$

R est la constante universelle des gaz parfaits ($8,314 J.mol^{-1}.K^{-1}$) et M_l la masse molaire de la vapeur d'eau ($0,018 kg.mol^{-1}$).

Si le matériau offre des pores de petite taille, le phénomène d'effusion peut être pris en compte par l'introduction d'un facteur de résistance à la diffusion noté μ . La relation (2-25) exprime ainsi la densité de flux de vapeur.

$$g_{v,diff} = -\frac{\delta_{p,a}}{\mu} \nabla p_v = -\delta_p \nabla p_v \quad (2-25)$$

δ_p [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$] désigne la perméabilité à la vapeur du matériau.

L'expression du flux diffusif de vapeur s'écrit donc :

$$g_{v,diff} = -\delta_p \nabla(\varphi p_{sat}) = -D_v \nabla(\varphi p_{sat}) \quad (2-26)$$

La relation (2-26) montre la double dépendance de ce transport diffusif à l'humidité relative et à la température par l'intermédiaire de la pression de vapeur saturante. Le gradient de concentration en vapeur d'eau de l'air quantifié par un gradient de pression de vapeur est le « vrai » moteur de ce transport.

En revanche, lorsqu'un gradient de température est appliqué au sein d'un milieu poreux deux modes de transport provoquent le déplacement de vapeur : le transport effusif (cf. relation (2-26)) et la thermodiffusion (ou effet Soret). Notamment décrit dans les travaux de thèse d'Artola [Artola 2009], le phénomène de thermodiffusion apparaît lorsqu'un mélange est soumis à un gradient de température. Dans une telle situation, des gradients de concentration de chaque espèce se mettent en place le long du gradient de température. Mathématiquement, cela se traduit par la relation :

$$g_{v,diff\ total} = g_{fick} + g_{soret} \quad (2-27)$$

Le terme fickien g_{fick} correspond au $g_{v,diff}$ développé précédemment. La contribution liée à la thermodiffusion peut s'écrire :

$$g_{soret} = -\alpha_{soret} \nabla T = -D_{v,T} \nabla T \quad (2-28)$$

α_{soret} [$\text{kg.K}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}$] représente le coefficient de Soret ou coefficient de diffusion de la vapeur d'eau sous gradient de température.

Cette différence de température provoque ainsi une différence de densité des phases constituantes. Dans notre configuration, la vapeur d'eau va ainsi migrer dans l'air des zones froides vers les zones chaudes. Krus [Krus 1996] montre que la thermodiffusion ne contribue qu'à hauteur de 0,05% au transport total de vapeur. [Janssen 2011] le confirme à partir d'une synthèse bibliographique et d'une analyse un grand nombre d'études expérimentales sur différents matériaux du génie civil appuyée par une analyse thermodynamique. En effet, dans le domaine de la physique du bâtiment, les gradients de température imposés sont trop faibles pour que ce phénomène puisse jouer un rôle significatif.

Dans la suite de ce travail, le phénomène de thermodiffusion est donc négligé :

$$D_v^T = 0 \quad (2-29)$$

2.3.2.1.2. Diffusion de l'eau liquide

On considère que le transfert d'eau liquide est initié lorsqu'une phase liquide existe dans le matériau. Ainsi, il démarre lorsque la teneur en eau du milieu dépasse une teneur en eau critique qui correspond à l'existence d'une phase liquide continue dans le matériau. A partir de cette valeur, le transfert de liquide à l'échelle macroscopique obéit à la loi de Darcy qui est une extension de la loi de Poiseuille à l'échelle du pore. Elle est valable aussi bien dans le cas d'un milieu saturé que dans le cas d'un milieu non saturé.

$$g_{l,diff} = K_l \nabla p_{suc} \quad (2-30)$$

K_l [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$] est appelé conductivité hydraulique.

Localement, à l'échelle du pore, une augmentation de l'humidité relative entraîne une transition de la phase d'adsorption polymoléculaire à la phase de condensation capillaire pour laquelle se forme un pont liquide (figure 2-9). La phase gazeuse est séparée de la phase liquide par un ménisque, interface courbe entre fluide mouillant et non mouillant.

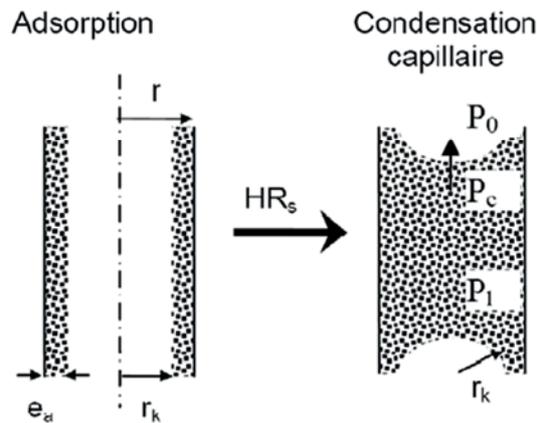


Figure 2-9 Condensation capillaire dans un pore²⁰

Les notations utilisées dans ce schéma sont décrites dans le tableau 2-2.

²⁰ [Collet 2004]

Symbole	Quantité	Unité
r	Rayon du pore	m
r_k	Rayon du ménisque	m
e_a	Épaisseur adsorbée	m
$p_0 = p_{atm}$	Pression atmosphérique	Pa
$p_c = p_{suc}$	Pression capillaire (ou pression de suction)	Pa
p_l	Pression liquide	Pa

Tableau 2-2 Paramètres de caractérisation de la condensation capillaire

Ainsi, lorsque se produit le phénomène de condensation capillaire, l'eau liquide est en équilibre avec l'atmosphère ambiante. La loi de Kelvin traduit cette relation :

$$p_{suc} = p_{atm} - p_l = -\rho_l \frac{R}{M_l} T \ln(\varphi) \quad (2-31)$$

ρ_l [kg.m⁻³] désigne la masse volumique de l'eau.

Le terme de diffusion liquide à une température donnée s'exprime alors :

$$g_{l,diff} = -D_{l,\varphi} \nabla \varphi \quad (2-32)$$

où $D_{l,\varphi}$ [kg.m⁻¹.s⁻¹] désigne le coefficient de conduction liquide isotherme sous gradient d'humidité relative.

$$D_{l,\varphi} = K_l \rho_l \frac{R}{M_l} \frac{T}{\varphi} \quad (2-33)$$

A de faibles valeurs d'humidité relative, le transport d'eau liquide est lié à des phénomènes de condensation-évaporation notamment dans les pores les plus fins [Philip et De Vries 1957]. Le transfert de masse total est ainsi accéléré lorsque la teneur en eau augmente puisque la conductivité liquide dans les pores les plus fins est plus importante que la perméabilité à la vapeur δ_p [Peukhuri 2003].

Selon [Krus 1996], la diffusion de surface est également à prendre en compte. Elle apparaît bien avant que la condensation capillaire ne se produise. En effet, lorsque la teneur en eau augmente par adsorption physique des molécules d'eau sur la surface des pores, l'épaisseur des couches adsorbées devient plus importante et de ce fait plus mobile (figure 2-10). Comme expliqué par la théorie BET [Brunauer 1938], les forces de liaison des couches de molécules

d'eau éloignées de la surface sont bien inférieures à celle de la couche en contact avec la surface.

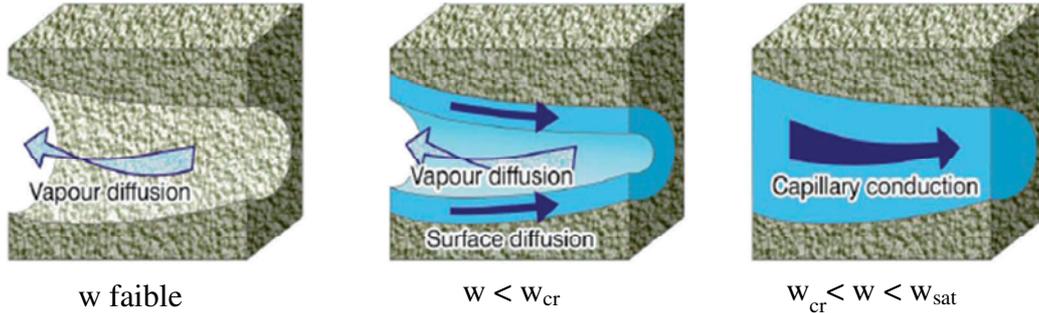


Figure 2-10 Mécanismes de transport d'eau liquide²¹

Il est difficile de distinguer les phénomènes de diffusion surfacique et de condensation capillaire. Le phénomène de diffusion surfacique a pour moteur le gradient de teneur en eau alors que la condensation capillaire a pour moteur le gradient de pression capillaire. Ceci dit, pression capillaire et teneur en eau sont fonction de l'humidité relative.

Le recours au formalisme de Philip et De Vries selon lequel le transport diffusif de liquide est généré par un gradient de teneur en eau et de température permet ainsi d'unifier l'écriture du transport diffusif liquide le généralisant par la même en conditions non isothermes :

$$g_{l,diff} = -D_{l,w}^T \nabla w - D_{l,T} \nabla T \quad (2-34)$$

$D_{l,w}^T$ [$m^2 \cdot s^{-1}$] désigne le coefficient de diffusion liquide isotherme sous gradient de teneur en eau et $D_{l,T}$ [$kg \cdot K^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$] le coefficient de diffusion liquide sous gradient de température.

En conditions isothermes, la relation (2-34) peut également s'exprimer en fonction de l'humidité relative :

$$\begin{aligned} g_{l,diff} &= -D_{l,w}^T \left. \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right|_T \nabla \varphi \\ &= -D_{l,\varphi} \nabla \varphi \end{aligned} \quad (2-35)$$

Ainsi,

$$D_{l,w}^T = \left. \frac{D_{l,\varphi}}{\frac{\partial w}{\partial \varphi}} \right|_T \quad (2-36)$$

Le développement de l'équation (2-34) en utilisant la dépendance de la teneur en eau à l'humidité relative et à la température nous permet d'écrire :

²¹ [Evrard 2008]

$$\begin{aligned} g_{l,diff} &= -D_{l,w}^T \left[\frac{\partial w}{\partial \varphi} \Big|_T \nabla \varphi + \frac{\partial w}{\partial T} \Big|_\varphi \nabla T \right] - D_{l,T} \nabla T \\ &= -D_l^\varphi \nabla \varphi - D_l^T \nabla T \end{aligned} \quad (2-37)$$

D_l^φ [kg.m⁻¹.s⁻¹] désigne le coefficient de conduction liquide sous gradient d'humidité relative et D_l^T [kg.K⁻¹.m⁻¹.s⁻¹] le coefficient total de diffusion liquide sous gradient de température.

Ces derniers ont pour expression :

$$\begin{aligned} D_l^\varphi &= D_{l,w}^T \frac{\partial w}{\partial \varphi} \Big|_T \\ D_l^T &= D_{l,w}^T \frac{\partial w}{\partial T} \Big|_\varphi + D_{l,T} \nabla T \end{aligned} \quad (2-38)$$

Comme le montre Evrard, en s'appuyant sur des données expérimentales, il est possible d'exprimer les deux phénomènes de diffusion surfacique et de condensation capillaire conjointement en exprimant judicieusement le coefficient de diffusion liquide (cf. chapitre 3). La prise en compte de la diffusion de surface a pour conséquence d'initier le transport liquide à des teneurs en eau plus faibles que si la condensation capillaire était uniquement prise en compte.

Par ailleurs, à l'instar de la phase vapeur, la phase liquide est soumise à la thermodiffusion. Pour les mêmes raisons, ce phénomène n'est pas pris en compte ($D_{l,T} = 0$).

2.3.2.1.3. Diffusion d'air

La densité de flux diffusive d'air a pour expression :

$$g_{a,diff} = -\delta_a \nabla \rho_a \quad (2-39)$$

δ_a [kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹] est la perméabilité du matériau à l'air et ρ_a [kg.m⁻³] est la densité volumique de l'air.

Les gradients de température contribuent également au phénomène de transport diffusif par la modification de densité de fluide qu'ils génèrent. Cette contribution est appelé effet cheminée. Cependant, les gradients de température suffisamment faibles dans une application au bâtiment permettent de négliger cet effet.

2.3.2.2. Phénomène d'advection

Les phénomènes advectifs en milieu poreux sont générés par les déplacements de matière. Ces déplacements sont conditionnés par la vitesse de l'air.

Elle dépend du gradient de pression totale. Sa détermination est issue de la loi de proportionnalité de Poiseuille qui relie le gradient de pression totale à la vitesse de l'air en milieu poreux.

$$v = \frac{k_g}{\mu_g} \nabla p_t \quad (2-40)$$

k_g [m²] représente la perméabilité effective de l'air humide μ_g [Pa.s] la viscosité dynamique de l'air et p_t [Pa] la pression totale.

2.3.2.2.1. Advection de la vapeur d'eau

La partie convective du flux de vapeur est due à la circulation d'air humide à travers le matériau. La relation (2-41) permet de l'exprimer en fonction de la vitesse v [m.s⁻¹] de l'air et du rapport de mélange r :

$$g_{v,adv} = \rho_a r v \quad (2-41)$$

Le rapport de mélange d'un volume d'air désigne le rapport de la masse de vapeur d'eau qu'il contient à la masse d'air sec. Il s'exprime en fonction de la pression partielle de vapeur par :

$$r = \frac{M_v}{M_a} \frac{p_v}{(p_{atm} - p_v)} \quad (2-42)$$

Sur les plages d'utilisation de température et d'humidité relative que l'on rencontre, la pression atmosphérique p_{atm} [Pa] est largement supérieure à la pression partielle de vapeur ce qui implique :

$$p_{atm} - p_v \approx p_{atm} \quad (2-43)$$

De plus, sous ces conditions, le rapport des masses molaires de la vapeur d'eau M_v [g.mol⁻¹] sur l'air sec M_a [g.mol⁻¹] reste constant :

$$\frac{M_v}{M_a} = \frac{18,01}{28,97} \approx 0,622 \quad (2-44)$$

Ainsi, comme le rappelle Tariku [Tariku 2010], il est habituel d'utiliser la relation simplifiée suivante :

$$r = 0,622 \frac{p_v}{p_{atm}} \quad (2-45)$$

On obtient alors l'expression simplifiée :

$$g_{v,adv} = \rho_a 0,622 \frac{p_v}{p_{atm}} v \quad (2-46)$$

Que l'on peut développer en fonction des potentiels de calcul sous la forme :

$$g_{v,adv} = \rho_a 0,622 \frac{\varphi p_{sat} k_g}{p_{atm} \mu_g} \nabla p_t \quad (2-47)$$

2.3.2.2.2. *Advection d'air*

Exprimée de façon analogue à la densité de flux de vapeur convectif, la densité de flux d'air sec advectif s'exprime en fonction de la vitesse de l'air par :

$$g_{a,adv} = \rho_a v \quad (2-48)$$

En explicitant le terme de vitesse de l'air, on a :

$$g_{a,adv} = \rho_a \frac{k_g}{\mu_g} \nabla p_t \quad (2-49)$$

2.3.3. *Bilan de conservation*

2.3.3.1. *Equation de conservation de la masse d'air*

Dans les applications de la physique du bâtiment, en raison des faibles vitesses d'air et de changements de température et de pression rencontrés, on suppose que l'air est incompressible. La masse volumique de l'air est ainsi admise constante. L'état de masse d'air conserve un régime stationnaire :

$$\nabla [g_{a,adv}] = 0 \quad (2-50)$$

Cette relation permet d'écrire :

$$\nabla \left[\rho_a \frac{k_g}{\mu_g} \nabla p_t \right] = 0 \quad (2-51)$$

En utilisant l'hypothèse de masse volumique d'air constante et en s'appuyant sur l'expression de la vitesse de l'air :

$$\nabla v = 0 \quad (2-52)$$

La vitesse de l'air est donc constante. Au travers d'une paroi d'épaisseur e [m], de l'expression de la vitesse de l'air en fonction de la pression totale, il vient :

$$v = \frac{k_g \Delta p_t^\kappa}{\mu_g e} \quad (2-53)$$

où κ est un coefficient qui caractérise la nature de l'écoulement (usuellement pris égal à 1 pour un écoulement laminaire et à 0,5 pour un écoulement turbulent).

2.3.3.2. Equation de conservation de la masse d'eau

La densité de flux total d'eau s'écrit comme la somme des densités liquide et vapeur à la fois sous forme advective et diffusive :

$$g_t = g_{v,diff} + g_{l,diff} + g_{v,adv} \quad (2-54)$$

En exprimant le terme inertiel en fonction des potentiels de calcul, on obtient :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{dw}{d\varphi} \Big|_T \frac{d\varphi}{dt} + \frac{dw}{dT} \Big|_\varphi \frac{dT}{dt} = \xi_\varphi \frac{d\varphi}{dt} + \xi_T \frac{dT}{dt} \quad (2-55)$$

L'écriture développée de ces flux introduite dans l'équation de conservation de masse d'eau (2-2) nous fournit :

$$\xi_\varphi \frac{d\varphi}{dt} + \xi_T \frac{dT}{dt} = \nabla \left[[D_v \nabla(\varphi p_{sat})] - \rho_a 0,622 \frac{\varphi p_{sat}}{p_{atm}} v \right] + \nabla [D_l^\varphi \nabla \varphi + D_l^T \nabla T] \quad (2-56)$$

En utilisant l'expression de la vitesse d'air établie au paragraphe précédent, l'équation de conservation de masse d'eau s'écrit finalement :

$$\xi_\varphi \frac{d\varphi}{dt} + \xi_T \frac{dT}{dt} = \nabla \left[[D_v \nabla(\varphi p_{sat})] - \rho_a 0,622 \frac{\varphi p_{sat}}{p_{atm}} \frac{k_g \Delta p_t^\kappa}{\mu_g e} \right] + \nabla [D_l^\varphi \nabla \varphi + D_l^T \nabla T] \quad (2-57)$$

2.4. Transfert de chaleur

2.4.1. Stockage de chaleur

Les transferts de chaleur au sein des milieux poreux se basent sur une conservation de l'enthalpie qui permet d'exprimer la quantité de chaleur mise en jeu pendant la transformation isobare d'un système thermodynamique. Ainsi, dans le cadre de cette étude, l'enthalpie totale peut être décomposée en fonction des contributions liées aux différentes phases du milieu.

$$H = H_0 + H_l + H_v + H_a + H_{lat} + H_w \quad (2-58)$$

La définition de ces entités est rappelée dans le tableau 2-3.

Symbole	Quantité	Unité
H	Enthalpie totale du matériau humide	J.m ⁻³
H ₀	Enthalpie du matériau sec	J.m ⁻³
H _l	Enthalpie de l'eau liquide	J.m ⁻³
H _v	Enthalpie de la phase vapeur	J.m ⁻³
H _a	Enthalpie de l'air sec	J.m ⁻³
H _{lat}	Enthalpie de changement de phase	J.m ⁻³
H _w	Enthalpie de sorption	J.m ⁻³

Tableau 2-3 *Enthalpies : définitions*

Le formalisme utilisé par De Vries [De Vries 1957] explicite ces différents termes.

L'enthalpie du matériau sec H₀ s'écrit :

$$H_0 = \rho_0 c_0 (T - T_0) \quad (2-59)$$

avec ρ_0 [kg.m⁻³] la masse volumique du matériau sec, c_0 [J.kg⁻¹.K⁻¹] la capacité thermique massique isobare du matériau sec et T_0 [K] une température énergétique de référence.

L'enthalpie de l'eau liquide contenue dans le matériau H_l s'écrit :

$$H_l = w c_l (T - T_0) \quad (2-60)$$

avec c_l [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] la capacité thermique massique isobare de l'eau liquide.

L'enthalpie de la phase gazeuse contenue dans le matériau H_g s'écrit :

$$H_g = H_a + H_v = (c_a w_a + c_v w_v)(T - T_0) \quad (2-61)$$

avec c_a [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] la capacité thermique massique isobare de l'air à l'état sec, c_v [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] la capacité thermique massique isobare de la vapeur d'eau, w_a [kg.m^{-3}] la teneur en air et w_v [kg.m^{-3}] la teneur en vapeur du matériau.

L'enthalpie de changement de phase H_{lat} s'écrit :

$$H_{lat} = l_v w_v \quad (2-62)$$

avec l_v [J.kg^{-1}] la chaleur latente de vaporisation à la température de référence T_0 et w_v [kg.m^{-3}] la teneur en vapeur du matériau.

L'enthalpie de sorption H_w a pour expression :

$$H_w = \int_{w_1}^{w_2} q_d(w) dw \quad (2-63)$$

q_d [J.kg^{-1}] désigne la chaleur différentielle d'adsorption, w_1 et w_2 correspondent respectivement à une teneur en eau à une humidité ϕ_1 et une température T_1 et une teneur en eau à une humidité ϕ_2 et une température T_2 . L'adsorption étant un phénomène exothermique l'enthalpie d'adsorption est négative.

La modélisation adoptée nous conduit à émettre un certain nombre d'hypothèses.

La température T_0 est choisie à la température de référence T_{ref} de 296,15 K. A cette température, la chaleur latente de vaporisation l_v est de $2,45.10^6 \text{ J.kg}^{-1}$.

L'enthalpie de sorption est admise négligeable devant les autres contributions. Par ailleurs, les contributions de la phase gazeuse et du changement d'état sont également admises négligeable devant celles de la phase liquide et solide puisque teneur en air et teneur en vapeur restent très faibles :

$$H_w + H_g + H_{lat} \ll H_0 + H_l \quad (2-64)$$

Au final, on obtient donc :

$$H = H_0 + H_l = [\rho_0 c_0 + w c_l](T - T_0) \quad (2-65)$$

2.4.2. Lois de transfert

Le transfert de chaleur dans les milieux poreux humides est dû à plusieurs mécanismes différents :

- la conduction dans les phases solide, liquide et gazeuse générée par un gradient de température
- l'advection créée par la circulation d'air
- le rayonnement entre les parois des pores dû aux ondes électromagnétiques
- le changement de phase de l'eau lié au phénomène d'évaporation-condensation
- le transport enthalpique de chaleur par chaleur sensible
- le transport enthalpique de chaleur du au phénomène de sorption

Mentionné en début de chapitre, les transferts radiatifs internes sont négligés.

Ce paragraphe s'intéresse ainsi à la description des autres modes de transport conductif, advectif et enthalpique.

Le schéma de la figure 2-11 synthétise les modes de transport considérés et leurs moteurs respectifs.

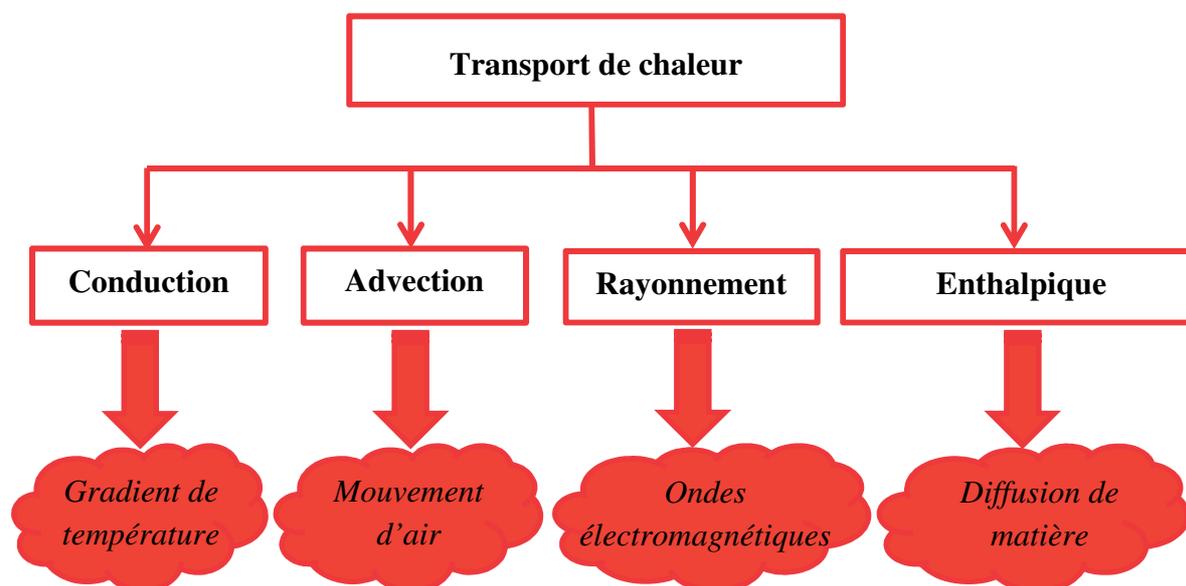


Figure 2-11 Mécanismes de transport de la chaleur

2.4.2.1. Phénomène de conduction

La conduction est un mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions proches et se réalisant sans déplacement global de matière à l'échelle macroscopique. A ce titre, elle se différencie du phénomène d'advection. Elle est analogue au phénomène de diffusion dans le cadre des transferts de masse. La conduction peut s'interpréter comme la transmission de proche en proche de l'agitation thermique : une particule cède une partie de son énergie cinétique à la particule voisine.

La conduction thermique est un phénomène de transport de l'énergie interne dû à une hétérogénéité de l'agitation moléculaire. C'est donc un phénomène irréversible. Dans les fluides (liquides et gaz) ce transport d'énergie résulte de la non uniformité du nombre de chocs par unité de volume, de façon analogue au phénomène de diffusion. Dans les solides, la

conduction thermique est assurée conjointement par les électrons de conduction et les vibrations du réseau cristallin.

La loi de Fourier traduit la proportionnalité de la densité de flux conductif au gradient de température :

$$q_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (2-66)$$

λ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$], la conductivité thermique du matériau humide dépend de la nature et de la structure du milieu. Elle est fonction de la teneur en eau du milieu.

2.4.2.2. *Phénomène d'advection*

Le phénomène d'advection est lié à la circulation d'air. La densité de flux advectif prend la forme :

$$q_{adv} = c_a(T - T_{ref})g_{a,adv} + c_v(T - T_{ref})g_{v,adv} \quad (2-67)$$

$g_{a,adv}$ et $g_{v,adv}$ sont les densités de flux massique advectif respectivement d'air et de vapeur.

Cette relation développée devient :

$$q_{adv} = c_a(T - T_{ref})\rho_a v + c_v(T - T_{ref})\rho_a r v \quad (2-68)$$

2.4.2.3. *Transfert thermique par chaleur sensible*

Dans ce cas, le matériau en question peut céder ou stocker de l'énergie en voyant varier sa propre température, sans pour autant changer d'état.

La densité de flux enthalpique par chaleur sensible prend la forme :

$$q_{sen} = c_v(T - T_{ref})g_{v,diff} + c_l(T - T_{ref})g_{l,diff} \quad (2-69)$$

$g_{v,diff}$ et $g_{l,diff}$ sont les densités de flux massique diffusif respectivement de vapeur et d'eau liquide. Dans le cadre de la modélisation adoptée, la densité de flux diffusif d'air est admise nulle car l'air est supposé incompressible (cf. paragraphe 2.3.3.1). En utilisant leurs expressions développées précédemment, on obtient :

$$q_{sen} = - \left[c_l(T - T_{ref}) \nabla [D_l^\varphi \nabla \varphi + D_l^T \nabla T] \right] - \left[c_v(T - T_{ref}) \nabla [D_v \nabla (\varphi p_{sat})] \right] \quad (2-70)$$

2.4.2.4. Phénomène de changement de phase

Lors du changement d'état d'un corps pur tel que l'eau, la chaleur se transfère de façon isotherme contrairement au transfert thermique par chaleur sensible. Elle s'exprime par la relation :

$$q_{lat} = l_v g_v \quad (2-71)$$

Elle traduit les processus d'évaporation-condensation à l'échelle macroscopique. Sa forme développée devient :

$$q_{lat} = -l_v [D_v \nabla(\varphi p_{sat})] - \rho_a r v \quad (2-72)$$

2.4.3. Bilan de conservation

La densité de flux total de chaleur est la somme des densités de flux conductive, convective et de changement d'état :

$$q_t = q_{cond} + q_{adv} + q_{sen} + q_{lat} \quad (2-73)$$

L'expression simplifiée du terme d'inertie devient :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \left[\rho_0 c_0 + c_l \left(w + (T - T_{ref}) \frac{\partial w}{\partial T} \Big|_{\varphi} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \left[c_l \left((T - T_{ref}) \frac{\partial w}{\partial \varphi} \Big|_T \right) \right] \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2-74)$$

L'écriture développée de ces flux introduite dans l'équation de conservation de chaleur (2-4) nous fournit :

$$\begin{aligned} & \left[\rho_0 c_0 + c_l (w + (T - T_{ref}) \xi_T) \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \left[c_l ((T - T_{ref}) \xi_{\varphi}) \right] \frac{\partial \varphi}{\partial t} \\ & = \nabla \left[\lambda \nabla T + (l_v + c_v (T - T_{ref})) [D_v \nabla(\varphi p_{sat}) - \rho_a r v] \right] \\ & + \nabla [c_l (T - T_{ref}) [D_l^{\varphi} \nabla \varphi + D_l^T \nabla T] - c_a (T - T_{ref}) \rho_a v] \end{aligned} \quad (2-75)$$

2.5. Bilan des transferts

Les équations de conservation de masse d'eau et de chaleur sont couplées fortement. A l'inverse, l'équation de conservation de la masse d'air est couplée faiblement avec les deux autres équations. Elle trouve toutefois son utilité dans la détermination de la vitesse de l'air circulant à l'intérieur du matériau.

BILAN

Transferts pris en compte et équations constitutives

- **Transfert d'humidité** : *diffusion de vapeur, de liquide et convection de vapeur*

Equation de conservation de la masse d'eau :

$$\xi_\varphi \frac{d\varphi}{dt} + \xi_T \frac{dT}{dt} = \nabla \left[D_v \nabla (\varphi p_{sat}) \right] - \rho_a 0,622 \frac{\varphi p_{sat} k_g \Delta p_t^\kappa}{p_{atm} \mu_a e} + \nabla [D_l^\varphi \nabla \varphi + D_l^T \nabla T]$$

- **Transfert d'air** : *diffusion et convection d'air*

Equation de conservation de la masse d'air :

$$0 = \nabla \left[\rho_a \frac{k_g \Delta p_t^\kappa}{\mu_a e} \right]$$

- **Transfert de chaleur** : *conduction, convection et changement d'état*

Equation de conservation de la chaleur :

$$\begin{aligned} & [\rho_0 c_0 + c_l (w + (T - T_{ref}) \xi_T)] \frac{\partial T}{\partial t} + [c_l ((T - T_{ref}) \xi_\varphi)] \frac{\partial \varphi}{\partial t} \\ & = \nabla \left[\lambda \nabla T + (l_v + c_v (T - T_{ref})) [D_v \nabla (\varphi p_{sat}) - \rho_a r v] \right] \\ & + \nabla [c_l (T - T_{ref}) [D_l^\varphi \nabla \varphi + D_l^T \nabla T] - c_a (T - T_{ref}) \rho_a v] \end{aligned}$$

2.6. Transferts en multicouche

La plupart des constructions du bâtiment sont composées de parois multicouches. Au matériau portant peut ainsi être apposée une couche d'enduit, de peinture, un pare vapeur... Qiu [Qiu 2003] a montré que la différence de pression capillaire à l'interface de contact crée une résistance au transfert de la phase liquide dont l'influence sur la distribution de la teneur en eau dans la paroi est significative. De Freitas divise l'interface de contact entre deux matériaux en trois configurations [De Freitas 1996] :

- continuité hydraulique : il y a une connexion interne des deux matrices solides des deux matériaux.
- contact naturel : il n'y a pas de connexion interne des deux matrices solides.
- couche d'air : il y a une couche d'air dont l'épaisseur est de quelques millimètres formée entre les deux matériaux.

Les trois configurations sont présentées dans la figure 2-12.

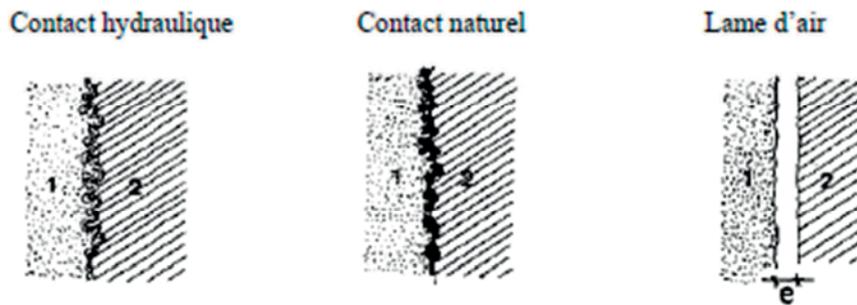


Figure 2-12 Configurations de contact entre deux matériaux²²

Le mécanisme de transfert à l'interface du contact de deux matériaux n'est pas simple à interpréter car l'état de contact est difficilement accessible.

Dans cette partie, on considère une paroi constituée de deux matériaux A et B. Au sein de chaque paroi, les équations établies précédemment restent valables. Deux types de contact peuvent être envisagés :

- Contact parfait : sans résistance de contact
- Contact imparfait : avec résistance de contact

Dans le cas de contact parfait, Mendes [Mendes 2003] suppose que la température et la pression capillaire sont continues :

$$\begin{cases} T_A = T_B \\ p_{suc,A} = p_{suc,B} \end{cases} \quad (2-76)$$

L'égalité des pressions capillaires permet d'écrire :

²² [De Freitas 1996]

$$\rho_l \frac{R}{M_l} T_A \ln(\varphi_A) = \rho_l \frac{R}{M_l} T_B \ln(\varphi_B) \quad (2-77)$$

Et implique la continuité de l'humidité relative à l'interface. Finalement :

$$\begin{cases} T_A = T_B \\ \varphi_A = \varphi_B \end{cases} \quad (2-78)$$

En réalité, il existe des résistances thermique et massique à l'interface à cause des bulles d'air entre les deux couches de matériaux. En contact imparfait, la densité de flux de chaleur résistive à travers le contact q_{res} [W.m⁻²] est proportionnelle au gradient de température :

$$q_{res} = -\frac{\nabla T}{R_{th}} \quad (2-79)$$

où R_{th} (m².K.W⁻¹) est la résistance thermique à l'interface des matériaux. Ce coefficient peut englober les phénomènes de transport radiatif, conductif et convectif [Hagentoft 2001].

Par ailleurs, comme dans une situation monocouche, l'humidité traverse le contact sous la forme liquide et vapeur. La phase liquide se déplace sous gradient de teneur en eau tandis que la diffusion de vapeur est due à un gradient de pression partielle de vapeur. La densité de flux de masse résistive s'exprime par la relation :

$$g_{res} = g_{v,res} + g_{l,res} = -\frac{\nabla p_v}{R_v} - \frac{\nabla w}{R_l} \quad (2-80)$$

R_v [m.s⁻¹] et R_l [[kg⁻¹.m.s]] désignent les résistances respectivement au transfert de la phase vapeur et de la phase liquide.

2.7. Conditions aux limites

Dans cette section, on s'intéresse aux échanges qui ont lieu entre le milieu poreux et l'ambiance dans laquelle il est plongé.

On se place ici dans le cadre d'une application à la physique du bâtiment.

Ainsi, les matériaux poreux de construction intégrés en paroi d'un bâtiment sont susceptibles d'être soumis aux phénomènes de :

- rayonnement
 - rayonnement solaire direct et diffus incident
 - rayonnement solaire réfléchi par le sol, les autres bâtiments...
- convection thermique surfacique
 - échange de convection naturelle entre l'air ambiant et la surface de la paroi
 - échange de convection forcée (dû au vent, aux systèmes de ventilation...)
- convection massique surfacique
- advection de vapeur par circulation d'air humide
- changement d'état de l'eau en surface de paroi
- diffusion de liquide (pluie)

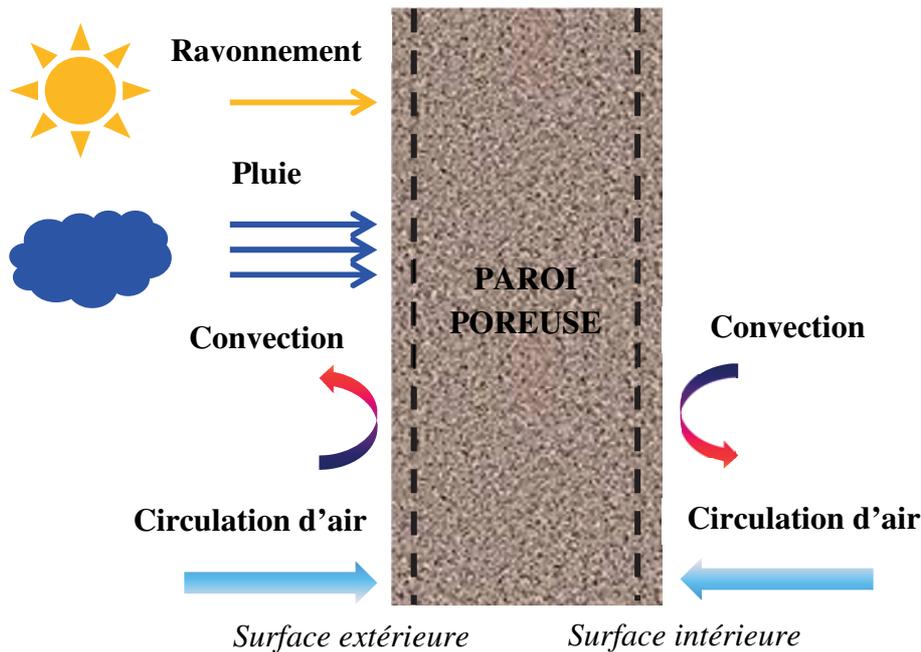


Figure 2-13 Conditions aux limites intérieure et extérieure

2.7.1. Le rayonnement

On distingue les échanges de grandes longueurs d'ondes et les échanges de courtes longueurs d'ondes pour caractériser l'interaction rayonnement solaire incident/paroi.

$$q_{rad,total} = q_{rad} + \alpha I_N \quad (2-81)$$

Dans la relation 2-81, la densité de flux radiatif dû aux courtes longueurs d'onde s'exprime simplement par le produit de l'absorptivité aux courtes longueurs d'ondes α par le rayonnement solaire incident total reçu par la surface externe de la paroi I_N [$W.m^{-2}$].

La détermination de la densité de flux radiatif dû aux grandes longueurs d'onde q_{rad} [$W.m^{-2}$] est plus complexe et fait l'objet du développement de ce paragraphe.

Les coefficients d'échanges radiatifs sont caractérisés par des formulations exactes dans l'hypothèse de corps gris lambertien. On considère le flux radiatif reçu par la surface du milieu poreux.

Ainsi, la densité de flux radiatif q_{rad} [$W.m^{-2}$] reçu obéit à la loi de Stefan-Boltzmann et s'exprime :

$$q_{rad} = \varepsilon F \sigma (T_e^4 - T_{surf}^4) \quad (2-82)$$

ε représente l'émissivité, F le facteur de forme, σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$), T_e [K] la température de la zone d'émission et T_{surf} [K] la température de surface du corps.

Pour simplifier, nous admettons que les zones d'émission sont l'atmosphère et le sol.

Une surface inclinée d'un angle β est représentée figure 2-14.

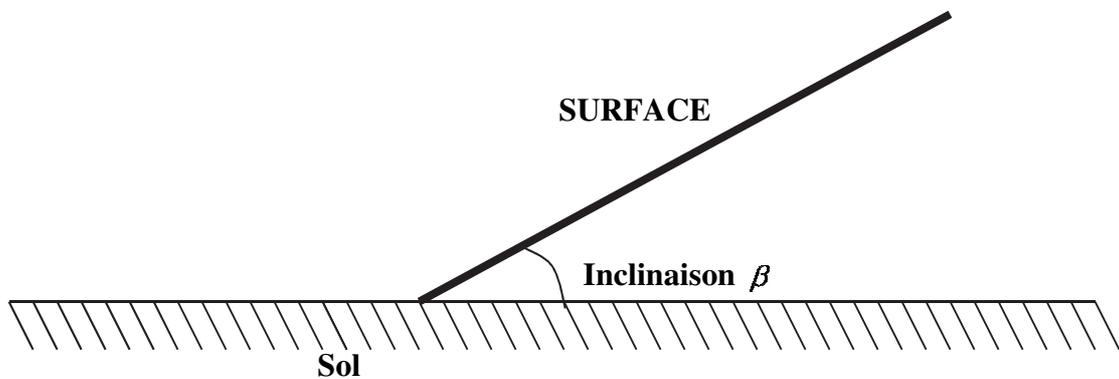


Figure 2-14 Inclinaison d'une surface par rapport au sol

On a ainsi :

$$\begin{cases} F_{sol,surf} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \\ F_{atm,surf} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \end{cases} \quad (2-83)$$

Pour une paroi verticale, les facteurs de forme ont pour valeur :

$$\begin{cases} F_{sol,surf} = 0,5 \\ F_{ciel,surf} = 0,5 \end{cases} \quad (2-84)$$

L'émissivité est de 1 pour un corps noir et <1 pour un corps gris. Il dépend de la nature du matériau.

Cependant, il est nécessaire de déterminer le coefficient d'émission équivalent entre le sol et la surface du matériau afin de tenir compte des multi réflexions éventuelles :

$$\varepsilon_{sol,surf} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{sol}} + \frac{1}{\varepsilon_{surf}} - 1} \quad (2-85)$$

Usuellement, les températures d'émission de sol et atmosphérique sont prises à la température ambiante ou décalées d'une constante. Si cette hypothèse est valable pour le sol, ce n'est pas le cas pour l'atmosphère. Est ainsi introduite la température de ciel. Plusieurs modèles permettent de l'évaluer (cf. Annexe A)

Au final, le développement de la relation (2-86) permet d'introduire la notion de coefficient d'échange radiatif :

$$q_{rad} = h_{rad,sol}(T_a - T_{surf}) + h_{rad,ciel}(T_{ciel} - T_{surf}) \quad (2-86)$$

avec :

$$\begin{cases} h_{rad,sol} = 0,5\varepsilon_{sol,surf}\sigma(T_a^2 + T_{surf}^2)(T_a + T_{surf}) \\ h_{rad,ciel} = 0,5\varepsilon_{surf}\sigma(T_{ciel}^2 + T_{surf}^2)(T_{ciel} + T_{surf}) \end{cases} \quad (2-87)$$

2.7.2. *La convection thermique surfacique*

Dans un fluide, il est pratiquement impossible d'assister à de la conduction pure car le moindre gradient de température entraîne des courants de convection.

La convection est associée au déplacement d'un fluide liquide ou gazeux. On distingue deux types de convection thermique :

- la convection naturelle qui se produit au sein d'un fluide soumis à un gradient de température. Le fluide le plus chaud, moins dense, a ainsi un mouvement ascendant alors que le fluide le plus froid, plus dense a tendance à descendre. C'est le principe de l'effet d'Archimède ou effet cheminée.
- la convection forcée qui se produit lorsque le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure. Dans le bâtiment, ce mouvement est initié par le vent ou un système de ventilation.

La convection est un phénomène complexe couplant la thermique à la dynamique des fluides. La modélisation qui leur est associée s'appuie sur un formalisme semi-empirique basé sur un système de corrélations.

Lorsqu'on s'intéresse à la quantité de chaleur échangée entre la paroi et le fluide, on introduit un coefficient d'échange de convection naturelle h_{conv} [$W.m^{-2}.K^{-1}$] qui traduit la proportionnalité de la densité de flux de chaleur reçue au gradient de température :

$$q_{conv} = h_{conv}(T_{\infty} - T_{surf}) \quad (2-88)$$

T_{∞} [K] représente la température du fluide loin de la paroi.

Ce coefficient d'échange dépend de plusieurs paramètres :

- des températures du fluide et de la surface de la paroi
- de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent)
- des propriétés du fluide (viscosité, coefficient de dilatation thermique, densité)
- de la géométrie locale de surface (aspect granuleux ou lisse)
- de la géométrie globale (évacuation de l'air facilitée)

Dans le cadre de notre application au bâtiment, l'hypothèse de plaque plane est réalisée pour modéliser les surfaces externes de la paroi poreuse. Le fluide considéré est l'air ambiant.

2.7.2.1. Convection naturelle

La convection naturelle est difficile à caractériser en raison de sa complexité. Les parutions scientifiques à ce sujet sont très variées notamment dans leur domaine de validité. Bien que l'aspect qualitatif de description du phénomène soit relativement clair, la quantification du phénomène reste un point de discussion. Lorsqu'on a une plaque dont la température est plus froide que celle de l'air ambiant, le mouvement naturel du fluide proche de la paroi supérieure tend à être poussé vers celle-ci sous l'effet des différences de masse volumiques des fluides chauds ou froids. A l'inverse, si la plaque est chaude, le fluide proche de la surface supérieure tend à s'élever spontanément alors que sur la surface inférieure, il doit longer la surface avant de pouvoir s'élever et dégager l'espace pour être remplacé par un fluide plus frais.

Pour une inclinaison rigoureusement nulle (plaque horizontale), le problème relève de la convection de Rayleigh avec des solutions radicalement différentes si l'on considère le dessus ou le dessous de la plaque chauffée.

Ce régime bifurque vers un régime de type couche limite de convection naturelle le long de plaques planes dès que l'on incline un peu la paroi (quelques degrés seulement).

Pour une inclinaison nulle on a, aux faibles écarts de température ou de nombre de Rayleigh, développement de couches limites depuis les bords de la plaque vers son centre avec formation d'un panache vertical au-dessus, et régime conductif au-dessous, avec éventuellement effets de bord créant une couche limite alimentée depuis la partie centrale et s'échappant vers les bords.

Dès que l'inclinaison change, cette « symétrie centrale » est rompue. L'écoulement suit alors les lignes de plus grande pente de la plaque, sans jamais décoller, jusqu'au point le plus haut ou se forme alors le panache. L'interruption du développement de la couche limite par les composantes normales des forces d'Archimède perturbent l'écoulement et le rendent ainsi tridimensionnel. La couche limite plus faible et les mouvements transverses du fluide permettent de conforter cette hypothèse d'accroissement des échanges (figure 2-15) [Incropera 2007].

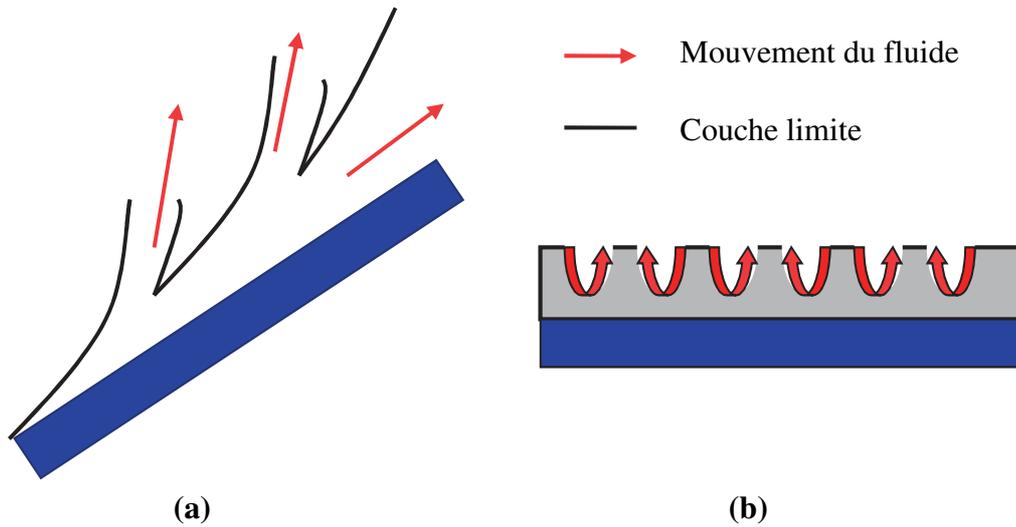


Figure 2-15 Représentation de l'évolution de la couche limite en vue de côté (a) et en vue de face (b) en plaque inclinée

En plaque plane verticale, la figure 2-16 représente l'évolution de la couche limite en fonction du régime d'écoulement.

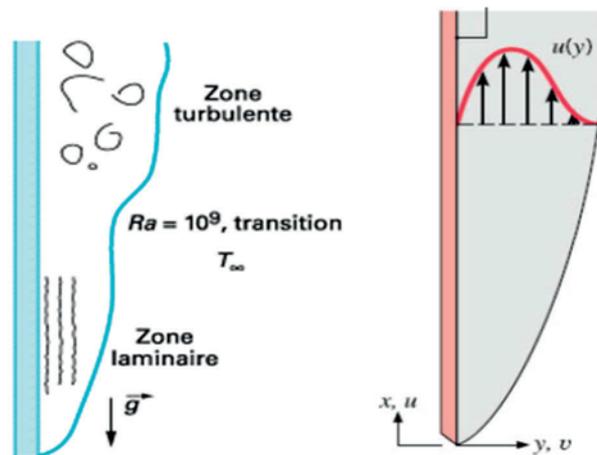


Figure 2-16 Evolution de la couche limite en plaque plane verticale ²³

La nature du régime d'écoulement est caractérisée par le nombre de Rayleigh Ra dont la définition est rappelée par la relation (2-89).

²³ [Padet 2005]

$$Ra_L = \frac{g\beta^*|T_{surf} - T_a|L^3}{a\nu} \quad (2-89)$$

g [$m.s^{-2}$] est la constante gravitationnelle ($9,81 m.s^{-2}$), β^* [K^{-1}] le coefficient de dilatation thermique, L [m] la longueur caractéristique, a [$m^2.s^{-1}$] la diffusivité de l'air et ν [$m^2.s^{-1}$] la viscosité cinématique de l'air.

On a :

$$\beta^* = \frac{1}{\bar{T}} \quad (2-90)$$

La diffusivité thermique a [$m^2.s^{-1}$] a pour expression :

$$a = \frac{\lambda_a}{\rho_a c_a} \quad (2-91)$$

avec λ_a [$W.m^{-1}.K^{-1}$] la conductivité thermique de l'air.

Les propriétés physiques de l'air sont déterminées à la température de film :

$$\bar{T} = \frac{T_a + T_{surf}}{2} \quad (2-92)$$

Toutefois, elles peuvent raisonnablement être choisies constantes puisque la gamme de température que nous serons amenés à rencontrer est relativement restreinte et ne génère que de très faibles variations sur les propriétés de l'air.

Ainsi,

$$\begin{cases} \lambda_a = 0,0257 W.m^{-1}.K^{-1} \\ a = 2,22.10^{-5} m^2.s^{-1} \\ \nu = 1,57.10^{-5} m^2.s^{-1} \end{cases} \quad (2-93)$$

Le nombre de Nusselt représente le rapport entre le transfert thermique total et le transfert par conduction et ainsi caractérise le transfert convectif. Il dépend du régime d'écoulement. On utilise les corrélations de Mac Adams communément admise [Padet 2005]. Les températures de surface de la paroi sont admises uniformes. Le tableau 2-4 synthétise ces corrélations.

Régime laminaire	Régime turbulent
$Ra \leq 10^9$	$Ra > 10^9$
$Nu_L = 0,59(Nu_L)^{\frac{1}{4}}$	$Nu_L = 0,13(Nu_L)^{\frac{1}{3}}$

Tableau 2-4 Corrélations de convection de naturelle en fonction de la nature du régime

Le coefficient de convection naturelle se déduit alors de la relation :

$$h_{conv,naturelle} = \frac{Nu_L \lambda_a}{L} \quad (2-94)$$

2.7.2.2. Convection forcée

Les corrélations retenues pour caractériser la convection forcée sont largement reprises dans la littérature. Nous nous appuyerons ainsi sur le travail de synthèse de Padet. Le régime d'écoulement est défini à partir de la donnée du nombre de Reynolds qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Il est fonction de vitesse de l'air extérieur v [m.s⁻¹]. Sa détermination est présentée en annexe A.

L'expression des corrélations dépend du régime d'écoulement caractérisé par le nombre de Reynolds :

$$Re_L = \frac{vL}{\nu} \quad (2-95)$$

Typiquement, pour une plaque plane horizontale dans des conditions standards d'écoulement, la transition laminaire/turbulent s'effectue autour de $Re_c = 5 \cdot 10^5$.

Néanmoins, il faut tenir compte des conditions particulières de paroi et de la convection naturelle qui vient renforcer le caractère turbulent de l'écoulement. Ainsi, selon Clear et Gartland [Clear et Gartland 2003], il convient de prendre $Re_c = 10^3$.

Le tableau 2-5 synthétise les corrélations communément admises.

Régime laminaire	Régime turbulent
$Re \leq 10^3$	$Re > 10^3$
$Nu_L = 0,332(Re_L)^{\frac{1}{2}}(Pr)^{\frac{1}{3}}$	$Nu_L = 0,035(Re_L)^{\frac{4}{5}}(Pr)^{\frac{1}{3}}$

Tableau 2-5 *Corrélations en convection forcée en fonction du régime d'écoulement*

Le nombre de Prandtl Pr représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement (ou viscosité cinématique) ν et la diffusivité thermique a .

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (2-96)$$

Dans ces conditions, le coefficient de convection forcée s'exprime :

$$h_{conv,forcée} = \frac{Nu_L \lambda_a}{L} \quad (2-97)$$

2.7.2.3. Convection mixte

Convection naturelle et forcée sont rarement dissociables dans le cadre de la physique du bâtiment. On parle alors de convection mixte. Il existe un certain nombre de corrélations qui tentent de modéliser ce phénomène.

L'expression souvent utilisée pour décrire le phénomène convection mixte est :

$$h_{conv,mixte} = 5,7 + 3,8v \quad (2-98)$$

Ceci dit, cette corrélation, basée sur les travaux de Mac Adams soulève un certain nombre de problèmes. En effet, selon les travaux de Palyvos [Palyvos 2008], elle inclue non seulement les transferts convectifs mais également radiatifs. De plus, elle est construite à partir de valeurs expérimentales relevées sur une plaque carrée verticale de 0,5 m de côté avec circulation d'air parallèle à la plaque.

A titre informatif, on peut également citer la corrélation de Wattmuff de forme linéaire similaire tout aussi critiquable :

$$h_{conv,mixte} = 2,8 + 3v \quad (2-99)$$

Il en existe également beaucoup d'autres qui se cantonnent quant à elles à certaines configurations bien définies. De plus, ces corrélations ne sont valables qu'en conditions extérieures.

Certaines recherches tentent d'associer les deux dans de mêmes corrélations comme le rapporte [Padet 2005] mais font malheureusement défaut dans certains régimes d'écoulement en plaque inclinée.

Repris par de nombreux auteurs, un moyen possible de combiner les deux régimes de convection est de faire la racine nième de la somme des contributions naturelle et convective. Généralement, l'ordre 3 est utilisé et on écrit :

$$Nu_L = \sqrt[3]{|\pm Nu_{naturelle}^3 \pm Nu_{forcée}^3|} \quad (2-100)$$

Le signe à l'intérieur de la racine est fonction de l'orientation de la convection forcée par rapport à la convection naturelle. On parle alors de convection assistée (signe +) ou de convection contrariée (signe -).

Dans les conditions réelles, on peut être amené à rencontrer 4 situations différentes qui sont schématisés figure 2-17.

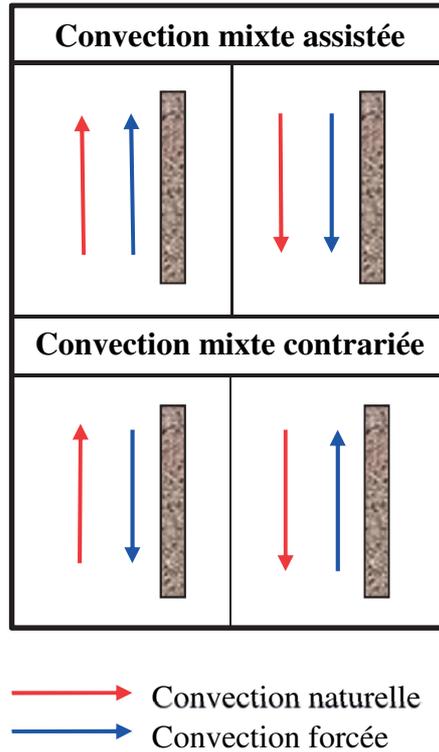


Figure 2-17 Schéma de principe de convection mixte assistée ou contrariée

En outre, un coefficient de rugosité R_f est parfois utilisé pour tenir compte de l'état de surface du milieu. A titre d'exemple, il est pris égal à 1 pour une surface lisse comme le verre et >1 pour les surfaces rugueuses (1,52 pour le béton, 1,67 pour la brique). Il vient alors :

$$Nu_{L,mixte} = R_f Nu_L \quad (2-101)$$

Au final, la densité de flux en convection mixte s'écrit :

$$q_{conv,mixte} = h_{conv,mixte} (T_a - T_{surf}) \quad (2-102)$$

avec :

$$h_{conv,mixte} = \frac{Nu_{L,mixte} \lambda_a}{L} \quad (2-103)$$

2.7.3. La convection massique surfacique

Au phénomène de convection thermique vient se superposer le phénomène de convection de masse dû à l'écoulement d'air humide. L'expression de l'équilibre entre le milieu et la couche d'air à son contact est complexe car elle nécessite une bonne connaissance des caractéristiques de l'écoulement notamment la manière dont se développent les couches limites dynamique, thermique et hydrique à la surface d'échange.

Par analogie à la convection thermique, la densité de flux à l'interface air/milieu au niveau des surfaces externes du matériau poreux g_{conv} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] s'écrit :

$$g_{conv} = \beta_{conv}(p_{v,a} - p_{v,surf}) \quad (2-104)$$

$p_{v,a}$ [Pa] est la pression partielle de vapeur de l'air ambiant et $p_{v,surf}$ [Pa] la pression partielle de vapeur de surface et β_{conv} [$\text{kg}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] le coefficient d'échange surfacique de masse.

Le coefficient d'échange surfacique β_{conv} se déduit de la relation de Lewis :

$$\beta_{conv} = \frac{h_{conv}}{\rho_a c_a \frac{R}{M_a} T_a} Le^{-\frac{3}{4}} \quad (2-105)$$

Le nombre de Lewis Le est défini comme le rapport de la diffusivité thermique a [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$] à la diffusivité de vapeur dans l'air D_a [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$] :

$$Le = \frac{a}{D_a} \approx 0,85 \quad (2-106)$$

2.7.4. *L'advection de vapeur par circulation d'air humide*

Les mouvements d'air provenant des ambiances peuvent provoquer un apport d'humidité au milieu poreux. Cet apport de matière intervient à la fois dans les échanges de chaleur et de masse. On considère un flux d'air entrant. L'expression des densités de flux associées est similaire à celle développée précédemment à l'intérieur du milieu poreux.

Ainsi, la densité de flux de masse advectif due à la circulation d'air humide $g_{v,adv}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] reçue par le matériau poreux s'écrit :

$$g_{v,adv} = \frac{0,622}{p_{atm}} \rho_a v (p_{v,a} - p_{v,surf}) \quad (2-107)$$

La densité de flux de chaleur advectif due à la circulation d'air humide q_{adv} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] reçue par le matériau poreux regroupe s'écrit :

$$q_{adv} = c_a \rho_a v (T_a - T_{surf}) + c_v \rho_a r v (T_a - T_{surf}) \quad (2-108)$$

2.7.5. *Le changement de phase de surface*

L'eau est susceptible de changer d'état au niveau de la surface de la paroi. Le flux associé q_{lat} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] a pour expression :

$$q_{lat} = l_v g_{conv,total} \quad (2-109)$$

$g_{conv,total}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] désigne le flux de masse total convecté.

2.7.6. *La diffusion d'eau liquide*

De l'eau liquide peut devenir source d'apport d'humidité en surface de paroi. C'est le cas lorsqu'il pleut par exemple. Cette source d'humidité est introduite directement en terme de densité de flux liquide reçu $g_{l,diff}$ [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$] :

$$g_{l,diff} = g_{l,ext} \quad (2-110)$$

Ce flux d'eau liquide génère également un flux thermique $q_{l,diff}$ [W.m^{-2}] :

$$q_{l,diff} = c_l g_{l,diff} (T_a - T_{surf}) \quad (2-111)$$

2.7.7. *Bilan des échanges ambiance/milieu*

Le flux de masse total entrant convectif $g_{conv,tot}$ [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$] échangé entre l'ambiance extérieure et la paroi poreuse a pour expression :

$$g_{conv,tot} = g_{conv} + g_{v,adv} \quad (2-112)$$

Le flux de masse total entrant g_{tot} [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$] s'écrit alors comme la somme des flux diffusif et convectif :

$$g_{tot} = g_{conv,tot} + g_{l,diff} \quad (2-113)$$

Le flux de chaleur entrant total q_{tot} [W.m^{-2}] échangé entre l'ambiance extérieure et la paroi poreuse a pour expression :

$$q_{tot} = q_{rad} + q_{conv,mixte} + q_{adv} + q_{lat} + q_{l,diff} \quad (2-114)$$

Le développement de ces expressions nous permet d'écrire les flux de chaleur et de masse reçus par la surface de la paroi poreuse en fonction des potentiels de calcul.

BILAN

Echanges ambiance/milieu poreux

- **Transfert de masse** : convection massique, convection de vapeur par circulation d'air et diffusion d'eau liquide

Flux surfacique de masse total entrant :

$$g_{tot} = \beta_{conv} [p_{sat}(T_a)\varphi_a - p_{sat}(T_{surf})\varphi_{surf}] + \frac{0,622}{p_{atm}} \rho_a v [p_{sat}(T_a)\varphi_a - p_{sat}(T_{surf})\varphi_{surf}] + g_{l,diff}$$

- **Transfert de chaleur** : rayonnement (réfléchi de sol, direct et diffus solaire, convection thermique mixte (naturelle et forcée), convection de vapeur par circulation d'air, changement d'état en surface et diffusion d'eau liquide

Flux surfacique de chaleur total entrant :

$$q_{tot} = h_{rad,sol}(T_a - T_{surf}) + h_{rad,ciel}(T_{ciel} - T_{surf}) + h_{conv,mixte}(T_a - T_{surf}) + \rho_a(c_a + r c_v)v(T_a - T_{surf}) + c_l g_{l,diff}(T_a - T_{surf}) + l_v [\beta_{conv} [p_{sat}(T_a)\varphi_a - p_{sat}(T_{surf})\varphi_{surf}]] + l_v \left[\frac{0,622}{p_{atm}} \rho_a v [p_{sat}(T_a)\varphi_a - p_{sat}(T_{surf})\varphi_{surf}] \right] + \alpha I_N$$

2.8. Traitement numérique

2.8.1. Implémentation numérique

On se place à l'échelle de la paroi. Le matériau poreux constitutif de la paroi est supposé homogène et isotrope. Les effets de gravité, de drainage et de stratification de la température sont négligés. Sous ces hypothèses, on adopte une modélisation 1D.

Les conditions d'ambiance de température, d'humidité et de pression sont supposées uniformes. Numériquement, il existe deux manières de modéliser les échanges hygrothermiques de surface :

- On écrit l'égalité entre les valeurs d'ambiance de température, d'humidité et de pression et les potentiels de surface. On parle alors de conditions de 1^{ère} espèce ou conditions de Dirichlet.

$$\begin{cases} T_{amb} = T_{surf} \\ \varphi_{amb} = \varphi_{surf} \\ p_{t,amb} = p_{t,surf} \end{cases} \quad (2-115)$$

- On écrit l'égalité des flux de chaleur et de masse au niveau des surfaces. On parle de conditions de 3^{ème} espèce ou conditions de Neumann qui présentent l'avantage par rapport aux conditions de Dirichlet de prendre en compte les échanges de surface.

2.8.2. Résolution numérique

La résolution du modèle global HAM est réalisée numériquement à l'aide d'un logiciel de calcul. Au cours de ces travaux de thèse, deux logiciels ont été utilisés :

- Comsol Multiphysics®
- Matlab®

2.8.2.1. Comsol Multiphysics

COMSOL Multiphysics (FEMLAB) est un logiciel de résolution de modèles différentiels (modèles PDE Partial Differential Equations) multiphysique (généricité, couplage mécaniques des fluides, électromagnétisme, mécaniques des structures, thermique) par éléments finis. Il permet l'interaction entre différentes physiques [Ferret 2011]. Il est capable de traiter des problèmes 1D, 2D ou 3D et nécessite peu de programmation directe. Son interface graphique accessible facilite son utilisation.

L'implémentation du modèle HAM est rendue facile sous Comsol puisqu'il suffit d'entrer les expressions des coefficients établis précédemment, la forme des équations et l'algorithme de résolution étant prédéfinis. Les processus de maillage, de choix d'algorithme ou encore de valeur de convergence sont toutefois laissés à la liberté de l'utilisateur.

2.8.2.2. Matlab

Matlab est un environnement de programmation pour le développement d'algorithmes, l'analyse des données, leur visualisation et le calcul numérique.

L'implémentation du modèle HAM est plus longue et plus compliquée à réaliser sous Matlab que sous Comsol.

Le système d'équations précédemment établi est discrétisé par une méthode des différences finies qui utilise un schéma implicite centré d'ordre 1. La paroi est discrétisée en N nœuds. Ainsi, i désigne le numéro de nœud et n l'instant de calcul. On note δx et δt respectivement les pas d'espace et de temps.

Dans le cadre du traitement numérique choisi, les équations sont réécrites sous la forme :

$$\begin{aligned} a_i^{n+1}T_{i-1}^{n+1} + b_i^{n+1}T_i^{n+1} + c_i^{n+1}T_{i+1}^{n+1} + d_i^{n+1}\varphi_{i-1}^{n+1} + e_i^{n+1}\varphi_i^{n+1} + f_i^{n+1}\varphi_{i+1}^{n+1} \\ = g_i^nT_i^n + h_i^n\varphi_i^n \end{aligned} \quad (2-116)$$

$a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i$ et h_i sont des coefficients algébriques.

A l'instant $n+1$, φ_i^{n+1} et T_i^{n+1} , $i \in \llbracket 1; N \rrbracket$, sont les inconnues.

Le système d'équations obtenu est fortement non linéaire.

La résolution du problème s'effectue de manière matricielle par la résolution du système linéaire :

$$AX = B \quad (2-117)$$

Ce qui conduit à :

$$X = B.A^{-1} \quad (2-118)$$

A est la matrice des coefficients, X le vecteur des inconnues et B le vecteur des coefficients inertiels.

Sous Matlab, on écrit :

$$X = A \setminus B \quad (2-119)$$

La commande Matlab « \ » (backslash) est la commande générique pour résoudre un système linéaire. L'algorithme mis en œuvre dépend de la structure de la matrice A du système. Matlab utilise dans l'ordre les méthodes suivantes :

- si A est une matrice triangulaire, le système est résolu par simple substitution.
- si la matrice A est symétrique ou hermitienne, définie positive, la résolution est effectuée par la méthode de Choleski.

- si A est une matrice carrée mais n'entrant pas dans les deux cas précédents, une factorisation LU est réalisée en utilisant la méthode d'élimination de Gauss avec stratégie de pivot partiel.
- si A n'est pas une matrice carrée, la méthode QR est utilisée.

Les critères de convergence vers une solution numérique en température et humidité relative sont définis par :

$$\frac{|T_i^{n+1,m+1} - T_i^{n+1,m}|}{T_i^{n+1,m}} \leq \tau_T \quad (2-120)$$

$$\frac{|\varphi_i^{n+1,m+1} - \varphi_i^{n+1,m}|}{\varphi_i^{n+1,m}} \leq \tau_\varphi \quad (2-121)$$

Le schéma algorithmique de la figure 2-18 explicite le processus global de résolution.

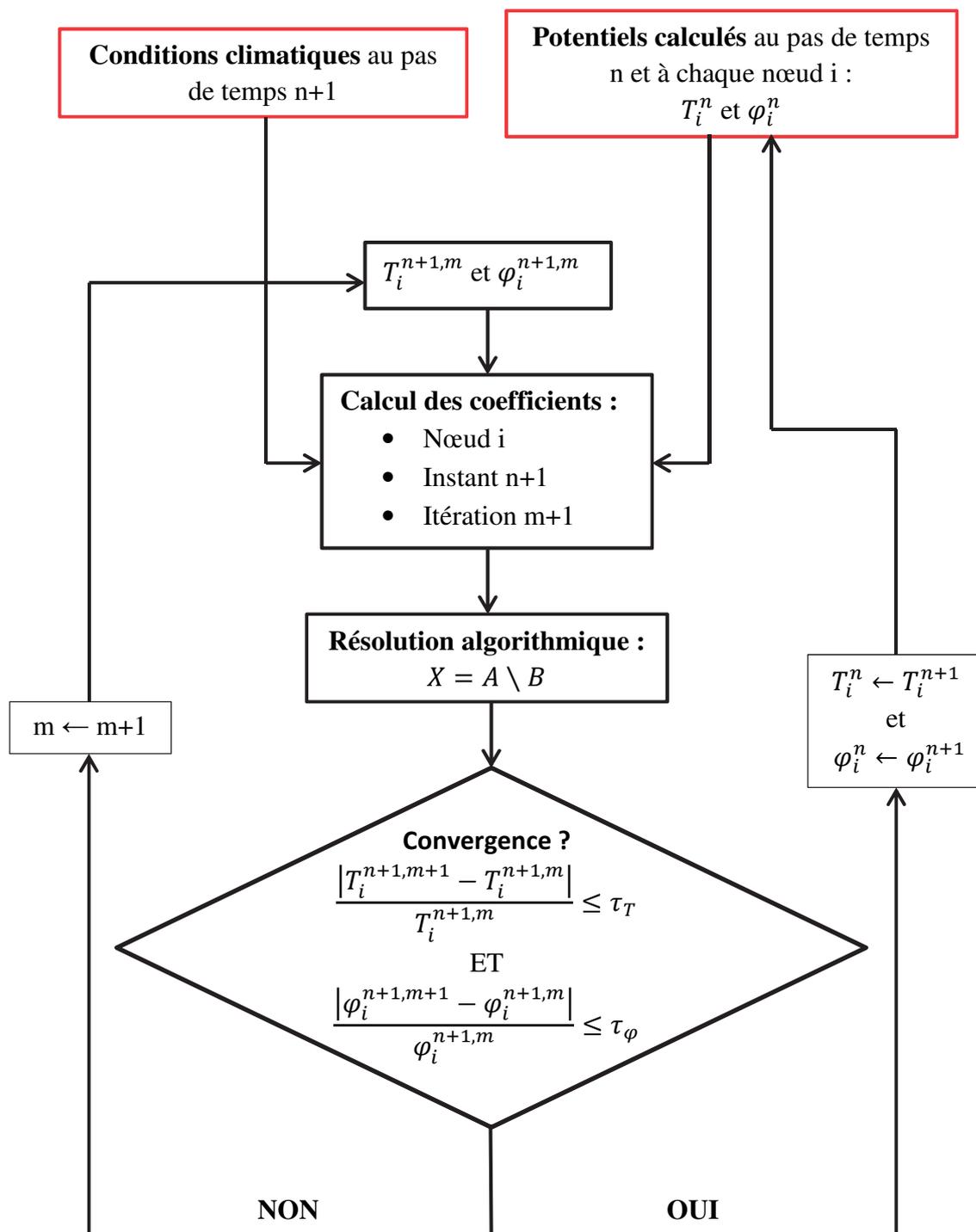


Figure 2-18 Algorithme de résolution des transferts hydrothermiques

En ce qui concerne les conditions aux limites, les conditions de Dirichlet sont facilement programmables, ce qui n'est pas le cas des conditions de Neumann qui nécessitent un traitement numérique particulier.

Le traitement numérique effectué dans les diverses configurations susceptibles d'être rencontrées dans une application en physique du bâtiment (monocouche, conditions aux limites sur les surfaces externes et multicouches) est développé en détail en Annexe B.

2.8.2.3. *Comparaison et synthèse*

Dans la perspective d'implémentation de notre modèle numérique, l'utilisation du logiciel Comsol Multiphysics présente de nombreux avantages par rapport à Matlab :

- facilité d'utilisation
- rapidité
- systémativité

Cependant, son aspect « boîte noire » est un frein majeur au développement poussé de la modélisation. L'utilisateur ne peut pas intervenir à l'intérieur du processus de résolution. De plus, il est compliqué d'effectuer des opérations logiques (boucles « for », « while »...) du moins dans la version 3.5. qui a été utilisée dans le cadre de cette thèse. Dans la perspective de modélisation du comportement thermohydrrique du béton de chanvre en particulier de son caractère hystérétique, ces limitations sont rédhibitoires. Matlab offre davantage de liberté de programmation et est ainsi plus adapté à notre étude. Ceci dit, il est théoriquement possible d'utiliser l'interactivité de ces deux logiciels. En effet, Comsol dispose d'une interface avec Matlab. Dans une démarche de « recherche », le recours à ce couplage numérique apparaît inutile à notre échelle d'étude du comportement de matériau. L'utilisation seule de Matlab est amplement satisfaisante. Néanmoins, à terme, une fois la modélisation fiable et le comportement de matériau clairement identifié, la rapidité et la systémativité dans l'utilisation de Comsol est très avantageuse. L'utilisation de Comsol (ou de tout autre logiciel de CFD Computational Fluid Dynamics) peut également s'avérer utile dans la détermination des échanges de surface où le caractère 3D des écoulements régis par la dynamique des fluides est très complexe.

2.9. Validation numérique

Le modèle complet développé aux paragraphes précédents est comparé à d'autres modèles existants au travers de cinq cas tests issus d'un benchmark international HAMSTAD WP2 [Hagentoft 2004].

Les exercices HAMSTAD comprennent cinq cas d'analyse numérique pour l'évaluation de la qualité des modèles de simulation unidimensionnels de transfert de chaleur, d'air et d'humidité HAM. Dans un cas, l'exercice 2, la solution analytique est connue. Dans les quatre autres, des solutions consensuelles ont été trouvées, avec une bonne entente entre les différents modèles HAM. Le travail HAMSTAD d'origine a été entrepris en tant que partie du projet initié par l'Union Européenne pour la standardisation des méthodes de calcul HAM (HAMSTAD WP2). Il était suggéré que les exercices soient utilisés comme références dans l'évaluation des progiciels nouveaux et existants.

Les fichiers d'entrée et les résultats pour chaque exercice sont disponibles publiquement. Chaque fichier contient des dossiers dans lesquels sont précisées les propriétés des matériaux et les conditions aux limites.

Les participants principaux au benchmark sont :

- l'Université Catholique de Louvain (Belgique) - KUL -
- l'Université de Technologie Chalmers (Suède) - CTH -
- l'Organisation Néerlandaise de la Recherche du Bâtiment et de la Construction (Pays Bas) - TNO -
- l'Université de Technologie de Dresde (Allemagne) - TUD -
- l'Institut de Technologie Technion (Israël) - Technion -

D'autres participants additionnels proposent également leurs solutions numériques :

- L'Université de Technologie d'Eindhoven (Pays Bas) - TUE -
- Le Conseil National de la Recherche (Canada) - NRC -
- L'Institut de Physique du Bâtiment Fraunhofer (Allemagne) - IBP -

Les cas tests du benchmark couvrent de nombreuses configurations (multicouche, pluie, circulation d'air...) rencontrées dans la physique du bâtiment.

Le travail de comparaison effectué a pour but de valider le modèle et d'attester de sa robustesse et de son exactitude.

Quel que soit le support informatique utilisé, le modèle reste unique. Ainsi, l'ensemble des cas tests est traité avec Comsol Multiphysics. Cependant, le contexte d'étude de la paroi en béton de chanvre nous permet de ne pas aborder tous les cas tests (cf. Chapitre 4). C'est pourquoi, sous Matlab, dans cette optique d'application à une paroi en béton de chanvre, le travail de validation du modèle n'a été effectué que pour les cas les plus représentatifs n°2 et n°5.

2.9.1. Propriétés des matériaux

Quel que soit le cas test étudié, des lois de comportement similaires sont adoptées pour caractériser les propriétés des matériaux considérés. Ce paragraphe les décrit de manière générale.

L'isotherme de sorption utilisée dans le benchmark obéit à une équation de type Van Genuchten :

$$w = w_{sat} \sum_{i=1}^M k_i (1 + (cp_{suc})^n)^{\frac{1-n}{n}} \quad (2-122)$$

Les coefficients sont précisés dans le tableau 2-6.

Symbole	Quantité	Unité
w_{sat}	Teneur en eau de saturation	kg.m^{-3}
k_i	Facteur de pondération	-
N	Nombre de modes de l'équation	-
c	Facteur de calage	-
n	Facteur de calage	-

Tableau 2-6 Paramètres de calcul de la teneur en eau

Il est à noter que le phénomène d'hystérésis n'est pas pris compte. L'isotherme de sorption suit donc le comportement de la courbe d'adsorption.

Les conductivités thermique et liquide ainsi que la perméabilité à la vapeur sont des fonctions de la teneur en eau.

Ainsi, la conductivité thermique a pour expression :

$$\lambda = \lambda_s + (\lambda_0 - \lambda_s) \frac{w_{sat} - w}{w_{sat}} \quad (2-123)$$

λ_s [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] représente la conductivité thermique du matériau saturé et λ_0 [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] la conductivité thermique du matériau sec.

La perméabilité à la vapeur s'exprime par la relation (2-124).

$$\delta_p = \frac{26,1 \cdot 10^6 M_l}{\mu RT} \frac{1 - \frac{w}{w_{sat}}}{(1 - \psi) \left(1 - \frac{w}{w_{sat}}\right)^2 + \psi} \quad (2-124)$$

Symbole	Quantité	Unité
26,1.10 ⁶	Diffusivité vapeur de l'air au repos	m ² .s ⁻¹
μ	Facteur de résistance à la vapeur du matériau	-
ψ	Facteur lié à la structure porale du matériau	-

Tableau 2-7 Paramètres de calcul de la perméabilité à la vapeur

Enfin, la conductivité liquide a pour expression :

$$K_l = \exp \left[\sum_{i=0}^n a_i \left(\frac{w}{\rho_l} \right)^i \right] \quad (2-125)$$

où les a_i sont des facteurs de calage.

Les autres propriétés thermophysiques telles que la densité du matériau à l'état sec, la capacité thermique massique du matériau et la perméabilité à l'air sont précisées pour chaque étude et sont choisies constantes dans chaque étude.

Cependant, on se contente simplement de la description générale de la forme des propriétés. Le lecteur intéressé pourra se référer au rapport HAMSTAD [Hagentoft 2002].

2.9.2. Cas test n°1

Le premier exercice du benchmark s'apparente à l'étude du comportement hygrothermique d'un toit isolé. Il traite de la condensation interne qui a lieu à la surface de contact entre deux matériaux (figure 2-19).

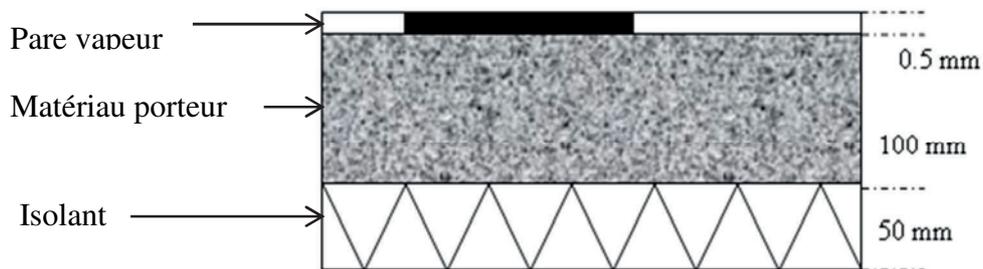


Figure 2-19 Coupe de la toiture - cas test n°1 -

Ces derniers ont des propriétés thermiques et hydriques différentes : l'un est un matériau porteur qui autorise le transfert d'eau liquide en son sein alors que l'autre est un matériau

isolant dont la résistance à un écoulement liquide est infini. En outre, les conductivités thermiques des deux matériaux diffèrent d'un facteur 50 en conditions sèches.

La simulation dure cinq années. Les températures et humidités relatives intérieures et extérieures sont variables en fonction du temps. Cependant, elles sont établies sur une année puis répétées pour les années suivantes (figures 2-20 et 2-21).

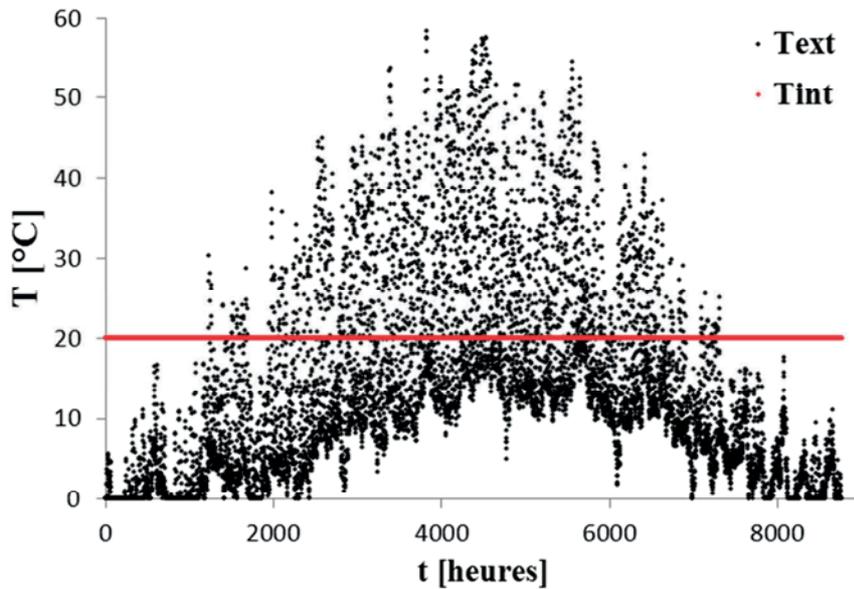


Figure 2-20 Températures extérieure et intérieure

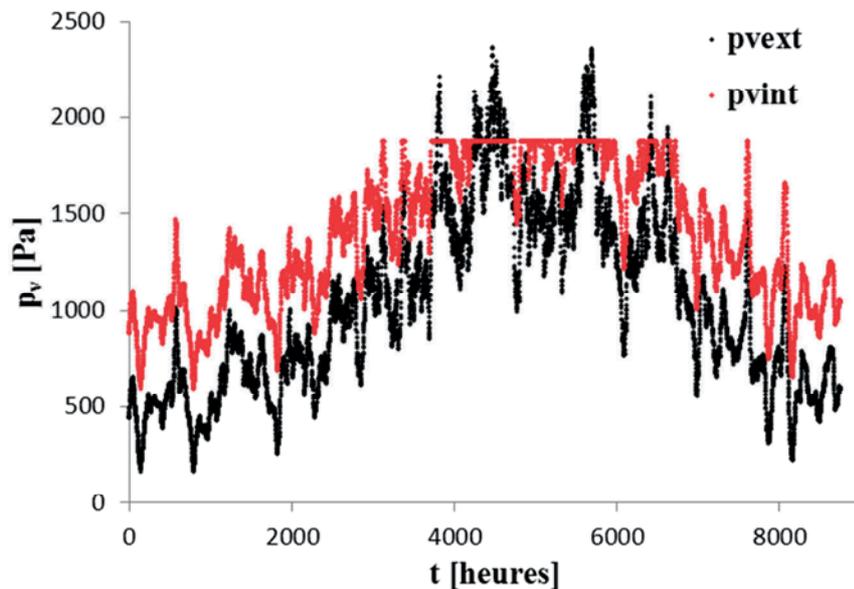


Figure 2-21 Pressions de vapeur extérieure et intérieure

La température initiale est de 10°C, l'humidité relative dans le matériau porteur de 99,24% et dans l'isolant de 59,97%. Les conditions initiales d'humidité différentes représentent la difficulté numérique de cet exercice. Enfin, les échanges surfaciques ambiance/ matériau sont

conditionnés par les coefficients de transfert et de masse : $h_{\text{ext}} = 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $h_{\text{int}} = 7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $\beta_{\text{ext}} = 0 \text{ s.m}^{-1}$ et $\beta_{\text{int}} = 2.10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$.

Les résultats ci-après (figures 2-22, 2-23 et 2-24) sont présentés au terme de la première année et montrent une bonne concordance du modèle développé par rapport aux autres modèles numériques.

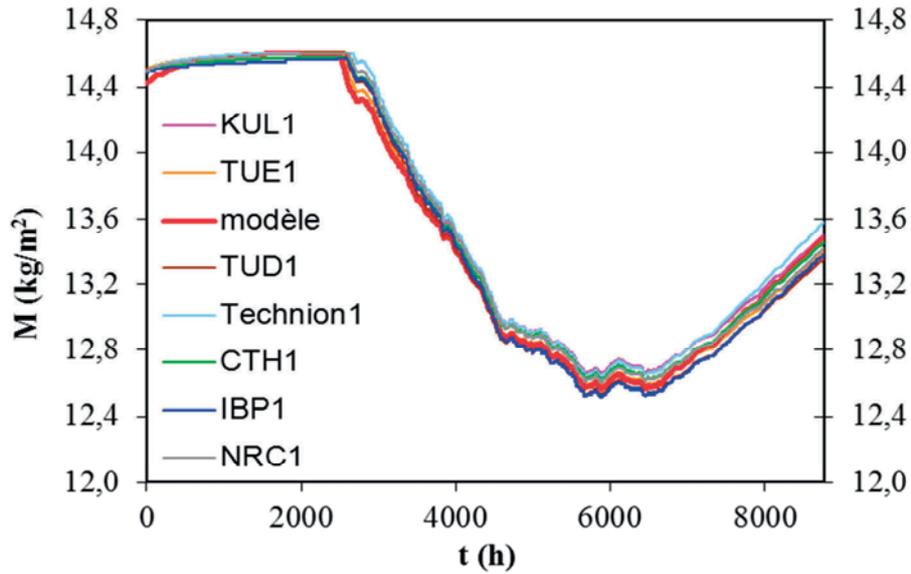


Figure 2-22 Teneur en eau totale intégrée sur l'épaisseur de la couche de matériau portant au terme de la première année

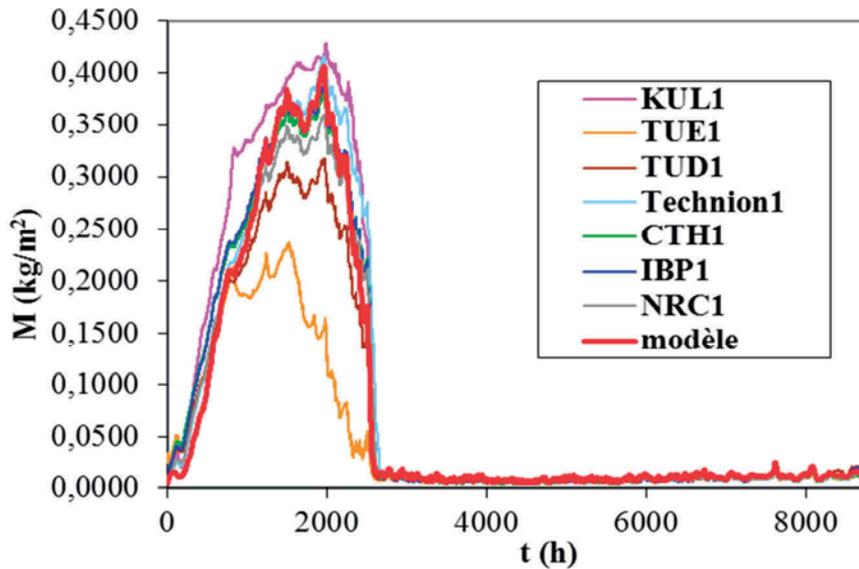


Figure 2-23 Teneur en eau totale intégrée sur l'épaisseur de la couche d'isolant au terme de la première année

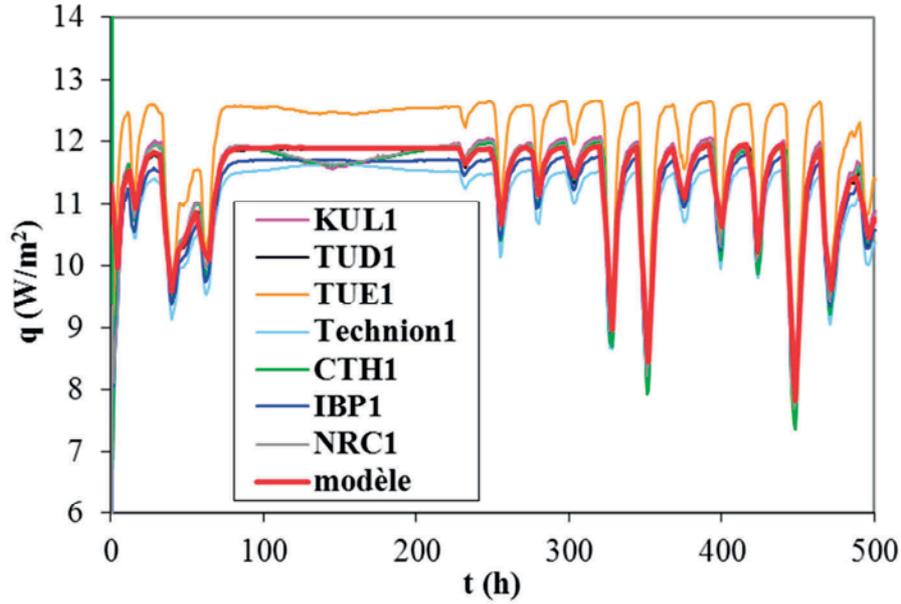


Figure 2-24 Densité de flux de chaleur entrant au terme de 500 heures

2.9.3. Cas test n°2

Ce test numérique consiste à modéliser un mur homogène de 20 cm d'épaisseur sous conditions isothermes ($T = 20^\circ\text{C}$). Initialement, le mur est en équilibre avec les ambiances dont l'humidité relative est égale à 95%. A $t > 0$, les ambiances sont soudainement modifiées : l'ambiance extérieure est fixée à 45% et l'ambiance intérieure est donnée à 65%. En outre, perméabilité à la vapeur, coefficient de diffusion et conductivité thermique sont constants indépendants de la teneur en eau. Les coefficients d'échange de masse et de chaleur donnés valent : $h_{\text{ext}} = h_{\text{int}} = 25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, $\beta_{\text{ext}} = \beta_{\text{int}} = 10^{-3} \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$.

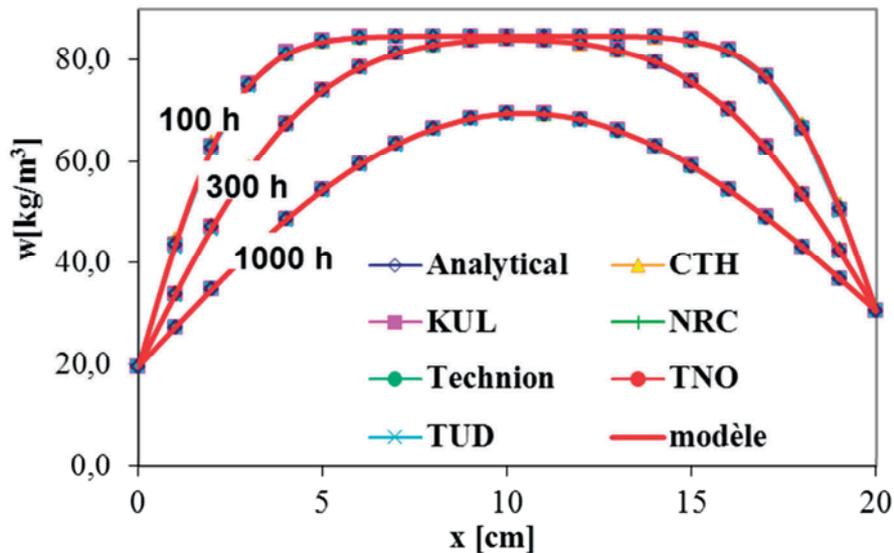


Figure 2-25 Distribution spatiale de la teneur en eau au bout de 100, 300, et 1000 heures

Les résultats présentés figure 2-25 montrent la bonne concordance de notre modèle avec les autres modèles numériques issus du benchmark.

2.9.4. Cas test n°3

Cet exercice traite du transfert d'air à travers une paroi (figure 2-26). Les transferts d'humidité sont essentiellement dus ici au flux d'air traversant la paroi mais également aux gradients de pression partielle de vapeur et de température entre les 2 côtés du mur.

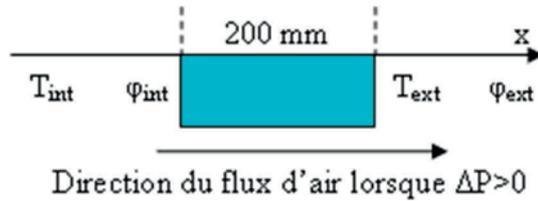


Figure 2-26 Coupe de la paroi - cas test n°2 -

La différence de pression totale entre l'extérieur et l'intérieur est donnée sur la figure 2-27.

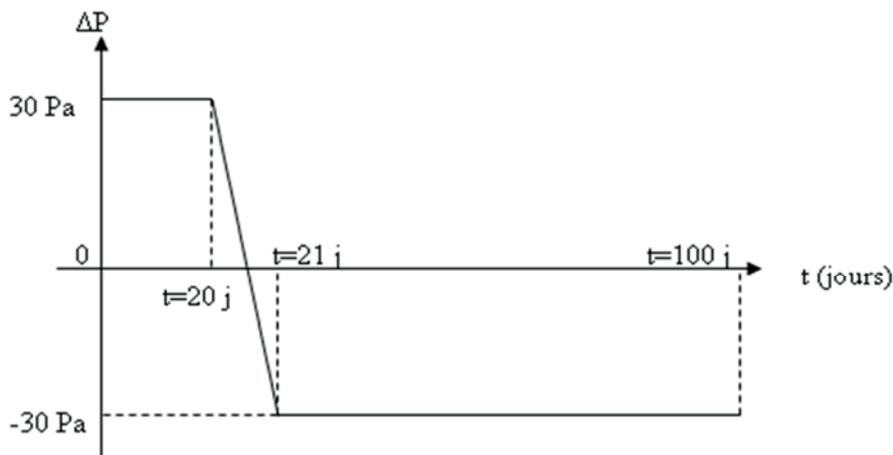


Figure 2-27 Evolution de la différence de pression totale

La durée de la simulation est de 100 jours. La température initiale est de 10°C et l'humidité relative initiale est de 95%. A $t > 0$, la température intérieure est fixée à 20°C , l'humidité relative intérieure à 70%, la température extérieure à 2°C et l'humidité relative extérieure à 80%. Les coefficients de transfert et de masse ont pour valeur : $h_{ext} = h_{int} = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $\beta_{ext} = 7,38.10^{-12} \text{ s.m}^{-1}$ et $\beta_{int} = 2.10^{-7} \text{ s.m}^{-1}$.

La vitesse de l'air préconisée a pour expression :

$$u = C \Delta p_t \quad (2-126)$$

où C représente la perméabilité du matériau à l'air. Cette dernière est choisie constante et a pour valeur $3.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$. Cette valeur de perméabilité à l'air est du même ordre de grandeur que celle de la laine minérale.

Les températures et teneur en eau (figure 2-28 et 2-29) sont présentées pour deux positions différentes $x = 0,05 \text{ m}$ et $x = 0,19 \text{ m}$ à l'intérieur de la paroi au terme des 100 jours.

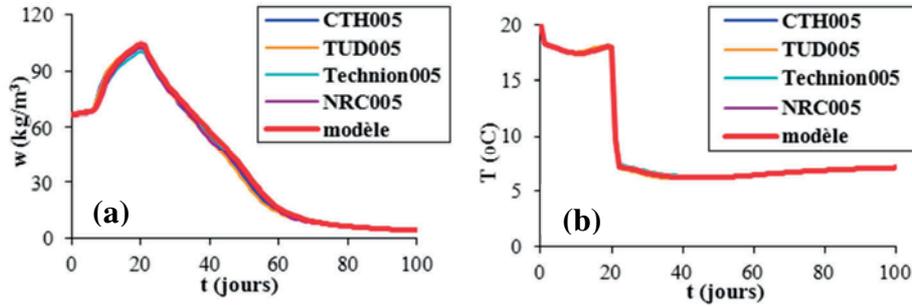


Figure 2-28 Distribution de la teneur en eau (a) et de la température (b) en $x = 0,05 \text{ m}$

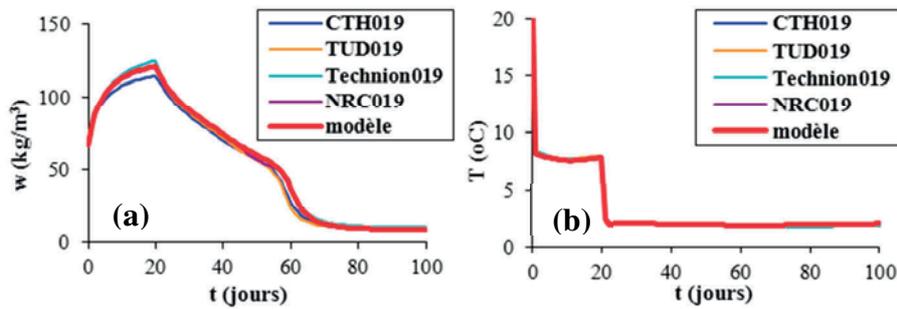


Figure 2-29 Distribution de la teneur en eau (a) et de la température (b) en $x = 0,19 \text{ m}$

On note que les évolutions de la teneur en eau et de la température sont tributaires de l'orientation de l'écoulement d'air à travers la paroi. Le transport de l'humidité par l'écoulement d'air est ici prépondérant. Ce phénomène est bien pris en compte dans la simulation numérique.

2.9.5. Cas test n°4

Dans ce cas test, la paroi est soumise à de fortes variations climatiques. En particulier, la présence d'eau sous forme liquide au niveau de la paroi extérieure susceptible d'être rencontrée notamment en cas de pluie doit être traitée.

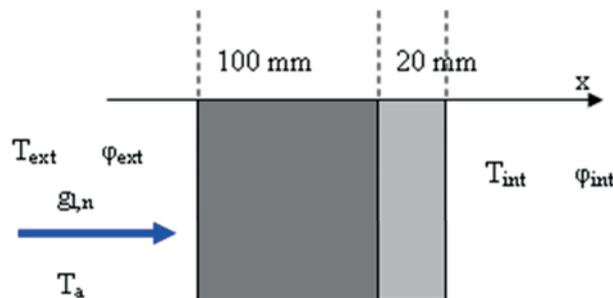


Figure 2-30 Coupe de la paroi - cas test n°4 -

Les teneurs en eau initiales sont fournies. Ainsi, la couche externe a une teneur en eau initiale de $0,4 \text{ kg.m}^{-3}$ et la couche interne de $47,5 \text{ kg.m}^{-3}$.

La durée de la simulation est de 5 jours. La température initiale est de 20°C et l'humidité relative initiale est de 40,99%. Une distinction est faite entre la température de l'air ambiant T_a qui conditionne le flux de chaleur convectif liquide entrant causée par la pluie et la température extérieure T_{ext} qui participe aux échanges thermiques convectif et radiatif de surface. Les conditions d'ambiance varient en fonction du temps. Elles sont données figure 2-31.

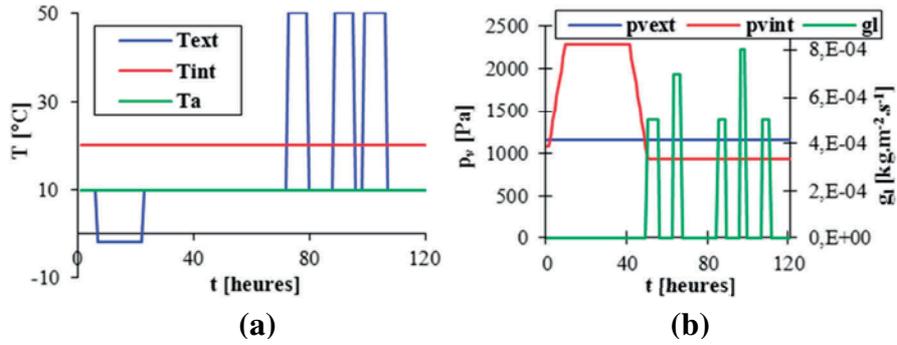


Figure 2-31 Evolution des températures (a), pression de vapeur et flux liquide (b) des ambiances

Les coefficients de transfert et de masse ont pour valeur : $h_{ext} = 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $h_{int} = 8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $\beta_{ext} = 2.10^{-7} \text{ s.m}^{-1}$ et $\beta_{int} = 3.10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$.

Les résultats de la simulation sont présentés ci-après au niveau des surfaces extérieure et intérieure de la paroi (figures 2-32 à 2-36). La présence d'eau sur la surface extérieure entraîne une saturation du matériau qui atteint alors sa teneur en eau de saturation. La figure 2-32 représente les distributions de température et d'humidité relative à travers la paroi au bout de 78 h. Le traitement spécifique de la saturation de surface (pluie) se fait par changement des conditions de 3^{ème} espèce (type Neumann) décrivant le flux liquide entrant aux conditions de 1^{ère} espèce (type Dirichlet) qui imposent une humidité relative de surface égale à 1. L'ensemble des résultats obtenus attestent de la capacité du modèle proposé à gérer les conditions climatiques les plus sévères.

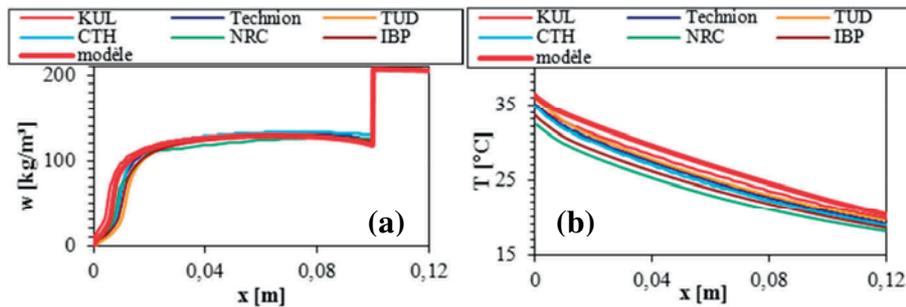


Figure 2-32 Distributions de teneur en eau (a) de température (b) à travers la paroi au bout de 78 h

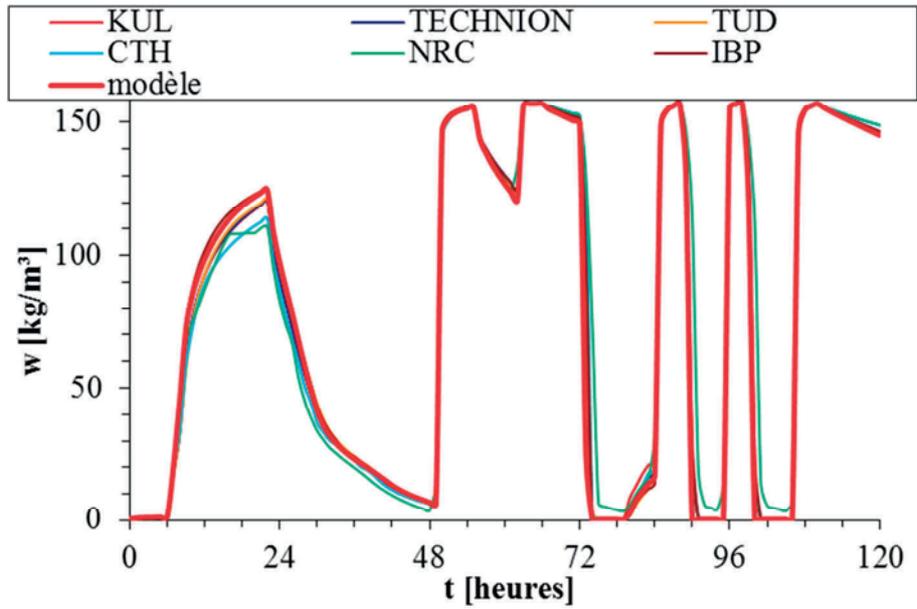


Figure 2-33 Profil de teneur en eau au niveau de la surface extérieure

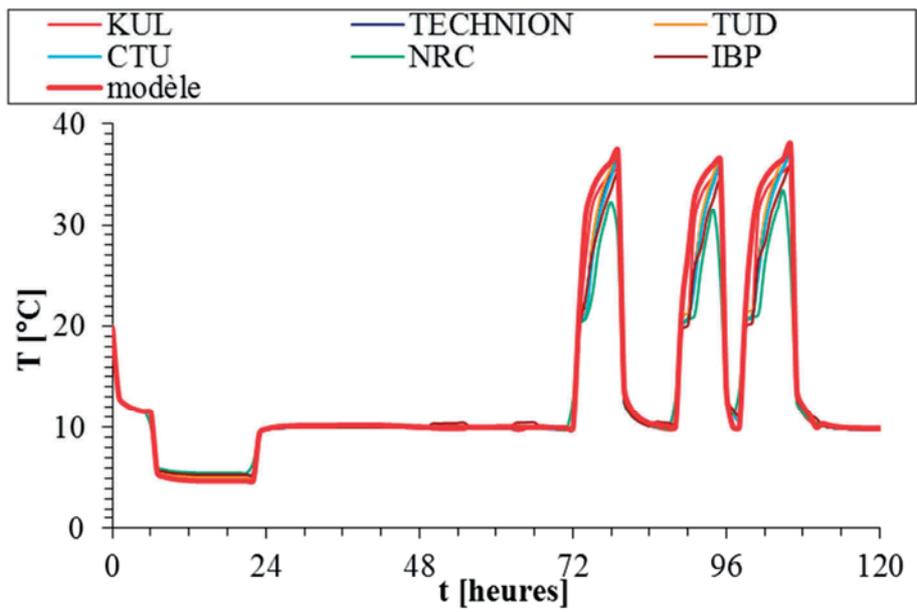


Figure 2-34 Profil de température au niveau de la surface extérieure

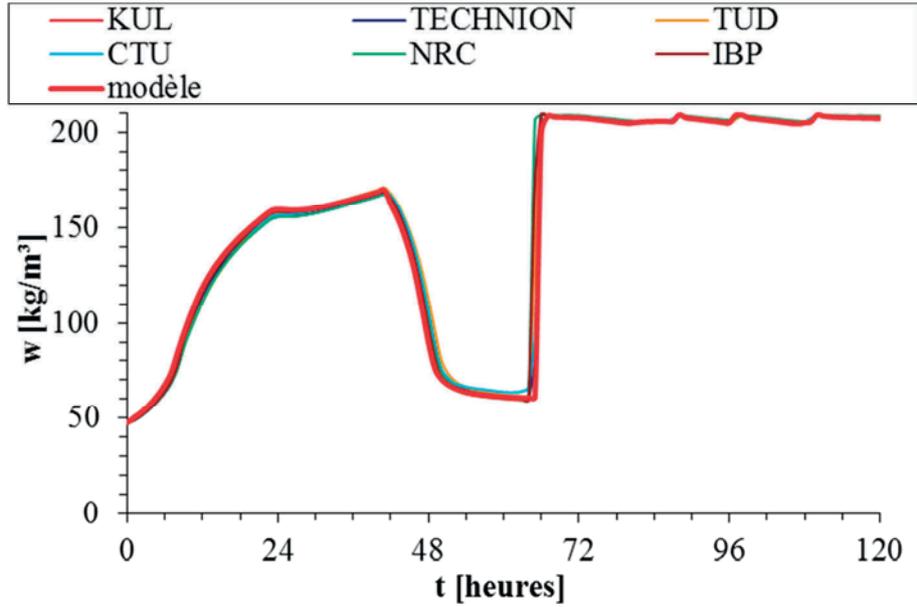


Figure 2-35 Profil de teneur en eau au niveau de la surface intérieure

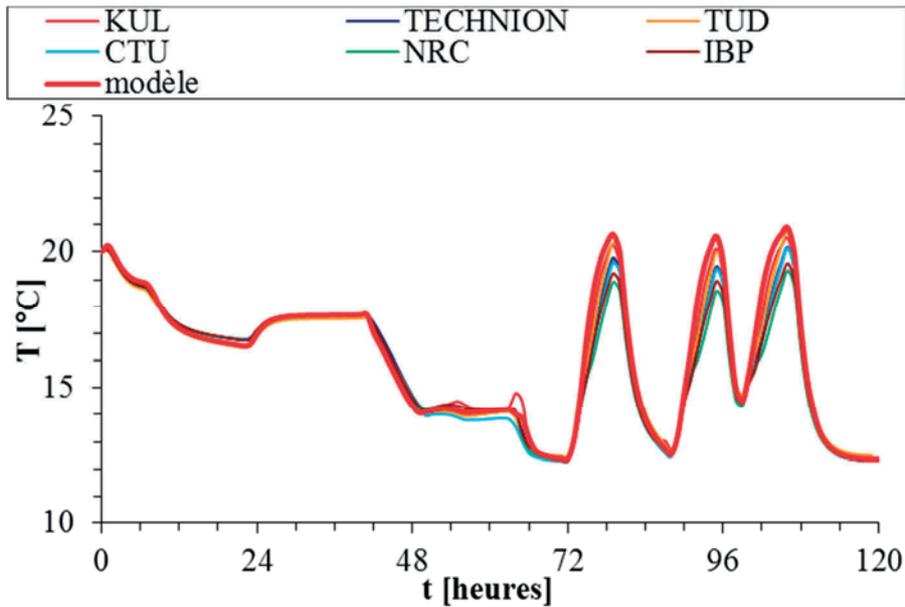


Figure 2-36 Profil de température au niveau de la surface intérieure

2.9.6. Cas test n°5

Le dernier exercice du benchmark (figure 2-37) est relatif au comportement hygrothermique d'une paroi multicouche composée de matériaux aux propriétés différentes.

La durée de la simulation est de 60 jours. La température initiale est de 25°C et l'humidité relative initiale est de 60%. A $t > 0$, la température intérieure est fixée à 20°C, l'humidité relative intérieure à 60%, la température extérieure à 0°C et l'humidité relative extérieure à 80%. Les coefficients de transfert et de masse ont pour valeur : $h_{\text{ext}} = 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $h_{\text{int}} = 8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $\beta_{\text{ext}} = 1,8382.10^{-7} \text{ s.m}^{-1}$ et $\beta_{\text{int}} = 5,8823.10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$.

Les résultats obtenus sur la figure 2-38 sont présentés sur une partie de l'épaisseur de la paroi au terme des 60 jours.

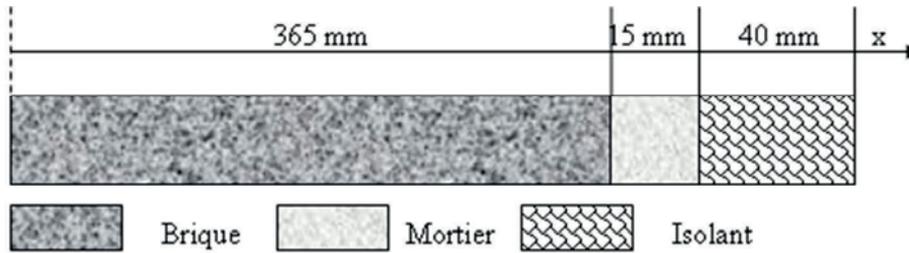


Figure 2-37 Coupe de la paroi - Cas test n°5 -

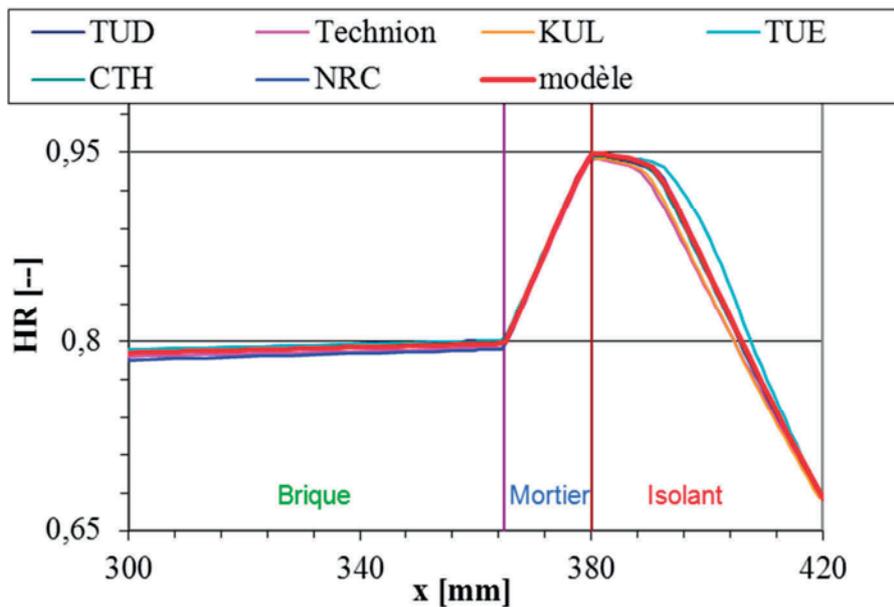


Figure 2-38 Distribution de l'humidité relative à travers la paroi

Le choix de la variable ϕ garantit la continuité de ce potentiel aux interfaces. Dans ce cas test, les propriétés thermohydriques diffèrent fortement d'un matériau à l'autre. Le modèle reproduit correctement les réponses des différents matériaux vis à vis des sollicitations extérieures.

2.10. Conclusion

La bonne concordance obtenue pour l'ensemble des cas tests étudiés montre la pertinence du modèle implémenté et l'efficacité des logiciels de résolution numérique COMSOL Multiphysics et MATLAB. Ainsi, notre modèle reproduit correctement les profils de température et d'humidité pour des parois multicouches soumises à diverses variations climatiques. Cette démarche de validation nous permet ainsi d'envisager sereinement l'utilisation du modèle pour confronter les résultats numériques à ceux mesurés expérimentalement sur une paroi en béton de chanvre.

3

Modélisation des propriétés isothermes du béton de chanvre

Dans un premier temps, ce chapitre s'attache à la description des propriétés du béton de chanvre Easy R. Sa forte porosité lui confère des propriétés hygrothermiques intéressantes évaluées puis modélisées en s'appuyant sur les résultats d'essais effectués au laboratoire à l'échelle du matériau.

Cependant, le béton de chanvre constitutif de la paroi Easy P et le béton de chanvre Easy R caractérisé expérimentalement ne possèdent pas la même masse volumique. Cette différence résulte d'une variation du processus de compactage utilisé pour réaliser les différents blocs et échantillons : le béton de chanvre Easy R apparaît ainsi plus compacté que le béton de chanvre Easy P. L'objectif est donc dans un second temps d'évaluer l'influence du paramètre masse volumique sur les propriétés hygrothermiques du matériau dans la perspective de modélisation du comportement hygrothermique du béton de chanvre Easy P.

SOMMAIRE

<u>3.1.</u>	<u>Introduction</u>	111
<u>3.2.</u>	<u>Propriétés physiques</u>	112
3.2.1.	Masse volumique apparente normative à 23°C/50%HR.....	112
3.2.2.	Masse volumique apparente à l'état sec	112
3.2.3.	Porosité totale et porosité ouverte	114
3.2.4.	Bilan des caractéristiques physiques	116
<u>3.3.</u>	<u>Propriétés thermiques</u>	118
3.3.1.	Conductivité thermique	118
3.3.2.	Capacité thermique massique.....	120
3.3.3.	Bilan des caractéristiques thermiques	122
<u>3.4.</u>	<u>Propriétés hydriques</u>	123
3.4.1.	Isothermes de sorption : points expérimentaux.....	123
3.4.2.	Modélisation de la courbe d'adsorption principale	125
3.4.3.	Perméabilité apparente à la vapeur : valeurs expérimentales.....	128
3.4.4.	Modélisation du transport d'humidité	131
3.4.4.1.	Evaluation expérimentale de la perméabilité apparente à la vapeur	131
3.4.4.2.	Modèle de perméabilité apparente	136
3.4.4.3.	Modèle de Kunzel de séparation des contributions vapeur et liquide.....	137
3.4.4.4.	Comparaison des modèles	139
3.4.4.5.	Diffusion vapeur, liquide et totale.....	142
3.4.5.	Bilan des caractéristiques hydriques	143
<u>3.5.</u>	<u>Influence de la masse volumique</u>	145
3.5.1.	Porosité et teneur en eau.....	145
3.5.2.	Teneur en eau et courbe d'adsorption principale	146
3.5.2.1.	Processus et résultats expérimentaux	147
3.5.2.2.	Analyse.....	149
3.5.3.	Transport d'humidité.....	155
3.5.4.	Propriétés thermiques	158
3.5.4.1.	Conductivité thermique	158
3.5.4.2.	Capacité thermique massique.....	161
3.5.5.	Bilan de l'étude	161
<u>3.6.</u>	<u>Conclusion</u>	163

3.1. Introduction

L'étude expérimentale des caractéristiques physiques, thermiques et hydriques est réalisée à partir de la série d'échantillons notée Easy R (R pour référence). Les procédés de détermination de ces propriétés sont rappelés brièvement dans cette étude. Ces procédés et les résultats expérimentaux obtenus sont expliqués en détails dans plusieurs publications de membres du laboratoire ([Collet 2004], [Collet 2008], [Chamoin 2008], [rapport PRIR « ecomatx » 2010], [rapport ANR « bétonchanvre » 2010], [Collet 2011]).

La caractérisation expérimentale du béton de chanvre Easy R présentée dans ce chapitre provient des travaux de Chamoin [Chamoin 2013].

Une démarche critique et comparative qui s'appuie sur l'analyse physique du comportement du béton de chanvre est adoptée pour aboutir à la modélisation de ses propriétés hygrothermiques.

Cependant, le béton de chanvre constitutif de la paroi Easy P et le béton de chanvre Easy R étudié ne possèdent pas la même volumique. En outre, la friabilité du béton de chanvre Easy P interdit toute tentative de caractérisation expérimentale. Dès lors la question se pose : comment relier les propriétés de bétons de chanvre de masses volumiques apparentes différentes ?

Les propriétés hygrothermiques du béton de chanvre Easy P sont ainsi évaluées à partir d'arguments physiques reposant sur les travaux de la littérature et des données expérimentales complémentaires. Leurs déterminations s'appuient sur la connaissance des propriétés du béton de chanvre Easy R qui fait office de référence.

3.2. Propriétés physiques

3.2.1. Masse volumique apparente normative à 23°C/50%HR

La masse volumique apparente est définie comme le rapport de la masse totale sur le volume de l'échantillon. A la différence de la masse volumique réelle, la masse volumique apparente rend compte des « vides » à l'intérieur du matériau.

L'ensemble des blocs fournis par la société Easychanvre, moulés dans les alvéoles de dimension 30×30×16 cm³ ont été conditionnés dans une salle de stockage dont l'ambiance est régulée à 23°C et 50%HR. La stabilisation des blocs à cette ambiance a été d'environ 100 jours. Au terme de cette stabilisation, l'ensemble des échantillons a été pesé à l'aide d'une balance Sartorius LP 8200S et mesuré avec un réglelet de précision 0,5 mm. Ce processus a permis d'en déduire la masse volumique apparente à 23°C/50%HR (cf. figure 3-1).

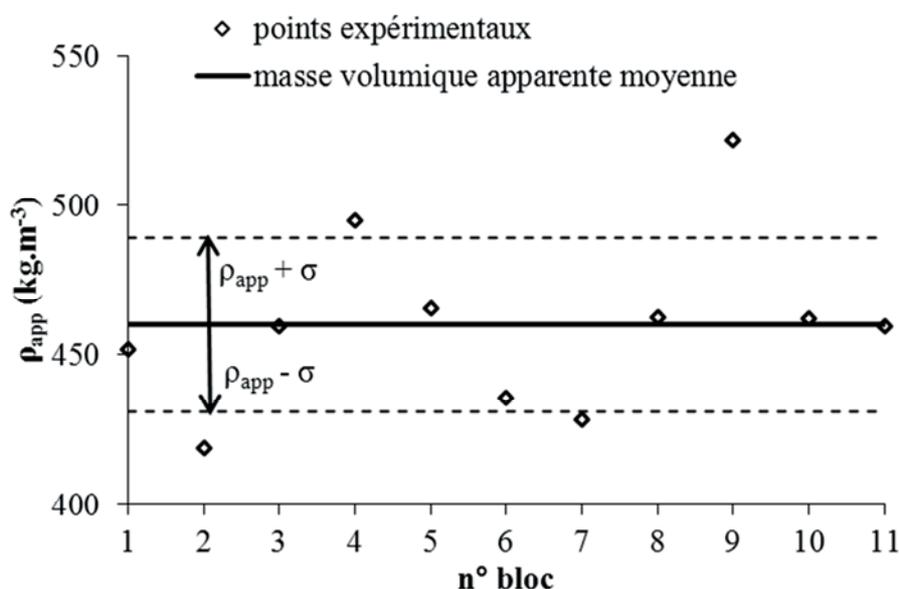


Figure 3-1 Masse volumique apparente à 23°C/50%HR

La masse volumique apparente normative moyenne de ce béton de chanvre est ainsi évaluée à :

$$\rho_{app} = 460 \pm 29 \text{ kg.m}^{-3}$$

L'écart-type de **29 kg.m⁻³** montre une certaine dispersion des résultats qui témoigne ainsi de la faible reproductibilité des blocs.

3.2.2. Masse volumique apparente à l'état sec

Dans la perspective d'une implémentation numérique, la masse volumique apparente déterminée sous les conditions normatives à 23°C et 50% HR n'est pas une information utile. Il est plus intéressant de déterminer la masse volumique apparente à l'état sec, c'est-à-dire à 0%HR. Pour l'évaluer, l'étape initiale consiste d'abord à sécher les échantillons. Ainsi, les

échantillons sont placés dans une enceinte hermétiquement close dans laquelle est placée du gel de silice (figure 3-2). Ce gel possède la propriété d'absorber l'humidité ambiante. Parallèlement, le vide est réalisé dans un dessiccateur à vide (figure 3-2) dans lequel le gel de silice est placé. Ce processus permet d'imposer une humidité relative proche de 2-3%.



Figure 3-2 Photographies de gel de silice à gauche et d'un dessiccateur à vide à droite

Les masses volumiques apparentes à l'état sec ont été ainsi évaluées pour une gamme de 7 échantillons de dimension $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ dont la masse volumique apparente à $23^\circ\text{C}/50\%\text{HR}$ est proche de la valeur moyenne évaluée précédemment à $460 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Leurs dimensions sont établies à l'aide d'un pied à coulisse de précision 10^{-2} mm et une balance Sartorius BP301S de précision 10^{-4} g est utilisée pour les pesées. Conformément à la norme NF EN 12570, les mesures de volume sont réalisées à 1% près et les mesures de masse à 0,1% près. Les résultats sont présentés figure 3-3.

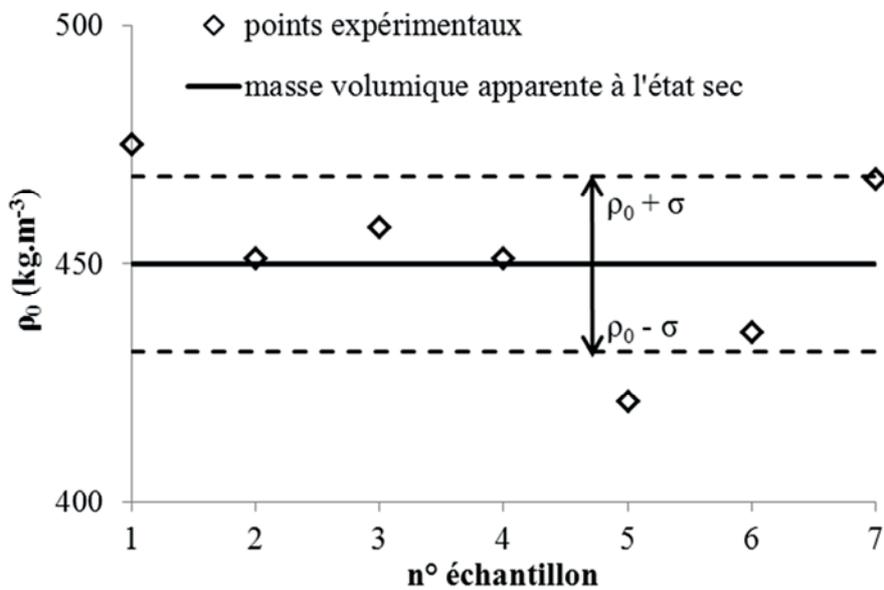


Figure 3-3 Masse volumique apparente à l'état sec

La masse volumique apparente à l'état sec de ce béton de chanvre est ainsi évaluée à :

$$\rho_0 = 450 \pm 20 \text{ kg.m}^{-3}$$

L'écart-type de 20 kg.m^{-3} montre ici aussi une certaine dispersion des résultats.

3.2.3. Porosité totale et porosité ouverte

La porosité désigne l'ensemble des interstices (connectés ou non) d'un matériau susceptible d'accueillir des fluides qu'ils soient liquides ou gazeux.

Le béton de chanvre possède une structure porale très importante composée de pores de tailles différentes (micropores, mésopores et macropores) comme le montre la figure 3-4.

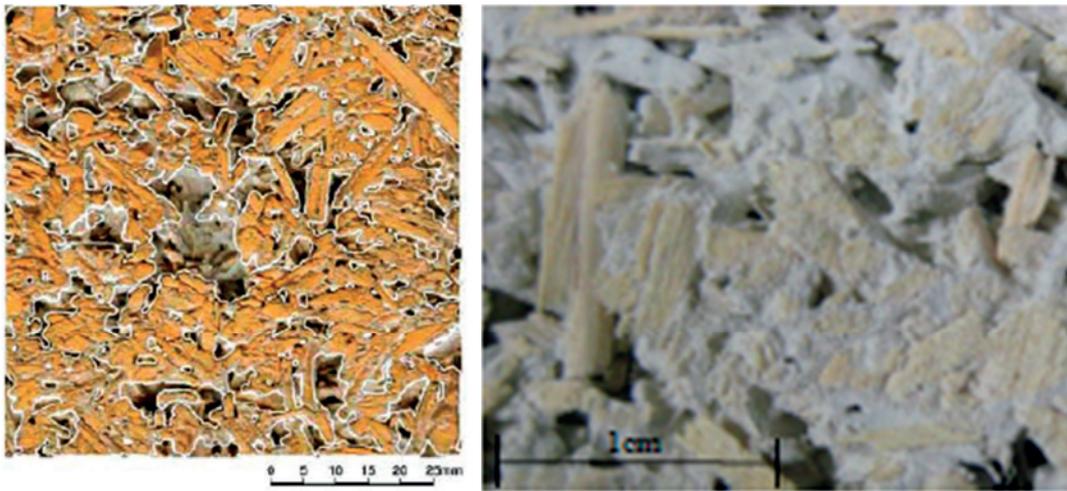


Figure 3-4 Photographies d'analyse de porosité²⁴ et état de surface du béton de chanvre

La porosité du béton de chanvre a une influence déterminante sur ses caractéristiques physiques. Elle conditionne son comportement hygrothermique dans la mesure où elle permet la migration et le stockage de l'humidité. Les performances mécaniques de ce matériau comme la résistance à la traction/compression ou les propriétés acoustiques sont également liées à la porosité. Il existe plusieurs manières de caractériser la porosité. Dans ce travail, on en utilise deux : la porosité totale et la porosité ouverte.

La porosité totale se définit comme le rapport entre le volume des vides V_v et le volume total V_t :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (3-1)$$

²⁴ [Evrard 2008]

Elle permet d'en déduire la teneur en eau maximale u_{max} [kg/kg] :

$$u_{max} = n \frac{\rho_l}{\rho_0} \quad (3-2)$$

où ρ_l désigne la masse volumique de l'eau.

Généralement, la détermination expérimentale de la porosité totale est réalisée à l'aide d'un porosimètre à mercure ou par la méthode pycnométrique. Ces procédés sont détaillés dans [Collet 2004]. La valeur de porosité totale déterminée par Chamoin est de 72,5%. Il convient de rester prudent sur les résultats obtenus à partir de ces méthodes expérimentales notamment en raison de la méthode de broyage employée et du niveau de pression utilisés qui conditionnent l'accessibilité aux pores occlus. Ceci dit, afin de limiter les incertitudes expérimentales liées à ces méthodes, la porosité totale est calculée à partir de la relation (3-3).

$$n = \frac{\rho_{réelle} - \rho_0}{\rho_{réelle}} \quad (3-3)$$

Nous obtenons ainsi :

$$n = 78,6 \%$$

$$u_{max} = 174,6 \%$$

Par ailleurs, la porosité ouverte est définie comme le rapport entre le volume des pores ouverts et le volume total :

$$n_o = \frac{V_{p,o}}{V_t} \quad (3-4)$$

La porosité ouverte est établie expérimentalement par saturation en eau et est obtenue par la relation :

$$n_o = \frac{m_{sat,air} - m_0}{m_{sat,air} - m_{sat,eau}} \quad (3-5)$$

m_0 désigne la masse du matériau sec, $m_{sat,air}$ la masse du matériau saturé dans l'air et $m_{sat,eau}$ la masse du volume d'eau déplacé lorsque l'échantillon est immergé.

Ces mesures expérimentales permettent également de déterminer la teneur en eau à saturation :

$$u_{sat} = \frac{m_{sat,air} - m_0}{m_0} \quad (3-6)$$

Cependant, les pores les plus gros se vidangent rapidement dès la sortie de l'eau et la valeur de $m_{sat,air}$ obtenue est donc inférieure à la masse réelle à saturation. Cette erreur se reporte également dans le calcul de la porosité ouverte mais est bien moins impactante sur sa valeur.

Nous admettons donc comme référence la valeur de la porosité ouverte expérimentale obtenue par la relation (3-5).

Les relevés des pesées hydrostatiques et de saturation dans l'air fournissent ainsi la valeur de la porosité ouverte :

$$n_0 = 67,6 \%$$

L'évaluation de la teneur en eau à saturation est jugée sous-estimée par la procédure expérimentale, c'est pourquoi on la déduit de la relation :

$$u_{sat} = \frac{\rho_l}{\rho_0} n_0 \quad (3-7)$$

On obtient ainsi :

$$u_{sat} = 150 \%$$

La porosité totale (et donc la teneur en eau maximale) n'est pas une donnée utile à l'étude du comportement hydrique du matériau. Elle contient en effet la part de pores fermés ou non accessibles qui ne participent pas aux phénomènes de transfert et de stockage hydrique. A contrario, la porosité ouverte (et donc la teneur en eau à saturation) est davantage exploitable car elle renseigne sur le volume d'air du matériau accessible à l'eau.

Par ailleurs, ces valeurs de porosité du béton de chanvre sont bien plus élevées que celles des matériaux classiques de construction comme le béton cellulaire.

De plus, le béton de chanvre offre un réseau poral très développé et connecté puisque la porosité est majoritairement ouverte. Les pores sont donc largement connectés et participent ainsi aux transferts d'humidité à travers le matériau.

3.2.4. Bilan des caractéristiques physiques

L'ensemble des caractéristiques physiques obtenues précédemment permettant de caractériser le matériau et de déterminer les propriétés hygrothermiques du béton de chanvre Easy R est résumé dans le tableau 3-1.

BILAN	
Caractéristiques physiques Easy R	
Quantité	Valeur
Masse volumique apparente à l'état sec ρ_0	450 kg.m⁻³
Porosité totale n	78,6 %
Porosité ouverte n_0	67,6 %
Teneur en eau maximale u_{\max}	174,6 %
Teneur en eau à saturation u_{sat}	150 %

Tableau 3-1 Bilan des caractéristiques physiques Easy R

3.3. Propriétés thermiques

3.3.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) est une grandeur qui caractérise la capacité isolante thermique d'un matériau. Elle est une caractéristique intrinsèque du matériau et sa valeur ne dépend pas de la surface de la paroi. De faibles conductivités thermiques assurent un meilleur pouvoir isolant aux matériaux.

Les méthodes utilisées au laboratoire sont celles de la plaque chaude en régime permanent [Hladik 1990], de la sonde fil [Hladik 1990] et de l'anneau chauffant [Cull 1974] en régime transitoire. Une série d'échantillons de formulations diverses ont ainsi été étudiés. La figure 3-5 représente les valeurs de conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente pour des essais normatifs à 23°C et 50%HR.

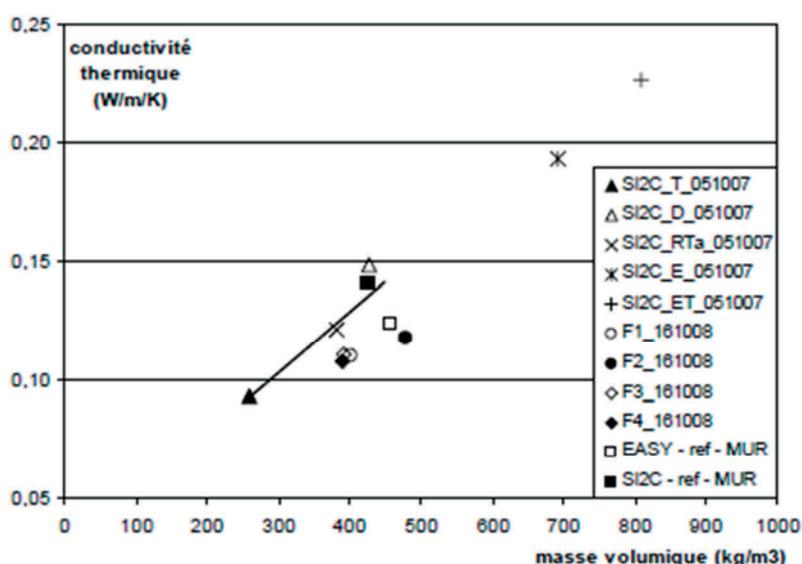


Figure 3-5 Conductivités thermiques de différentes formulations à 23°C et 50%HR²⁵

Sur cette figure est notamment représentée la valeur de la conductivité thermique du béton de chanvre Easy R (EASY - ref - MUR) qui est évaluée sous ces conditions à $0,12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Par ailleurs, la mesure de la conductivité thermique du béton de chanvre a également été réalisée dans d'autres travaux ([Collet 2004], [Cerezo 2005], [Evrard 2008]) et les conductivités thermiques obtenues pour des valeurs équivalentes de masse volumique sont cohérentes entre elles.

Cependant, pour le béton de chanvre Easy R, la démarche expérimentale n'a été menée que partiellement, uniquement pour l'essai normatif à 23°C et 50%HR. En effet, la conductivité thermique est sensible à l'humidité : plus la teneur en eau dans le matériau est élevée, plus la conductivité thermique augmente ce qui affaiblit son pouvoir isolant. Afin de rendre compte

²⁵ [Pretot 2009]

de ce phénomène montré non négligeable dans [Evrard 2008] (cf. figure 3-6), les résultats issus des travaux [Collet 2004], [Cerezo 2005] et [Evrard 2008] sont analysés.

A l'état sec, Evrard montre que les conductivités thermiques varient de 0,109 à 0,121 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour des masses volumiques de béton de chanvre sec variant de 460 et 500 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Les valeurs obtenues par Evrard sont relativement proches de celles collectées par Cerezo qui obtient des valeurs comprises entre 0,09 et 0,16 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour des masses volumiques sèches comprises entre 400 et 700 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Enfin, Collet trouve une conductivité thermique de 0,11 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour un béton de chanvre de masse volumique sèche voisine de 400 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Par ailleurs, selon Cerezo, pour les masses volumiques intermédiaires (autour de 450 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), la conductivité augmente de 10 % passant de 0,1 à 0,11 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ entre 0 et 50 %HR. Elle atteint 0,13 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour une humidité relative de 75 %. Pour une humidité de 80%, Collet trouve une valeur de 0,12 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour un béton de chanvre de masse volumique apparente de 412 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. L'influence de l'humidité relative sur la conductivité thermique est étudiée de manière précise par Evrard (cf. figure 3-6). En outre, la masse volumique du béton de chanvre étudié par Evrard (« LHM wall ») est relativement proche de celle du béton de chanvre Easy R étudié dans ce travail. En toute rigueur, ces valeurs ne sont comparables que si la composition des bétons de chanvre est identique, ce qui n'est pas le cas. On peut toutefois exploiter les tendances d'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique pour construire une modélisation.

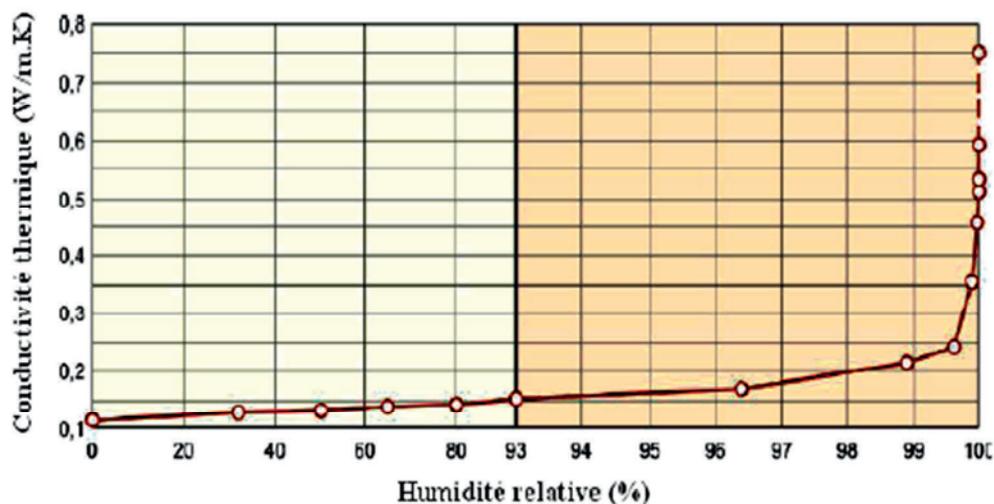


Figure 3-6 Influence de l'humidité relative sur la conductivité thermique du béton de chanvre²⁶

Afin de modéliser correctement la conductivité thermique du béton de chanvre Easy R, l'essai normatif réalisé au laboratoire à 23°C et 50%HR fournissant une valeur de 0,12 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ est choisi comme référence. Cette valeur est assez proche de celle obtenue par Evrard pour des masses volumiques apparentes relativement proches par ailleurs.

²⁶ [Evrard 2008] pour un béton de chanvre de type « LHM wall » de masse volumique 440 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

La dépendance de la conductivité thermique à la teneur en eau peut se traduire par la relation décrite par l'équation (3-8) :

$$\lambda = \lambda_s + (\lambda_0 - \lambda_s) \frac{w_{sat} - w}{w_{sat}} \quad (3-8)$$

λ_0 et λ_s désignent respectivement les conductivités thermiques du matériau à l'état sec et à l'état saturé.

Les valeurs choisies sont très proches de celles proposées par Evrard pour une température de 23°C et permettent d'obtenir la conductivité thermique évaluée au laboratoire en conditions normatives de 0,12 W.m⁻¹.K⁻¹ pour le béton de chanvre Easy R :

$$\lambda_0 = 0,117 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\lambda_s = 0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

On peut noter que λ_s correspond à la conductivité thermique de l'eau liquide à 20°C.

Exprimée en fonction de l'humidité relative, la figure 3-7 représente l'évolution de la conductivité thermique :

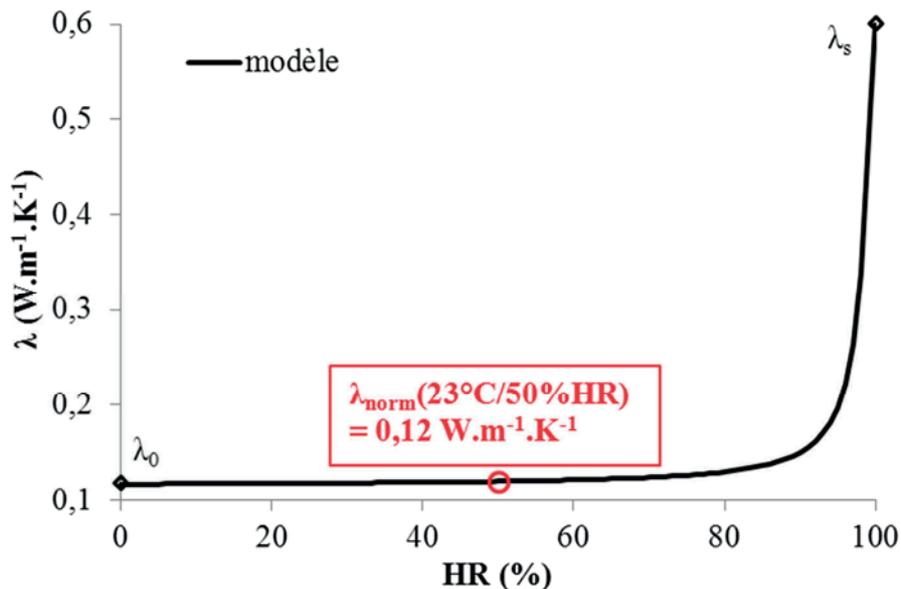


Figure 3-7 Evolution de la conductivité thermique en fonction de l'humidité relative en utilisant la courbe d'adsorption principale pour exprimer w en fonction de HR

Hormis aux très fortes humidités où le matériau perd de son pouvoir isolant, la conductivité thermique du béton de chanvre reste relativement faible autour de la valeur normative.

3.3.2. Capacité thermique massique

La capacité thermique massique quantifie la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur. Elle peut être mesurée expérimentalement en utilisant un appareil de type ATD (Analyse ThermoDifférentielle) ou DSC (Differential Scanning Calorimetry) qui relie le flux

de chaleur échangé aux gradients de températures. Aucune mesure n'a été réalisée au laboratoire pour déterminer la capacité thermique expérimentale du béton de chanvre Easy R. Toutefois, des mesures expérimentales de la capacité thermique massique du béton de chanvre dans des conditions hygrométriques variables ont été réalisées dans [Collet 2004] et [Evrard 2008]. A l'état sec, selon Evrard, la capacité thermique massique du béton de chanvre est de l'ordre de $1560 \pm 30 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ alors que selon Collet elle est évaluée à $1000 \pm 120 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Les écarts entre les résultats de Collet et Evrard sont toutefois assez importants bien que les bétons de chanvre étudiés soient de nature relativement proches en termes de masse volumique à l'état sec (autour de 400 kg.m^{-3} et 440 kg.m^{-3} respectivement). Il semble ainsi difficile de juger a priori de l'exactitude d'une valeur par rapport à l'autre.

Cependant, il a été montré au chapitre précédent que la capacité thermique massique équivalente du béton de chanvre peut s'exprimer à l'aide de la relation :

$$c^* = c_0 + \frac{w}{\rho_0} c_l \quad (3-9)$$

Ainsi, lorsque le béton de chanvre est soumis à des conditions de plus en plus humides, sa capacité thermique augmente proportionnellement à la quantité d'eau adsorbée par le matériau. Or, dans [Collet 2004], elle reste globalement constante aux humidités relatives de 0%, 50% et 80%. Evrard quant à lui utilise la relation (3-9) pour évaluer la capacité du béton de chanvre en fonction de la teneur en eau. Dans la suite du travail, nous choisissons donc une valeur de capacité thermique à l'état sec intermédiaire de $1250 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Le choix de cette valeur se justifie notamment par la proportion massique en liant (2/3) dont la capacité thermique est d'environ $1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et en chènevotte (1/3) dont la capacité thermique est d'environ $2000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. L'impact de ce choix sera discuté par la suite.

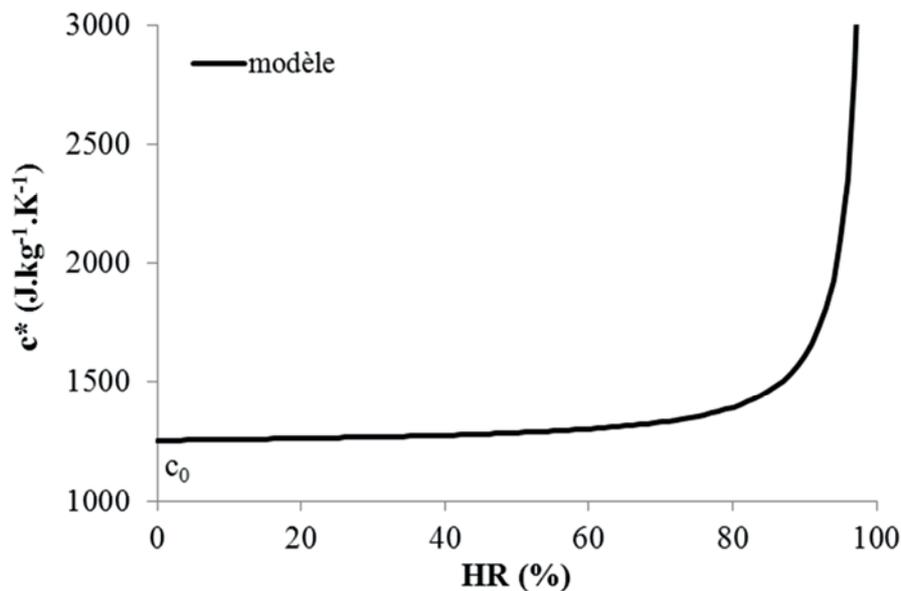


Figure 3-8 Evolution de la capacité thermique équivalente en fonction de l'humidité relative en utilisant la courbe d'adsorption principale pour exprimer w en fonction de HR

La figure 3-8 montre l'évolution de la capacité thermique massique équivalente sur toute la gamme d'humidité relative à la température de 23°C.

3.3.3. Bilan des caractéristiques thermiques

Les caractéristiques thermiques du béton de chanvre Easy-R sont résumées dans le tableau 3-2.

BILAN	
Caractéristiques thermiques Easy R	
Quantité	Expression/Valeur
Conductivité thermique à l'état sec λ_0	$0,117 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique à l'état saturé λ_s	$0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique équivalente λ	$\lambda = \lambda_s + (\lambda_0 - \lambda_s) \frac{w_{sat} - w}{w_{sat}}$
Capacité thermique massique à l'état sec c_0	$1250 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Capacité thermique massique équivalente c^*	$c^* = c_0 + \frac{w}{\rho_0} c_l$

Tableau 3-2 Bilan des caractéristiques thermiques Easy R

3.4. Propriétés hydriques

3.4.1. Isothermes de sorption : points expérimentaux

La détermination des isothermes d'adsorption/désorption se fait par mesure de la teneur en eau d'un échantillon à l'équilibre hygroscopique soumis à une humidité relative donnée. Le processus expérimental est relativement simple puisqu'il suffit de placer les échantillons dans une enceinte hermétiquement close dans laquelle est placée une solution saline permettant d'imposer l'humidité relative ambiante ou de les placer dans une chambre climatique contrôlée en humidité relative et température (cf. figure 3-9).

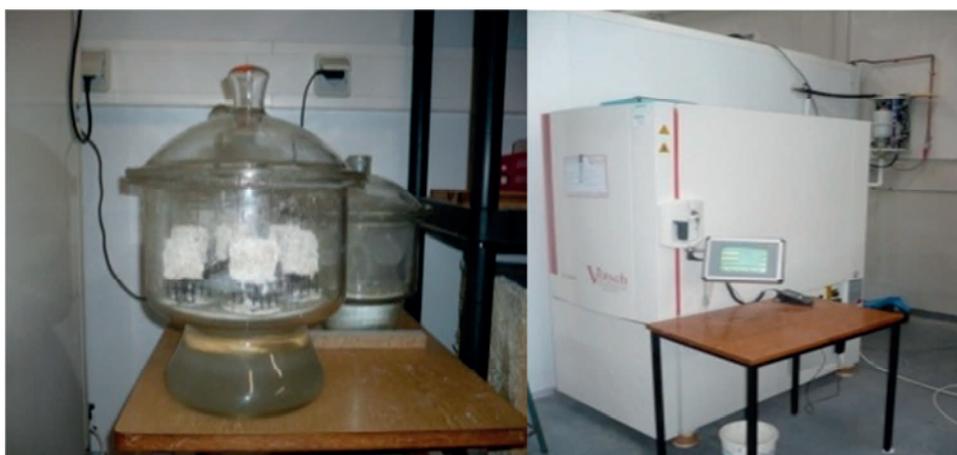


Figure 3-9 *Echantillons placés dans un dessiccateur à gauche et dans une chambre climatique à droite*

Le point initial de la courbe d'adsorption est le point sec établi à 2-3%HR par le processus de séchage présenté au paragraphe 3.2.3. Une fois l'équilibre hygroscopique atteint, les échantillons sont placés dans une ambiance d'humidité relative supérieure pour construire la courbe d'adsorption. Comme le préconise la norme EN ISO 12571, quatre atmosphères au moins doivent être considérées. Le premier point de désorption doit être établi à une humidité d'au moins 95%HR. En outre, l'équilibre est considéré atteint lorsque la masse des échantillons est constante, c'est-à-dire lorsque sur 3 pesées successives effectuées à 24h d'intervalle, la variation de la masse est inférieure à 0,1% de la masse totale. Le matériel utilisé est le même que celui utilisé pour déterminer la masse volumique apparente du béton de chanvre à l'état sec.

Dans le cadre du processus expérimental réalisé au laboratoire, les isothermes d'adsorption/désorption sont déterminées à plusieurs paliers successifs d'humidité relative ambiante croissante puis décroissante pour une série de cinq échantillons. Neuf atmosphères différentes (0%-11%-23%-33%-43%-58%-81%-90%-95%-97%) ont été ainsi étudiées. En l'occurrence ces ambiances ont été imposées à l'aide de la chambre climatique.

Ces essais de sorption ont été réalisés à la température de référence de 23°C.

Les résultats bruts sont données figure 3-10.

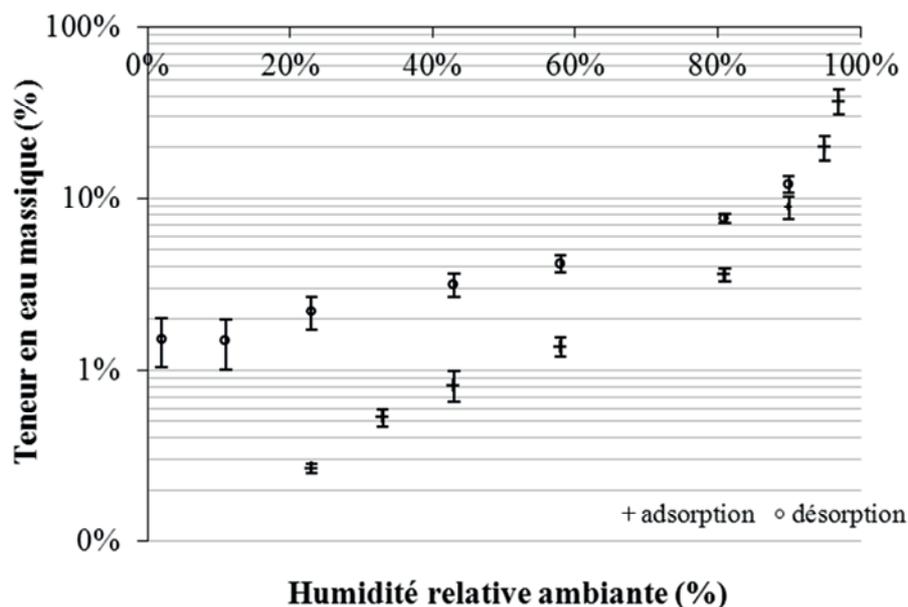


Figure 3-10 Isotherme de sorption à 23°C

On peut tout d'abord noter la forte hystérésis qui caractérise cette isotherme de sorption. En effet, courbe de désorption et courbe d'adsorption ne sont pas confondues. Ce phénomène peut se comprendre par le fait que le matériau ne libère pas l'humidité de la même manière qu'il l'a accumulée.

En préambule à l'analyse qui suit, il convient de préciser le vocabulaire employé. Ainsi, on appelle courbe d'adsorption principale l'ensemble des teneurs en eau obtenues pour une gamme d'humidité relative allant de 0%HR à 100%HR recueillies de manières croissantes. De même, on appelle courbe de désorption principale, l'ensemble des teneurs en eau obtenues pour une gamme d'humidité relative allant de 100%HR à 0%HR recueillies de manières décroissantes. Ces courbes principales peuvent être considérées comme des « limites » physiques à l'évolution de la teneur en eau. Toute autre courbe est appelée courbe intermédiaire.

A ce titre, les points expérimentaux obtenus figure 3-10 n'offrent qu'une vision partielle de l'évolution de la teneur en eau à l'intérieur du béton de chanvre. En effet, si les points d'adsorption obtenus expérimentalement appartiennent bien à la courbe d'adsorption principale, ce n'est pas le cas des points de désorption qui appartiennent à la courbe de désorption intermédiaire 97%HR-0%HR.

A ce niveau d'analyse, la modélisation de la courbe de désorption principale et de la courbe intermédiaire de désorption intermédiaire 97%HR-0%HR n'est pas réalisable car elle nécessite la prise en compte du phénomène d'hystérésis (cf. chapitre 5). Toutefois, on peut s'intéresser à la modélisation de la courbe d'adsorption principale complète.

3.4.2. Modélisation de la courbe d'adsorption principale

Afin de modéliser la courbe d'adsorption principale de manière complète, il convient d'ajouter aux teneurs en eau expérimentales présentées au paragraphe 3.4.1., la teneur en eau de saturation déterminée au paragraphe 3.2.4.

De nombreux modèles existent dans la littérature pour modéliser les courbes de sorption en milieu poreux. Certains modèles tentent de décrire le comportement du milieu en phase d'adsorption monomoléculaire [Langmuir 1918] et d'adsorption polymoléculaire comme le modèle BET (Brunauer - Emmet - Teller) [Brunauer 1938] ou le modèle GAB (Guggenheim - Anderson - De Boer). D'autres modèles permettent de décrire l'évolution de la teneur en eau sur toute la gamme d'humidité relative [Brooks and Corey 1964, King 1965, Van Genuchten 1980]. L'ensemble de ces modèles s'appuient nécessairement sur des données expérimentales car l'évolution de la teneur en eau est très sensible à la nature du matériau. Ils en perdent ainsi leur caractère prédictif et permettent avant tout d'utiliser un formalisme mathématique reposant sur une base physique.

Le modèle le plus largement répandu est le modèle de Van Genuchten utilisé dans la plupart des travaux récents sous une forme parfois légèrement simplifiée [Carmeliet 2005, Roels 2006, Derluyt 2007, Janssen 2009, Vereeken 2010...].

La forme générale du modèle Van Genuchten, noté VG dans la suite du travail, s'appuie sur la formulation suivante :

$$\begin{cases} S_e = \frac{u - u_r}{u_s - u_r} = (1 + |\alpha h|^\eta)^{-m} \text{ pour } \varphi < 1 \\ S_e = 1 \text{ pour } \varphi = 1 \end{cases} \quad (3-10)$$

S_e désigne la saturation effective du matériau, u [%] la teneur en eau massique, u_s [%] la teneur en eau massique de saturation et u_r [%] la teneur en eau massique résiduelle. α , η et m sont des paramètres de calage. Le coefficient m s'écrit en fonction du paramètre η :

$$m = 1 - \frac{1}{\eta} \quad (3-11)$$

h [m] la hauteur capillaire a pour expression :

$$h = \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \quad (3-12)$$

On peut noter que cette expression peut décrire aussi bien la courbe d'adsorption que la courbe de désorption.

Dans le cas du béton de chanvre, la teneur en eau résiduelle est nulle et la teneur eau de saturation a pour valeur u_{sat} .

Le modèle VG permet au final d'obtenir l'expression de la courbe d'adsorption principale pour le béton de chanvre.

$$u = u_{sat} \left(1 + \left| \alpha_{ads} \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right|^{\eta_{ads}} \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta_{ads}}\right)} \quad (3-13)$$

Les coefficients α_{ads} , η_{ads} sont déterminés par la méthode des Moindres Carrés Pondérés (MCP). La prescription des moindres carrés revient à minimiser la quantité :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{nb} y_i |u_{i,mod} - u_{i,exp}|^2 \quad (3-14)$$

$u_{i,mod}$ est la teneur en eau issue du modèle VG exprimée dans l'équation (3-13), $u_{i,exp}$ les valeurs des teneurs en eau expérimentales, y_i le poids de la valeur expérimentale et nb le nombre de mesures.

L'application de la méthode des moindres carrés pour la détermination de la courbe d'adsorption principale est effectuée à l'aide du solveur d'Excel.

Par ailleurs, le modèle VG est comparé au modèle GAB qui est une évolution du modèle BET. Tout comme le modèle BET, il repose sur les phénomènes physiques d'adsorption et s'écrit :

$$u = \frac{abu_m \varphi}{(1 - b\varphi)[1 + (a - 1)b\varphi]} \quad (3-15)$$

u_m désigne la teneur en eau moléculaire, c'est-à-dire la teneur en eau nécessaire pour recouvrir d'une couche de molécules d'eau la surface de l'adsorbat. a et b sont fonction de la chaleur molaire latente de vaporisation et de la chaleur molaire d'adsorption. Ceci dit, plutôt que de conserver cette écriture utilisant la teneur en eau moléculaire u_m , il est plus judicieux de l'exprimer en fonction de la teneur en eau à saturation u_{sat} que l'on connaît :

$$u = \frac{u_{sat} \varphi}{(1 - b\varphi)[1 + (a - 1)b\varphi]} (1 - b)[1 + (a - 1)b] \quad (3-16)$$

Ces coefficients sont ajustés pour minimiser l'écart quadratique entre les points expérimentaux et les valeurs prédites par le modèle à partir de la méthode des moindres carrés.

Une discussion préliminaire autour du choix de modélisation est proposée ici : l'optimisation des paramètres de la courbe d'adsorption principale doit-elle être effectuée par rapport à l'ensemble des points expérimentaux c'est-à-dire sur toute la gamme d'humidité relative ? Dans un premier temps, le choix de cette modélisation s'avère le plus évident puisque les mécanismes de transfert d'humidité ont lieu sur toute la plage d'humidité.

Comme tout choix, celui-ci n'en demeure pas moins critiquable. En effet, une série limitée de points expérimentaux peut être choisie pour réaliser cette optimisation numérique selon la perspective d'étude envisagée. Par exemple, pour une étude en conditions hygrothermiques

normales, une optimisation aux humidités moyennes (entre 40 et 80%HR) est tout à fait justifiable alors que pour une étude en séchage une optimisation aux fortes humidités doit être privilégiée.

L'objectif de ce travail de thèse étant d'étudier le comportement hygrothermique du béton de chanvre en conditions hygrothermiques normales d'utilisation, deux types de paramétrages sont réalisés : une optimisation sur toute la gamme d'humidité relative (approche A) et une optimisation sur la plage 40-80%HR (approche B).

Approche A :

Modèle VG

Dans ce cas, la somme des résidus χ^2 est ainsi optimisée pour une valeur de $3,3 \cdot 10^{-5}$ et nous fournit les paramètres :

$$\alpha_{\text{ads}} = 0,00717$$

$$\eta_{\text{ads}} = 2,214$$

L'erreur relative moyenne entre valeurs numériques et expérimentales de 7,7% montre que ce choix de modélisation effectué fournit des résultats tout à fait satisfaisants.

Modèle GAB

La somme des résidus χ^2 est optimisée pour une valeur de $4,2 \cdot 10^{-4}$ et nous fournit les paramètres :

$$\mathbf{a} = 0,065$$

$$\mathbf{b} = 0,98$$

Approche B :

Modèle VG

La somme des résidus χ^2 est ainsi optimisée pour une valeur de $1,6 \cdot 10^{-7}$ et nous fournit les paramètres :

$$\alpha_{\text{ads}} = 0,0119$$

$$\eta_{\text{ads}} = 2,0462$$

Modèle GAB

La somme des résidus χ^2 est optimisée pour une valeur de $3,1 \cdot 10^{-7}$ et nous fournit les paramètres :

$$\mathbf{a} = 1,668$$

$$\mathbf{b} = 0,995$$

Les courbes d'adsorption principales complètes issues des approches A et B sont présentées figure 3-11 et permettent de comparer les modèles VG et GAB. La représentation logarithmique permet de mieux visualiser les résultats dans la zone hygroscopique.

Le modèle VG proposé semble tout à fait à même de représenter l'évolution de la teneur en eau du béton de chanvre en phase d'adsorption quelle que soit l'approche envisagée. On retrouve bien les phases d'adsorption monomoléculaire puis polymoléculaire et la zone de condensation capillaire.

Le modèle GAB, inhérent à son principe même, présente l'inconvénient majeur de ne pas être valable en condensation capillaire. Si le modèle GAB est assez proche du modèle VG hormis aux basses humidités où il semble offrir une meilleure approximation dans le cadre de l'approche B, les résultats qu'il fournit dans le cadre de l'approche A sont très divergents des résultats expérimentaux.

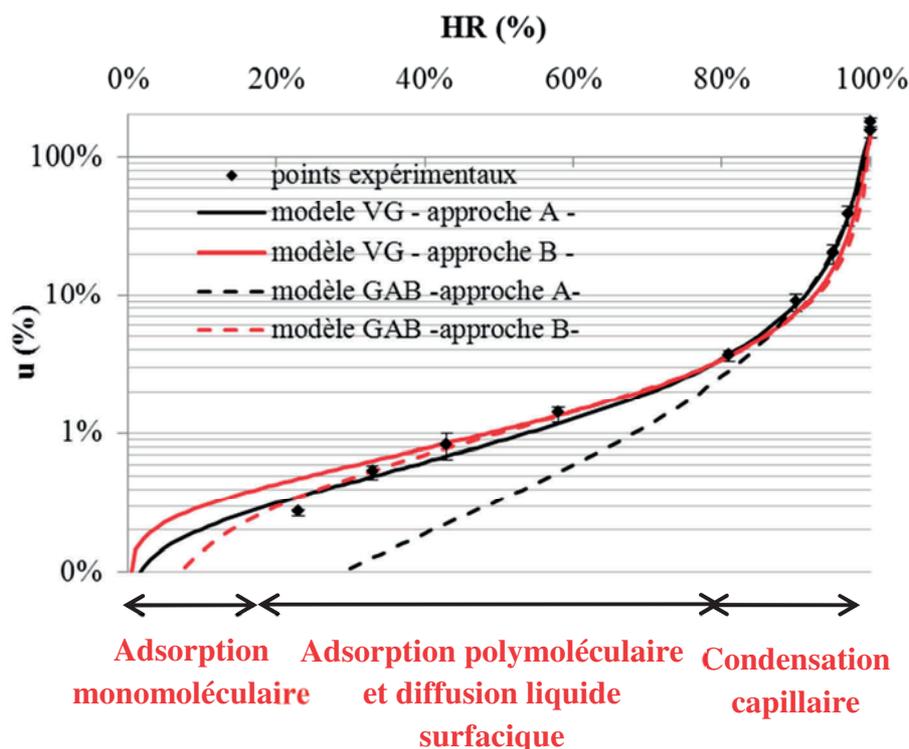


Figure 3-11 Courbe d'adsorption principale dans la zone hygroscopique : points expérimentaux et modèle VG

Pour cette raison, on retient la modélisation de Van Genuchten qui, bien que critiquable aux très basses humidités, reste tout à fait adapté au cas du béton de chanvre sur le reste de la plage d'humidité.

La courbe principale d'adsorption issue de l'approche A sert de référence à l'étude du comportement hydrique du béton de chanvre.

3.4.3. Perméabilité apparente à la vapeur : valeurs expérimentales

La perméabilité à la vapeur permet d'évaluer la capacité d'un matériau à transmettre la vapeur d'eau. Le principe de sa détermination consiste à imposer un gradient de vapeur constant

monodimensionnel à un échantillon d'épaisseur e . La méthode utilisée et préconisée par la norme EN ISO 12572 est la méthode de la coupelle. L'échantillon est alors placé dans une coupelle dans laquelle se trouve une solution saline permettant de fixer l'humidité ambiante HR_i . L'ensemble échantillon/coupelle est alors placé dans une autre ambiance HR_e différente de l'humidité HR_i (cf. figure 3-12). Le caractère monodimensionnel du transfert est assuré par l'étanchéité latérale réalisée à la paraffine.

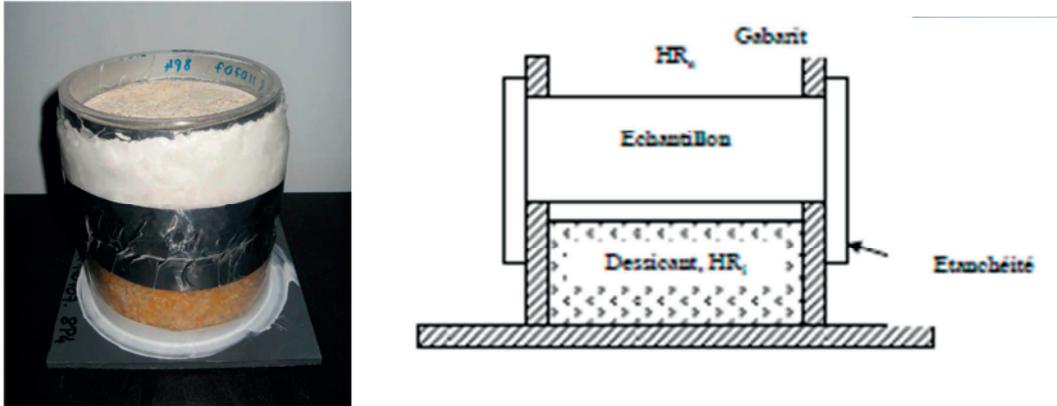


Figure 3-12 Méthode de la coupelle : photographie et schéma de principe

A la température de référence de 23°C, la différence entre ces deux humidités relatives crée un gradient de pression partielle de vapeur qui génère ainsi un flux de vapeur à travers le matériau.

Sous les conditions précisées précédemment, la densité de flux de vapeur g_v [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] s'écrit :

$$g_v = \frac{\delta_p \Delta p_v}{e} \quad (3-17)$$

δ_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] désigne la perméabilité à la vapeur du matériau, p_v [Pa] la pression partielle de vapeur et e [m] l'épaisseur de l'échantillon.

La détermination du flux de vapeur se base sur un suivi massique de l'ensemble coupelle/échantillon en fonction du temps. Le taux de variation de la masse de l'assemblage d'essai s'écrit alors :

$$G = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (3-18)$$

Δm [kg] désigne la variation de la masse de l'assemblage pendant l'intervalle de temps Δt [s].

On en déduit alors la densité de flux de vapeur :

$$g_v = \frac{G}{A} \quad (3-19)$$

Avec A [m^2] la surface exposée de l'échantillon définie par la moyenne des surfaces libres intérieure et extérieure.

Finalement, des relations précédentes découlent la détermination de la perméabilité à la vapeur :

$$\delta_p = \frac{\Delta m}{\Delta t} \frac{1}{A} \frac{e}{\Delta p_v} \quad (3-20)$$

Le calcul de la perméabilité à la vapeur se fait une fois le régime permanent établi (cf. figure 3-13).

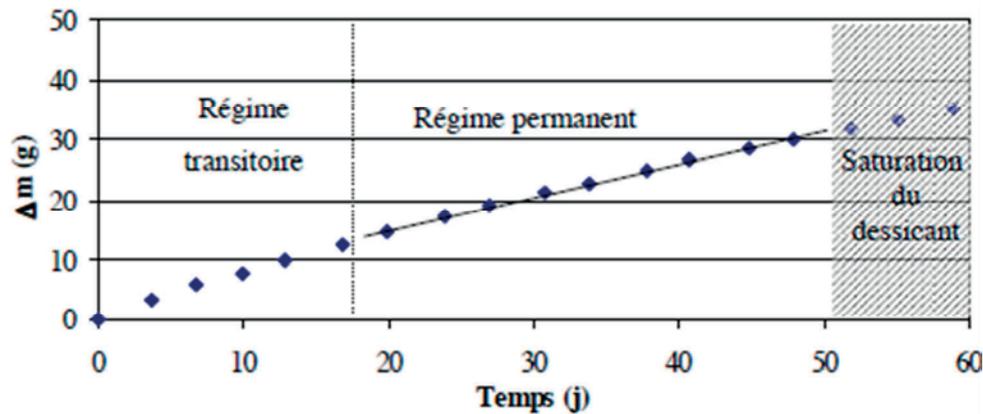


Figure 3-13 Evolution de la masse en fonction du temps -exemple-²⁷

L'évaluation de la perméabilité relative est ainsi conditionnée par la pente de la courbe de variation de masse en fonction du temps en régime permanent.

L'ensemble des échantillons étudiés est initialement séché à 23°C afin de s'assurer qu'ils soient en phase d'adsorption.

9 couples d'humidité relative ont été étudiés (0-23%, 23-33%, 23-43%, 43-58%, 58-81%, 81-90%, 81-94% et 94-97% + le couple normatif 0-50%). Les résultats bruts sont présentés figure 3-14.

²⁷ [Chamoin 2010]

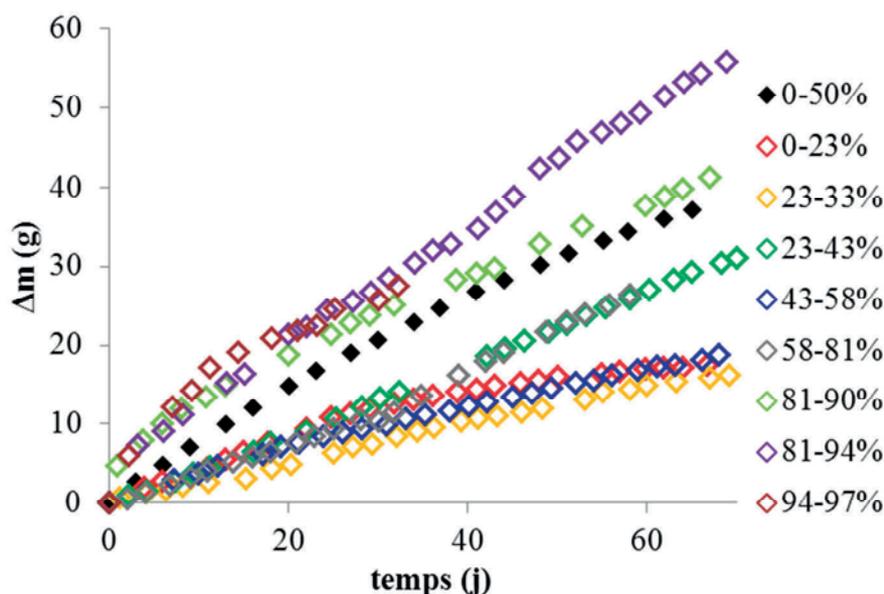


Figure 3-14 Variation de la masse en fonction du temps pour les 9 couples étudiés

Il a été montré au chapitre 2 précédent que le transfert d'humidité à travers un milieu poreux fait intervenir différents modes de transport pour lesquels la distinction entre les transferts en phase vapeur et liquide est floue. A ce titre, les résultats présentés figure 3-14 ne permettent pas à proprement parler de transfert par voie vapeur notamment pour les humidités les plus élevées justifiant l'emploi du terme de perméabilité apparente à la vapeur.

Il est à noter que le processus expérimental n'a pas pu aller à son terme pour le couple 94-97% pour cause de formation de moisissures.

3.4.4. Modélisation du transport d'humidité

3.4.4.1. Evaluation expérimentale de la perméabilité apparente à la vapeur

Dans un premier temps, une démarche classique est adoptée : quel que soit le couple d'humidités étudié, la détermination de la perméabilité se fait par détermination du coefficient directeur de la pente de la courbe de variation de masse en fonction du temps en régime permanent qui est admis atteint lorsque le coefficient de corrélation de cette pente est supérieur à 0,96. Selon [Chamoïn 2010], le régime permanent est atteint entre 20 et 30 jours. L'évaluation de la transition régime transitoire/régime permanent découle ainsi indirectement de l'application du critère de pente régulière précédent.

En réalité la phase transitoire correspond au stockage de l'humidité dans le matériau au cours des essais de perméabilité.

Dans une nouvelle approche, le critère de pente régulière précédent est abandonné au profit de l'évaluation de la quantité d'eau stockée dans le matériau. La quantité d'eau stockée M [kg] évaluée à partir de la courbe d'adsorption principale correspond à :

$$M = \rho_0[u(\varphi) - u(\varphi_i)]V_{\text{échantillon}} \quad (3-21)$$

Les figures 3-15 à 3-21 montrent pour chaque essai de perméabilité la quantité d'eau stockée dans le matériau. La quantité d'eau stockée permet de distinguer la contribution liée au stockage de l'eau dans l'échantillon de celle due effectivement au transport d'humidité.

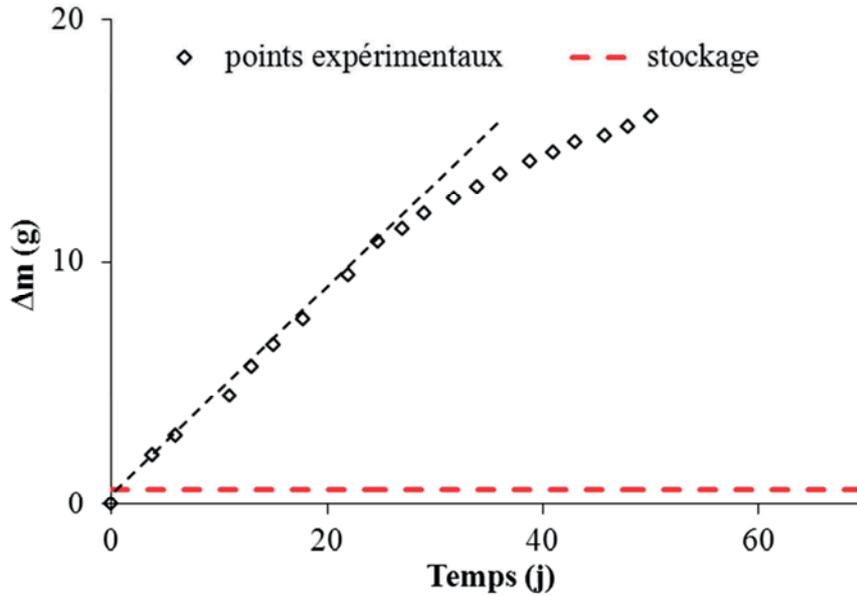


Figure 3-15 Prise de masse : points expérimentaux et quantité d'eau stockée - essai 0-23%

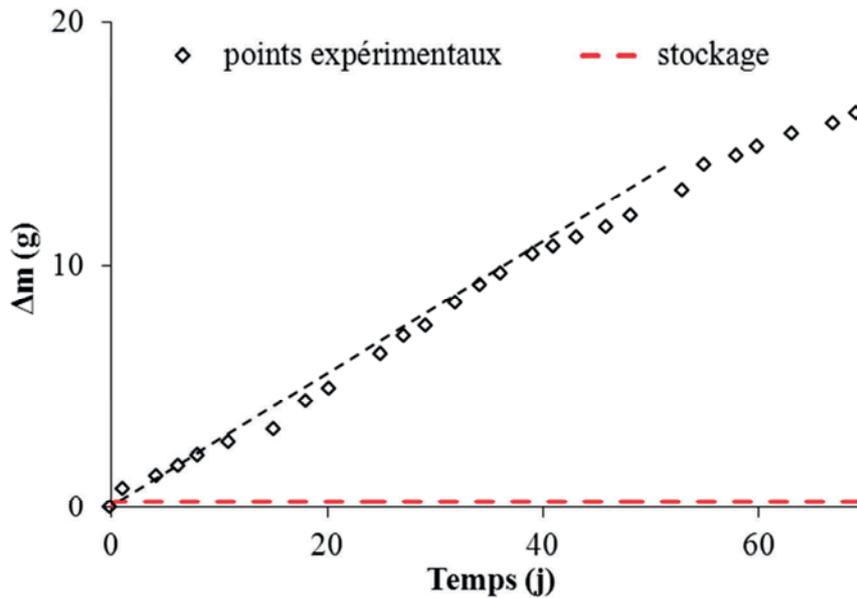


Figure 3-16 Prise de masse : points expérimentaux et quantité d'eau stockée - essai 23-33%

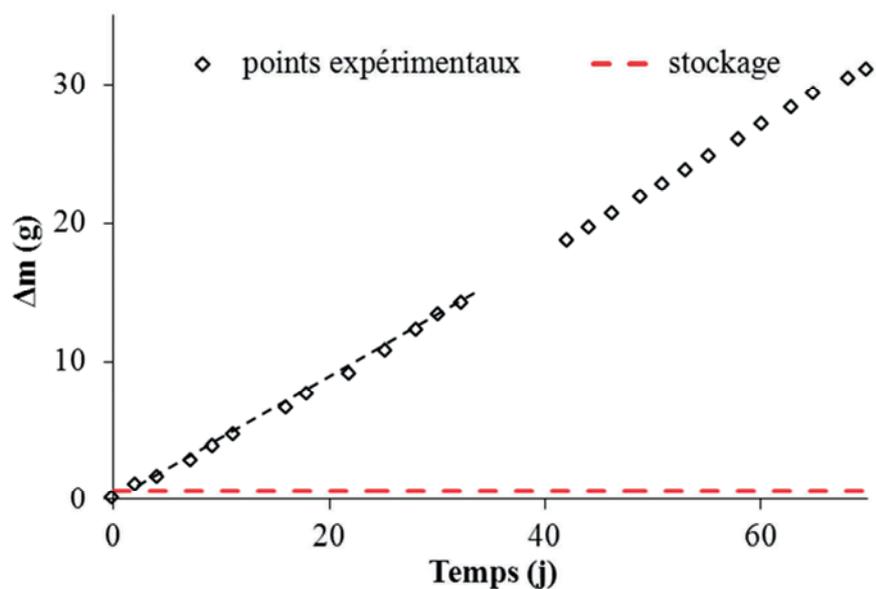


Figure 3-17 Prise de masse : points expérimentaux et quantité d'eau stockée - essai 23-43%

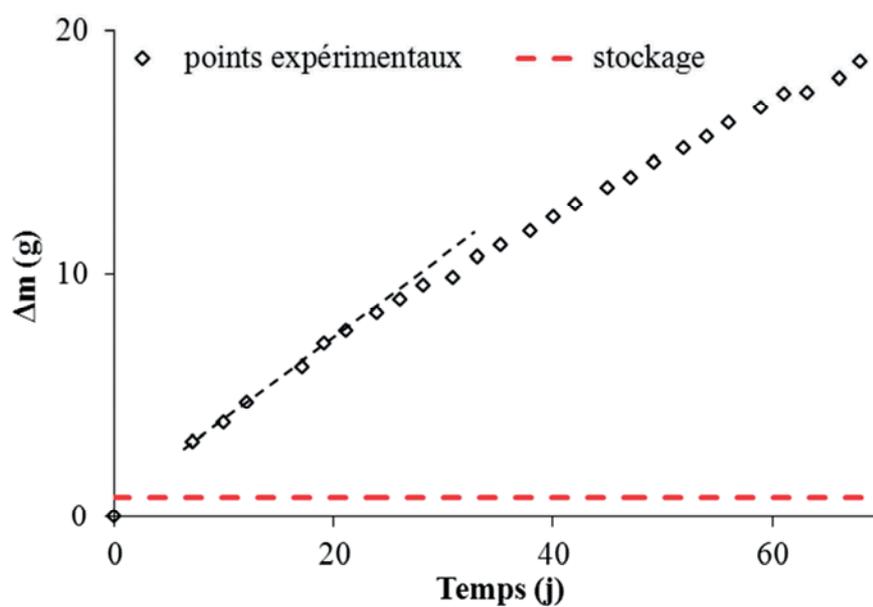


Figure 3-18 Prise de masse : points expérimentaux et quantité d'eau stockée - essai 43-58%

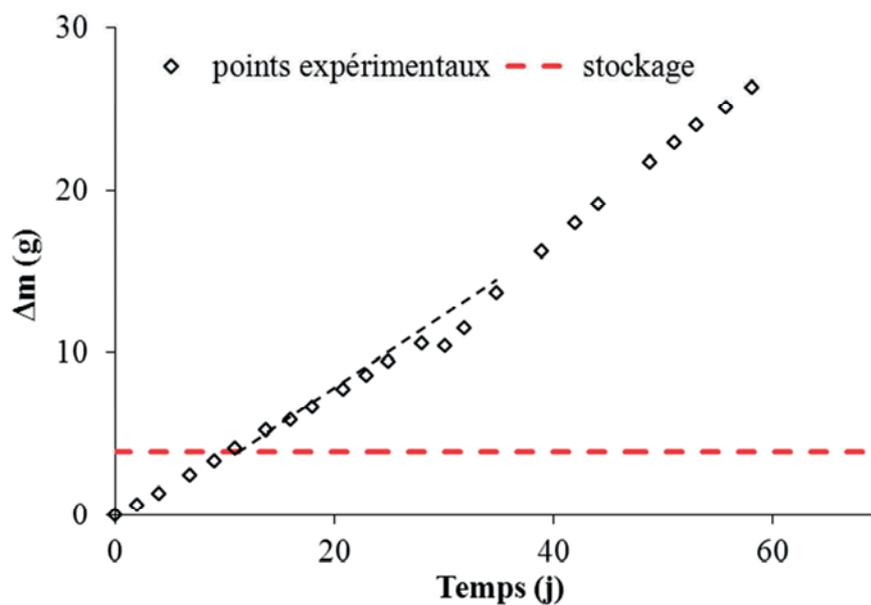


Figure 3-19 Prise de masse : points expérimentaux et quantité d'eau stockée - essai 58-81%

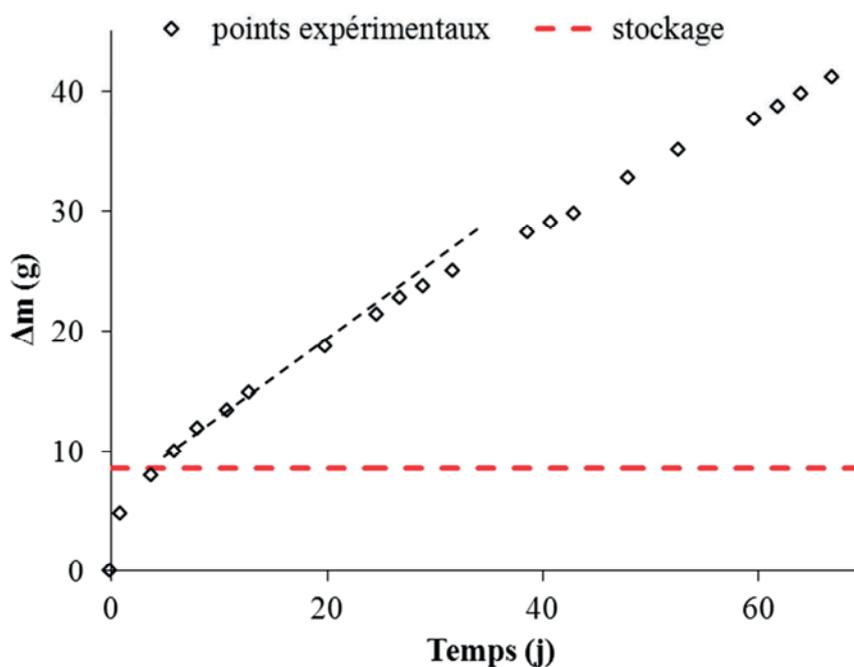


Figure 3-20 Prise de masse : points expérimentaux et quantité d'eau stockée - essai 81-90%

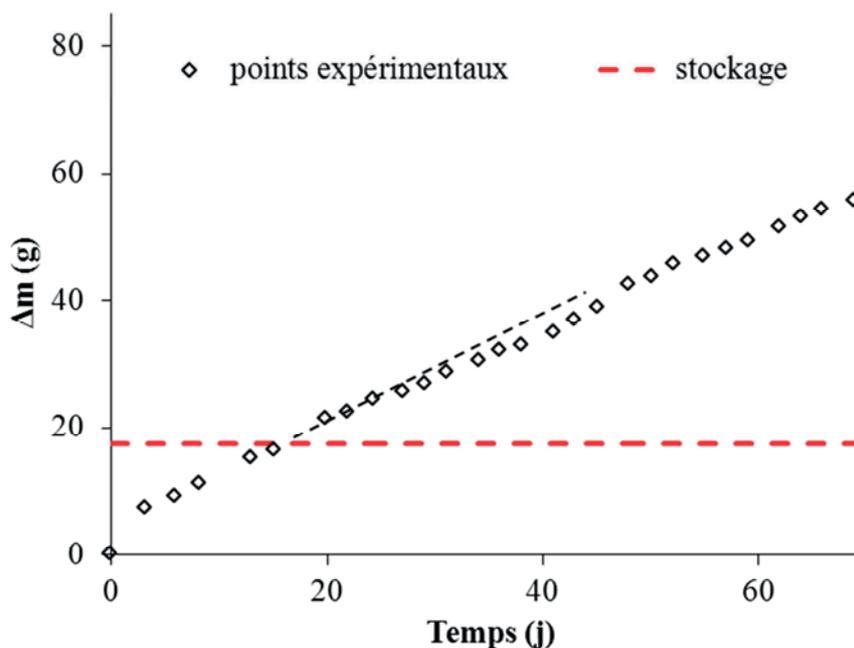


Figure 3-21 *Prise de masse : points expérimentaux et quantité d'eau stockée - essai 81-94%*

Ainsi, l'évaluation de cette phase de stockage d'humidité à l'intérieur des échantillons permet de mieux estimer la perméabilité apparente à la vapeur par une évaluation plus justifiée physiquement. L'évaluation de la perméabilité se fait à partir du coefficient directeur de la droite représentée en pointillés noirs sur les figures précédentes.

La figure 3-22 compare les perméabilités apparentes obtenues par les deux approches (première approche : critère de pente régulière et nouvelle approche : à partir de l'évaluation de la quantité d'eau stockée dans les échantillons). Pour plus de visibilité, les résultats sont présentés en fonction de l'humidité relative.

Si l'on se fie à la première approche, la durée du régime transitoire est très largement surestimée notamment aux faibles couples d'humidité et surtout reste fondamentalement inconnue. La détermination de la quantité d'eau stockée dans le matériau est un critère fiable qui permet d'évaluer la contribution liée au transport d'humidité. La méconnaissance de cette quantité d'eau peut ainsi conduire à des erreurs d'interprétation des résultats. Ces erreurs peuvent s'expliquer par la confusion entre régime permanent et saturation du dessiccant. C'est de cette confusion que proviennent les différences observées avec les deux approches figure 3-22. Pour de futures études expérimentales, la connaissance de la quantité d'eau stockée permet d'optimiser la durée des essais de perméabilité et ainsi d'affiner les résultats sur une plus courte période.

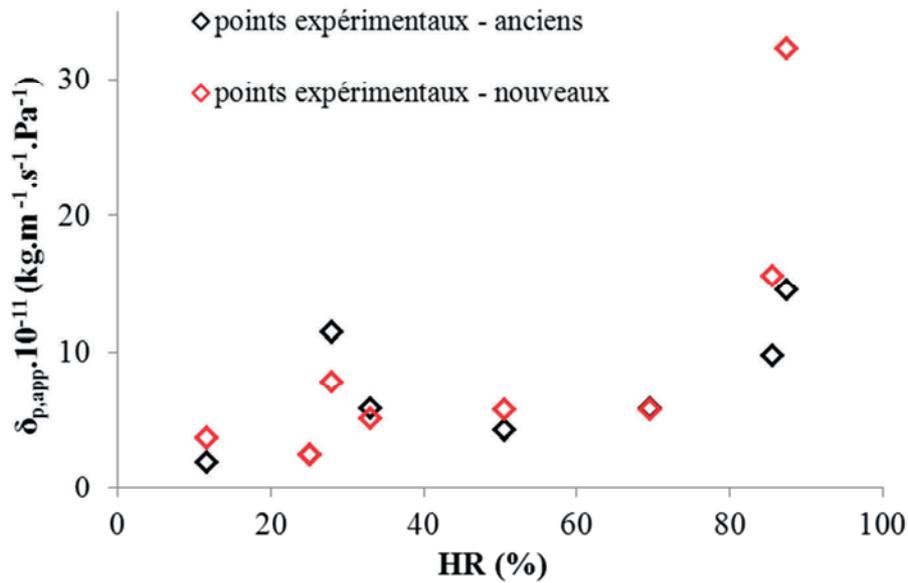


Figure 3-22 Evolution de la perméabilité apparente à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative en utilisant la courbe d'adsorption principale pour exprimer w en fonction de HR - comparaison première et nouvelle approche -

Afin de modéliser le transport d'humidité au sein du béton de chanvre, nous retenons la nouvelle approche, c'est-à-dire la prise en compte des points rouges de la figure 3-22.

3.4.4.2. Modèle de perméabilité apparente

La perméabilité apparente, fonction de la teneur en eau du matériau, peut être décrite à partir d'interpolations. Son évolution peut ainsi suivre des lois exponentielle ou puissance [Galbraith 1997]. Une loi exponentielle permet de mieux décrire l'évolution de la perméabilité en offrant de meilleurs coefficients de corrélation. Ainsi le formalisme suivant est adopté :

$$\delta_{p,app} = ae^{u \cdot b} \quad (3-22)$$

a et b sont des paramètres déterminés expérimentalement et u [kg/kg] est la teneur en eau massique.

La perméabilité apparente du béton de chanvre est ainsi exprimée par la relation :

$$\delta_{p,app} = 4,0161 \cdot 10^{-11} e^{20,788 \cdot u} \quad (3-23)$$

La teneur en eau massique choisie pour représenter les points expérimentaux est prise à la moyenne des teneurs en eau massique de chaque couple d'humidités.

Les résultats sont présentés figure 3-23.

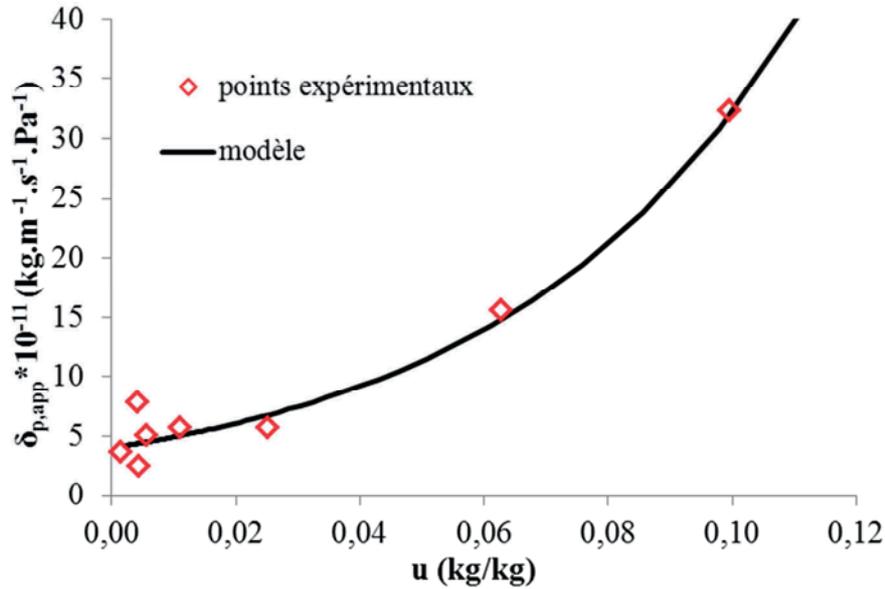


Figure 3-23 Evolution de la perméabilité apparente à la vapeur d'eau en fonction de la teneur en eau massique

3.4.4.3. Modèle de Künzel de séparation des contributions vapeur et liquide

Afin de mieux décrire le comportement réel du matériau, une autre approche de modélisation, plus physique, est envisagée. En effet, elle reprend le formalisme de Künzel qui dissocie les contributions liquide et vapeur.

La figure 3-22 montre qu'aux basses humidités la perméabilité apparente à la vapeur oscille autour d'une valeur constante. Cette dernière est choisie comme la moyenne des perméabilités apparentes des cinq premiers couples d'humidité relative étudiés : 0-23%, 0-50%, 23-33%, 23-43% et 43-58%. On obtient ainsi :

$$\delta_p = 5.10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$$

En utilisant l'expression de la perméabilité à la vapeur de l'air décrite au chapitre précédent :

$$\delta_{p,a} = 2,31.10^{-5} \frac{M_l}{RT} \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,81} \quad (3-24)$$

Le facteur de résistance à la vapeur d'eau du béton de chanvre Easy-R à 23°C a ainsi pour valeur :

$$\mu_0 = 3,91$$

Selon Künzel, les résultats issus de la méthode de la coupelle peuvent être utilisés pour décrire le transfert liquide dans la région hygroscopique correspondant aux plus fortes humidités. Est ainsi introduite la notion de coefficient de conduction liquide isotherme qui a pour expression :

$$D_{\varphi,l} = \left(\frac{1}{\mu^*(u)} - \frac{1}{\mu_0} \right) \delta_{p,a} p_{sat} \quad (3-25)$$

où μ^* est un facteur de résistance apparent à la diffusion de la vapeur aux fortes humidités.

Déterminé pour les couples d'humidité relative 58-81%, 81-90% et 81-94%, il suit une loi exponentielle dont l'expression est :

$$\mu^*(u) = \frac{\delta_{p,a}(23^\circ\text{C})}{4,0664 \cdot 10^{-11} e^{20,814 \cdot u}} \quad (3-26)$$

Cette relation est obtenue avec un coefficient de corrélation de 0,989.

Explicité au chapitre 2, le transfert par voie liquide est initié dès lors que la teneur en eau du matériau dépasse la valeur de la teneur en eau critique u_{cr} . Cette dernière est déterminée pour une valeur de teneur en eau telle que :

$$\mu^*(u_{cr}) = \mu_0 \quad (3-27)$$

On obtient alors une valeur qui correspond à $u_{ads}(53,6\%)$ en utilisant la courbe d'adsorption principale de l'approche A.

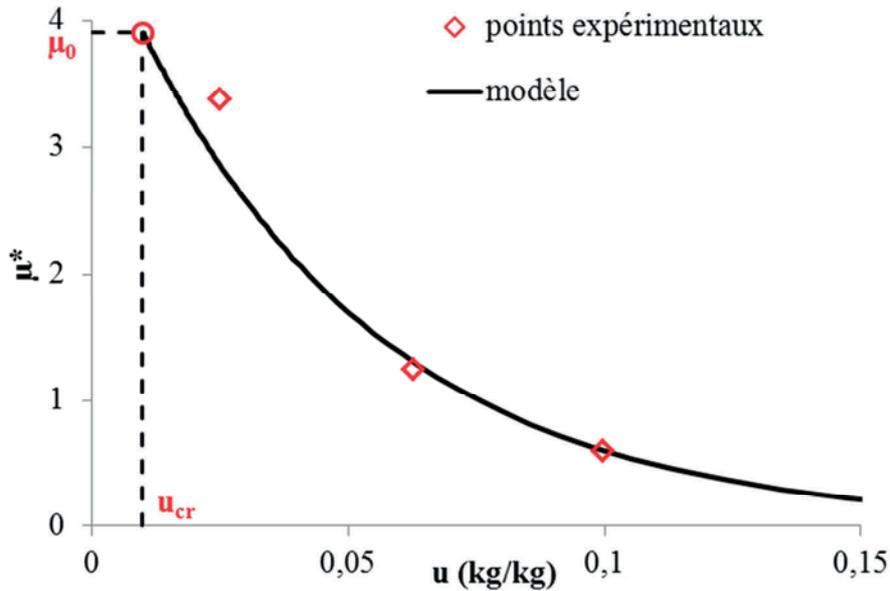


Figure 3-24 Evolution du facteur de résistance apparent à la diffusion de la vapeur aux fortes humidités

Le fait que cette teneur en eau critique soit relativement faible permet de prendre en compte la diffusion liquide surfacique en plus du phénomène de condensation capillaire (cf. Chapitre 2). [Krus 1996] et [Künzel 1994] montrent que la diffusion liquide surfacique devient en général significative dès lors que l'humidité relative atteint 50% (à titre d'exemple, elle est initiée à 30%HR pour du papier ou 60%HR pour le grès). La valeur de teneur en eau critique retenue dans le cas du béton de chanvre est donc tout à fait plausible.

La figure 3-24 représente l'évolution de μ^* en fonction de la teneur en eau.

3.4.4.4. Comparaison des modèles

La figure 3-25 permet de comparer le modèle de perméabilité apparente en loi exponentielle au modèle de Künzlel.

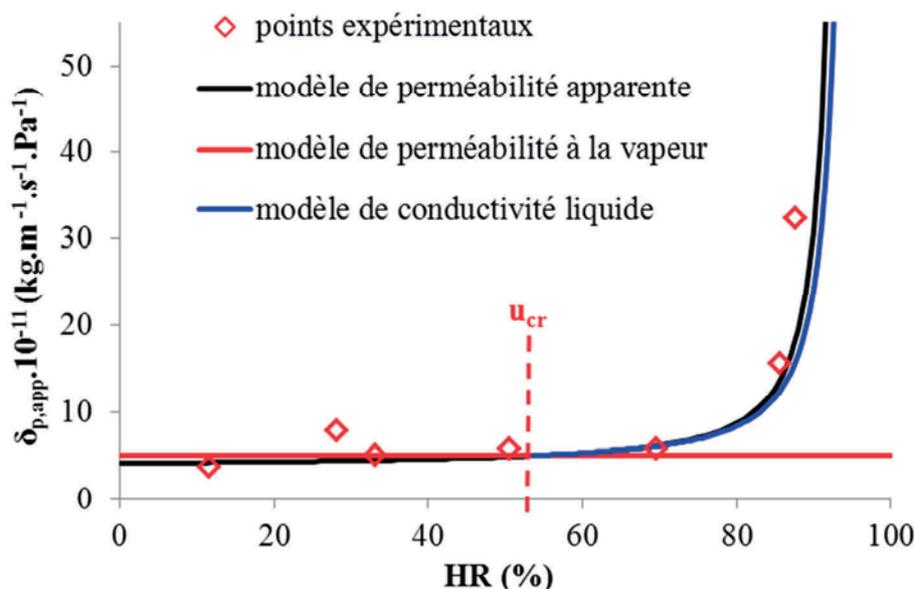


Figure 3-25 Evolution de la perméabilité apparente à la vapeur selon les modélisations étudiées en utilisant la courbe d'adsorption principale pour exprimer w en fonction de HR

A priori, les deux modèles apparaissent relativement proches l'un de l'autre.

Afin d'évaluer la quantité d'humidité stockée dans le matériau au cours des essais et de comparer les deux modèles de transport d'humidité, une simulation numérique simple est réalisée. Puisque les essais sont menés après séchage initial (à $T=23^\circ\text{C}$ et $0\%RH$), la teneur en eau suit l'évolution de la courbe d'adsorption principale modélisée par le modèle de Van Genuchten. Bien que les essais soient effectués en conditions isothermes à la température de 23°C , le couplage fort existant entre les équations de conservation de masse et de chaleur (cf. chapitre 2) implique que les variations de température induisent des variations d'humidité relative et réciproquement. Cependant, ces effets couplés sont ici très faibles mais sont tout de même pris en compte dans cette modélisation simplifiée. Les valeurs et expressions des propriétés thermiques sont celles décrites au paragraphe précédent.

Le schéma de la figure 3-26 pose le cadre de cette modélisation.

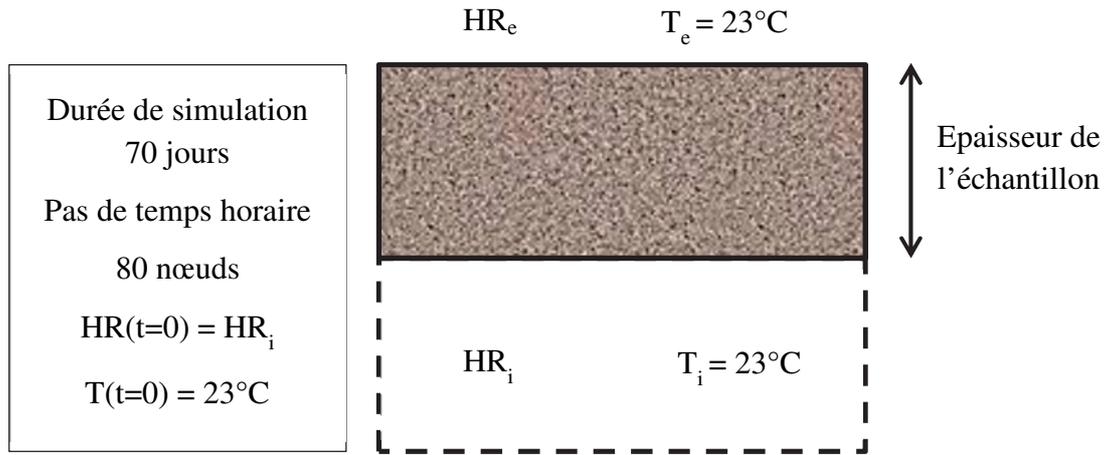


Figure 3-26 Schéma de principe du modèle simplifié

Le premier intérêt de cette simulation est de suivre l'évolution de la quantité d'eau présente dans le matériau au cours du temps.

En termes de prise de masse pour les différents essais de perméabilité, sont donc comparés :

- le modèle de perméabilité apparente à la vapeur
- le modèle de Kunzel à perméabilité à la vapeur constante et conductivité liquide fonction de la teneur en eau

Les figures 3-27 à 3-29 comparent ainsi les cinétiques de prise de masse des échantillons en représentant la part de stockage d'humidité dans le matériau et le flux d'humidité réel le traversant pour trois couples d'humidité différents.

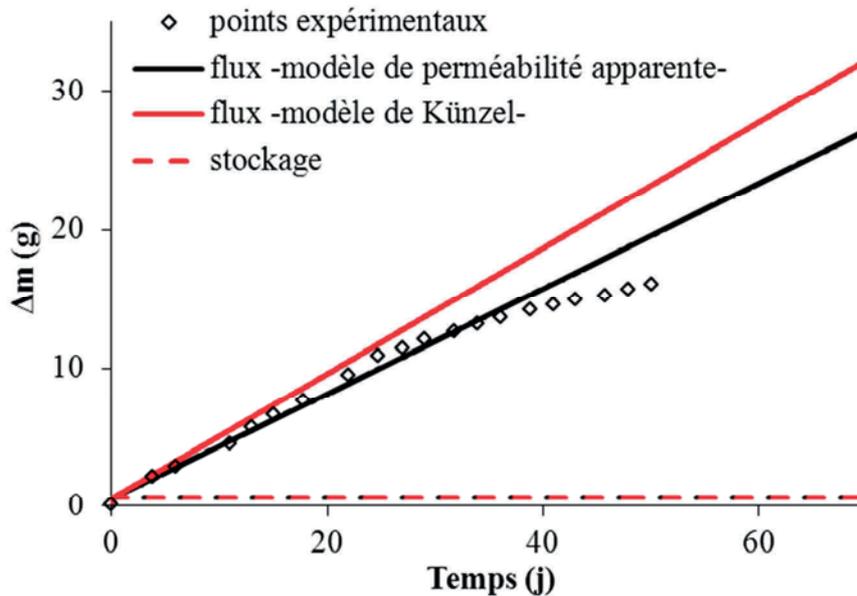


Figure 3-27 Prise de masse : points expérimentaux et modèles - essai 0-23% -

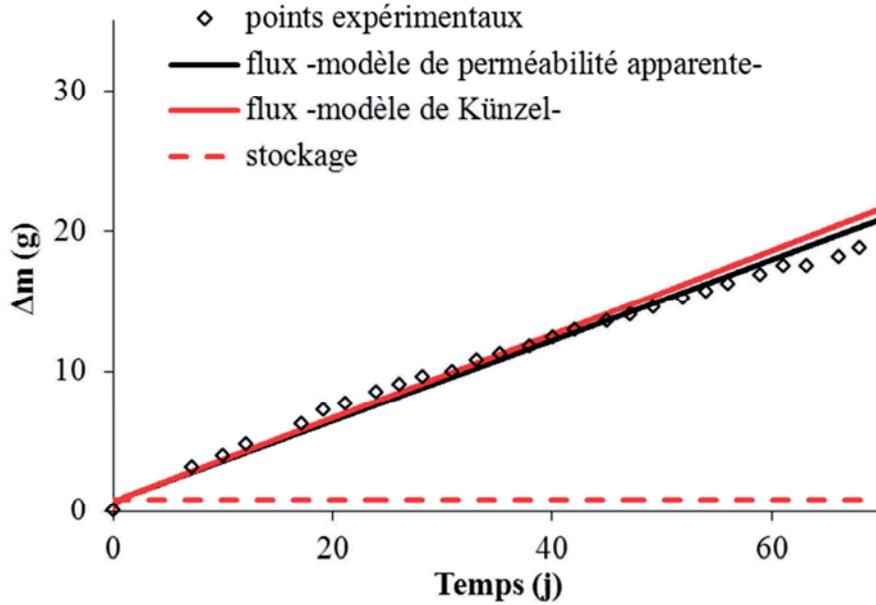


Figure 3-28 *Prise de masse : points expérimentaux et modèles - essai 43-58% -*

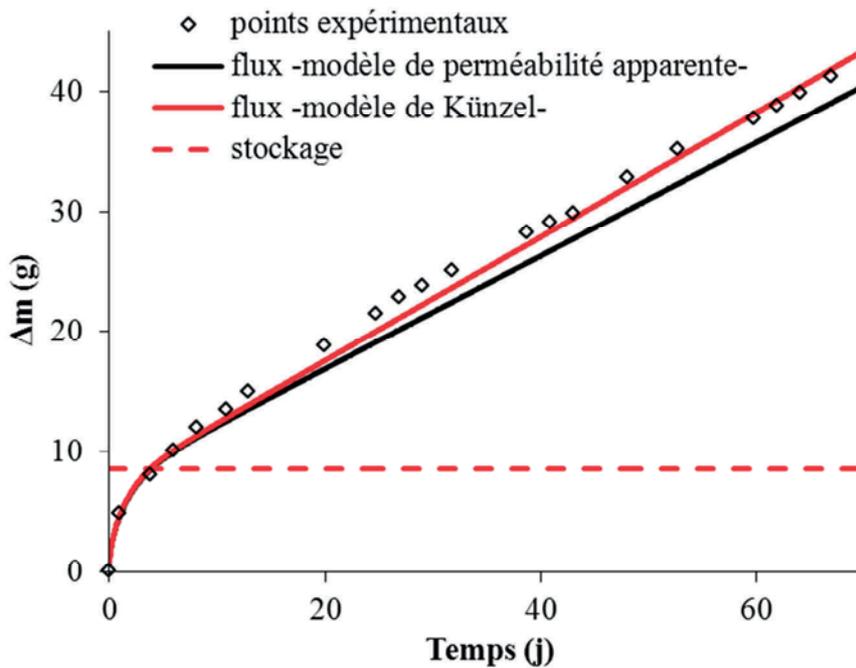


Figure 3-29 *Prise de masse : points expérimentaux et modèles - essai 81-90% -*

Les cinétiques de prise de masse en phase transitoire demeurent incertaines bien qu'il semble qu'elles soient correctement reproduites pour ces essais.

De manière générale, le modèle de Künzel et le modèle de perméabilité apparente à la vapeur semblent globalement équivalents. Outre la proximité des valeurs expérimentales et simulées, les pentes des courbes obtenus avec les deux approches sont relativement proches des pentes expérimentales. Les différences entre les deux modèles restent très limitées et les deux modèles peuvent très bien être utilisés. Cependant, pour la suite du travail, le modèle de

Künzel est conservé. Ce choix sera néanmoins discuté au chapitre 4 à l'échelle de la paroi sous sollicitations climatiques.

3.4.4.5. Diffusion vapeur, liquide et totale

Le flux total d'humidité est la somme des flux vapeur et liquide. La prédominance d'un mode de transport peut être traduite en termes de coefficient de diffusion. Ainsi, en conditions isothermes, la densité de flux vapeur s'écrit :

$$\begin{aligned}
 g_v &= -[\delta_p p_{sat}] \nabla \varphi \\
 &= -\frac{\delta_p p_{sat}}{\frac{dw}{d\varphi}} \nabla w \\
 &= -\frac{\delta_p p_{sat}}{\rho_0 \frac{du}{d\varphi}} \nabla w
 \end{aligned} \tag{3-28}$$

avec w la teneur en eau exprimée en kg.m^{-3} et u la teneur en eau massique exprimée en kg/kg .

Le coefficient de diffusion vapeur isotherme D_v [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$] a donc pour expression :

$$D_v = \frac{\delta_p p_{sat}}{\rho_0 \frac{du}{d\varphi}} \tag{3-29}$$

En suivant un raisonnement analogue, on obtient pour la densité de flux liquide:

$$\begin{aligned}
 g_l &= -[D_{\varphi,l}] \nabla \varphi \\
 &= -\frac{[D_{\varphi,l}]}{\frac{dw}{d\varphi}} \nabla w \\
 &= -\frac{[D_{\varphi,l}]}{\rho_0 \frac{du}{d\varphi}} \nabla w
 \end{aligned} \tag{3-30}$$

Le coefficient de diffusion liquide isotherme D_l [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$] a donc pour expression :

$$D_l = \frac{[D_{\varphi,l}]}{\rho_0 \frac{du}{d\varphi}} \tag{3-31}$$

Le coefficient de diffusion total isotherme D_t [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$], somme des contributions vapeur et liquide prend la forme :

$$D_t = D_v + D_l = \frac{\delta_p p_{sat}}{\rho_0} \frac{du}{d\varphi} + \frac{[D_{\varphi,l}]}{\rho_0} \frac{du}{d\varphi} \quad (3-32)$$

La figure 3-30 représente l'évolution de ces coefficients de diffusion en fonction de la teneur en eau massique exprimée en %.

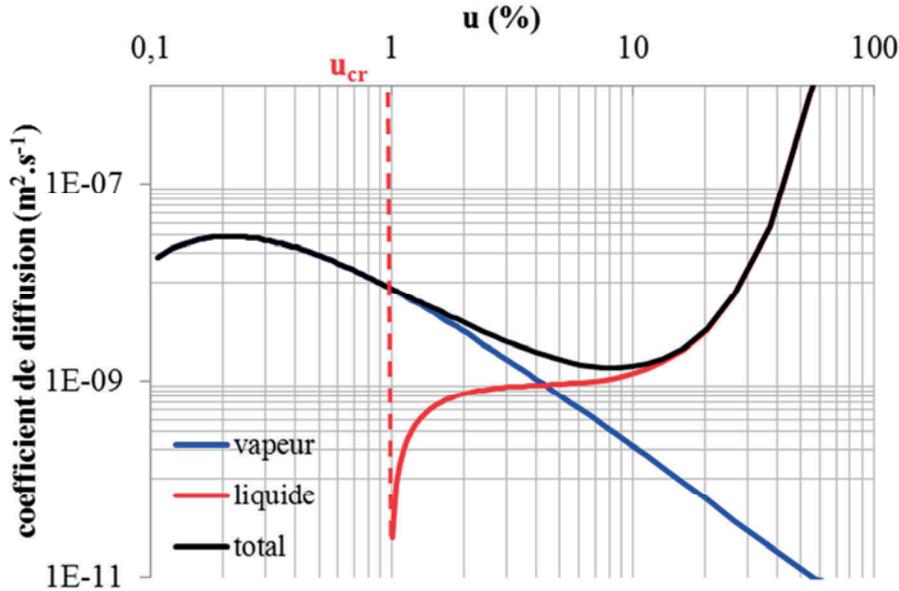


Figure 3-30 Evolution des coefficients de diffusion isotherme Easy R

Conformément à la théorie de De Vries [De Vries 1958], l'évolution générale des coefficients de diffusion isotherme en fonction de la teneur en eau se décompose en trois parties :

- aux faibles teneurs en eau, lorsque celles-ci sont inférieures à la teneur en eau critique u_{cr} , le transfert d'humidité se fait uniquement par voie vapeur. La phase condensée se présente sous forme adsorbée ou dans des îlots capillaires.
- pour des teneurs en eau plus élevées, les îlots capillaires augmentent en taille et en nombre. La section de passage du flux de vapeur diminue et la vapeur se diffuse par des mécanismes de condensation-évaporation aux interfaces liquide-vapeur. L'eau sous forme liquide se diffuse également à la surface des pores.
- aux fortes teneurs en eau, dès lors que la continuité de la phase liquide est assurée, le transfert en phase liquide devient largement prédominant et le coefficient de diffusion liquide isotherme augmente très rapidement.

3.4.5. Bilan des caractéristiques hydriques

L'ensemble des caractéristiques hydriques issu de la modélisation développée précédemment est résumé dans le tableau 3-3. Celles-ci sont déterminées à la température de référence de 23°C.

BILAN	
Caractéristiques hydriques isothermes à 23°C Easy R	
Quantité	Expression/valeur
Isotherme d'adsorption principale $u_{ads}(\varphi)$ - approche A : optimisée sur [0, 100%HR] -	$u = u_{sat} \left(1 + \left \alpha_{ads} \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right ^{\eta_{ads}} \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta_{ads}}\right)}$ $\alpha_{ads} = 0,00717, \eta_{ads} = 2,214 \text{ et } u_{sat} = 1,5 \text{ kg/kg}$
Isotherme d'adsorption principale $u_{ads}(\varphi)$ - approche B : optimisé sur [40, 80%HR] -	$u = u_{sat} \left(1 + \left \alpha_{ads} \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right ^{\eta_{ads}} \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta_{ads}}\right)}$ $\alpha_{ads} = 0,0119, \eta_{ads} = 2,0462 \text{ et } u_{sat} = 1,5 \text{ kg/kg}$
Perméabilité à la vapeur δ_p	$5 \cdot 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$
Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur μ_0	3,91
Coefficient de diffusion liquide D_l	$D_{\varphi,l} = \delta_{p,a} p_{sat} \left(\frac{1}{\mu^*(u)} - \frac{1}{\mu_0} \right)$
Facteur de résistance apparent à la diffusion de la vapeur μ^*	$\mu^*(u) = \frac{\delta_{p,a}(23^\circ\text{C})}{4,0664 \cdot 10^{-11} e^{20,814 \cdot u}}$

Tableau 3-3 Bilan des caractéristiques hydriques isothermes à 23°C Easy R

3.5. Influence de la masse volumique

A l'état sec, la masse volumique apparente du béton de chanvre Easy P constitutif de la paroi est évaluée à 320 kg.m^{-3} (cf. chapitre 1).

L'objectif de cette section est de fournir une estimation des propriétés hygrothermiques du béton de chanvre Easy P.

Il a été montré précédemment que les différentes propriétés hygrothermiques étaient fonction de la teneur en eau. La modélisation de la courbe d'adsorption principale, qui représente l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative et dépend de la compacité du matériau, conditionne ainsi les valeurs de toutes les propriétés hygrothermiques. L'évaluation de la courbe d'adsorption principale du béton de chanvre Easy P est donc nécessaire. Cette évaluation ne pouvant être réalisée expérimentalement (fragilité des échantillons), une identification par analogie est envisagée.

3.5.1. Porosité et teneur en eau

En premier lieu, il convient de déterminer les paramètres structurels de porosité et de teneur en eau. Les porosités et teneurs en eau caractéristiques du béton de chanvre Easy P peuvent être déduites mathématiquement des valeurs obtenues avec le béton de chanvre Easy R puisque les caractéristiques de leurs éléments constituants sont identiques. En utilisant les expressions de porosité totale et de teneur en eau maximale présentées au paragraphe 3.2.3., on obtient :

$$n = 84,7 \%$$

$$u_{\max} = 264,9 \%$$

Pour un même volume total, on suppose que le rapport du volume des pores non accessibles sur le volume occupé par le liant est conservé entre les bétons de chanvre Easy R et Easy P. Cette hypothèse suppose que la non accessibilité à l'eau des pores du béton de chanvre est générée par le liant.

On écrit ainsi :

$$\left. \frac{V_{non\ accessible}}{V_{liant}} \right|_{Easy\ R} = \left. \frac{V_{non\ accessible}}{V_{liant}} \right|_{Easy\ P} \quad (3-33)$$

La détermination du volume de liant Easy P s'appuie entre autre sur la conservation du rapport de masse chènevotte/liant :

$$\left. \frac{M_{chenevotte}}{M_{liant}} \right|_{Easy\ R} = \left. \frac{M_{chenevotte}}{M_{liant}} \right|_{Easy\ P} \quad (3-34)$$

Connaissant la composition massique et volumique des différents constituants des bétons de chanvre Easy R et Easy P ainsi que les caractéristiques physiques du béton de chanvre Easy R, on détermine la porosité ouverte du béton de chanvre Easy P :

$$n_0 = 76,9 \%$$

On en déduit ainsi la teneur en eau à saturation :

$$u_{\text{sat}} = 240 \%$$

Le tableau 3-4 compare et synthétise les propriétés physiques des bétons de chanvre Easy R et Easy P.

Caractéristique	Easy R	Easy P
Porosité totale n	78,6 %	84,7 %
Porosité ouverte n_0	67,6 %	76,9 %
Teneur en eau maximale u_{max}	174,6 %	264,9 %
Teneur en eau à saturation u_{sat}	150 %	240 %

Tableau 3-4 Porosités et teneurs en eau caractéristiques des bétons de chanvre Easy R et Easy P

Il se dégage de cette comparaison que le processus de compactage qui conduit à une augmentation de la masse volumique apparente entraîne une diminution de la porosité totale et surtout de la porosité ouverte qui renseigne sur l'accessibilité des pores à l'humidité. En conséquence, les teneurs en eau maximale et à saturation s'en trouvent également diminuées.

Ces données sont utiles dans la mesure où elles permettent de mieux comprendre le comportement hydrique du béton de chanvre notamment dans la perspective de construction d'une courbe d'adsorption principale.

Bien qu'ils soient de même composition, cette différence de masse volumique implique que ces deux bétons de chanvre ont une structure porale différente et corrélativement des propriétés hygrothermiques différentes.

3.5.2. Teneur en eau et courbe d'adsorption principale

L'analyse de l'influence de la masse volumique sur l'évolution de la teneur en eau s'appuie sur des données de la littérature et des expériences complémentaires réalisées au laboratoire. Peu de travaux se sont intéressés à l'influence de la masse volumique sur l'évolution de la teneur en eau pour des bétons de chanvre issus d'une même formulation c'est-à-dire ayant les mêmes rapports massiques chènevotte/liant. Dans la majorité des travaux, l'effet du dosage plutôt que du compactage est étudié. Toutefois dans [Collet 2004], des essais de sorption sont menés sur deux bétons de chanvre notés A et B issus d'une même formulation mais de masse volumique apparente à l'état sec légèrement différents (390 kg.m^{-3} pour le béton A et

425 kg.m⁻³ pour le béton B). D'un point de vue qualitatif, on peut noter que l'isotherme d'adsorption principale du béton de chanvre le plus léger se trouve légèrement au-dessus de celui du plus lourd, quelle que soit l'humidité relative considérée. En effet, comme il a été montré au paragraphe précédent sur les bétons de chanvre Easy R et Easy P, plus la masse volumique est faible plus la porosité ouverte est grande. Ainsi, davantage de pores sont accessibles à l'eau et leur interconnexion favorisent le transit et le stockage d'humidité.

Dès lors, il est intéressant de se demander comment évolue quantitativement la teneur en eau du béton de chanvre fabriquée par Easychanvre en fonction de la masse volumique. Pour répondre à cette question, des essais de sorption complémentaires ont été menés dans le cadre de cette thèse. Ces essais ont été réalisés à partir d'un bloc de masse volumique apparente normative à 23°C et 50%HR plus basse que la moyenne (418 kg.m⁻³ contre 460 kg.m⁻³ cf. paragraphe 3.2.1.). Ce béton de chanvre est nommé Easy R-bis.

3.5.2.1. Processus et résultats expérimentaux

L'objectif de la campagne expérimentale menée est de déterminer la courbe d'adsorption principale du béton de chanvre Easy R-bis à la température de référence de 23°C à partir d'échantillons dont le VER est respecté. Le processus expérimental utilisé est en tout point similaire à celui décrit au paragraphe 3.4.1. Les méthodes utilisées sont ainsi celles de la chambre humide et du dessiccateur. Initialement, les échantillons sont séchés sous vide dans un tube étanche dans lequel se trouve du gel de silice (cf. figure 3-31).

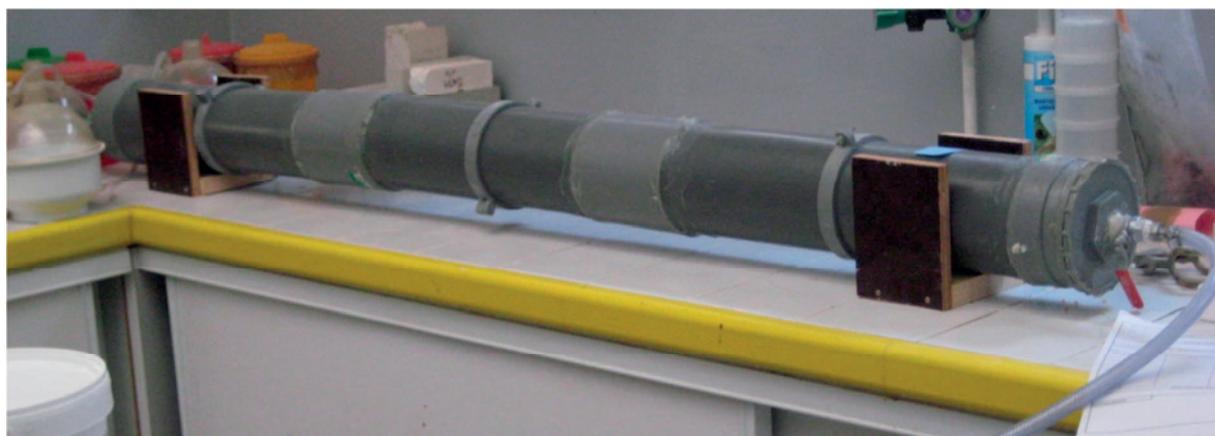


Figure 3-31 Tube étanche

A l'état sec, sa masse volumique apparente est évaluée à 396 ± 45 kg.m⁻³ sur une série de 12 échantillons comme le montre la figure 3-32.

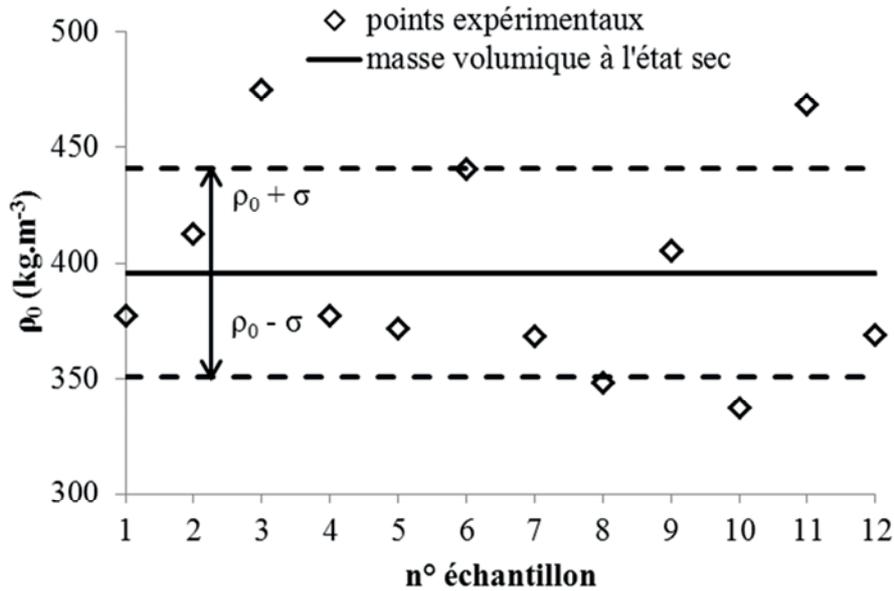


Figure 3-32 Masse volumique apparente à l'état sec - Easy R-bis -

Ainsi, après avoir été découpés puis séchés sous vide en présence de gel de silice, ces échantillons ont été soumis à des humidités relatives croissantes (23%HR, 53%HR et 81%HR).

La figure 3-33 compare les points expérimentaux obtenus pour les bétons de chanvre Easy R et Easy R-bis de masse volumique sèche 450 kg.m⁻³ et 396 kg.m⁻³.

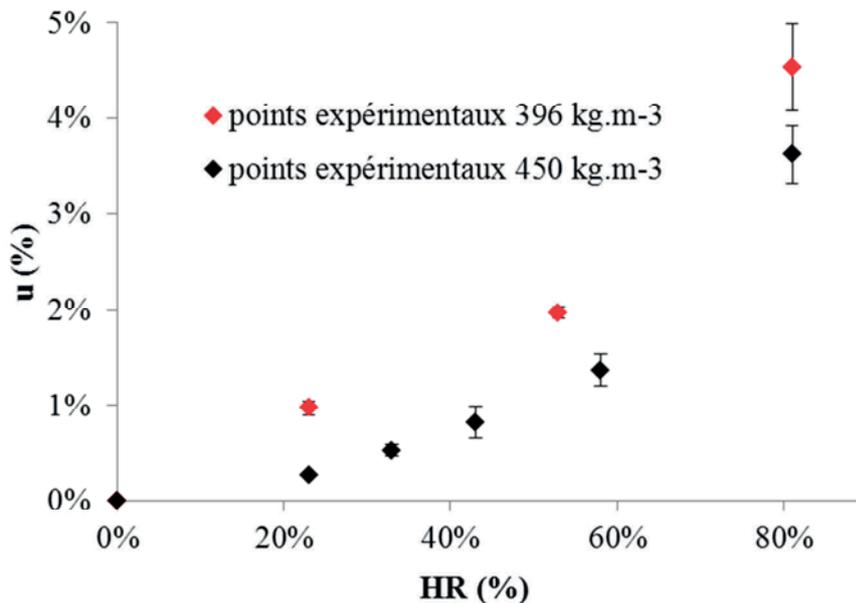


Figure 3-33 Points expérimentaux des courbes principales d'adsorption pour des bétons de chanvre Easy R-bis et Easy R

On peut tout d'abord noter que les points expérimentaux obtenus à 450 kg.m⁻³ sont bien en-dessous de ceux obtenus à 396 kg.m⁻³.

3.5.2.2. Analyse

Afin d'évaluer le décalage qu'il existe entre l'isotherme d'adsorption à 450 kg.m^{-3} et celui à 396 kg.m^{-3} , on choisit de comparer les volumes d'eau présents dans les matériaux en fonction de l'humidité.

Pour ce faire, on utilise la relation qui relie teneur en eau massique u et teneur en eau volumique θ :

$$u = \frac{\rho_w}{\rho_0} \theta \quad (3-35)$$

La teneur en eau volumique s'exprime comme le rapport du volume occupé par l'eau V_w sur le volume total V_t :

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (3-36)$$

On peut ainsi exprimer le volume d'eau pour 1 m^3 de matériau par l'expression :

$$V_w = \frac{\rho_0}{\rho_w} u \quad (3-37)$$

La figure 3-34 représente le volume occupé par l'eau par mètre cube de matériau en fonction de l'humidité relative.

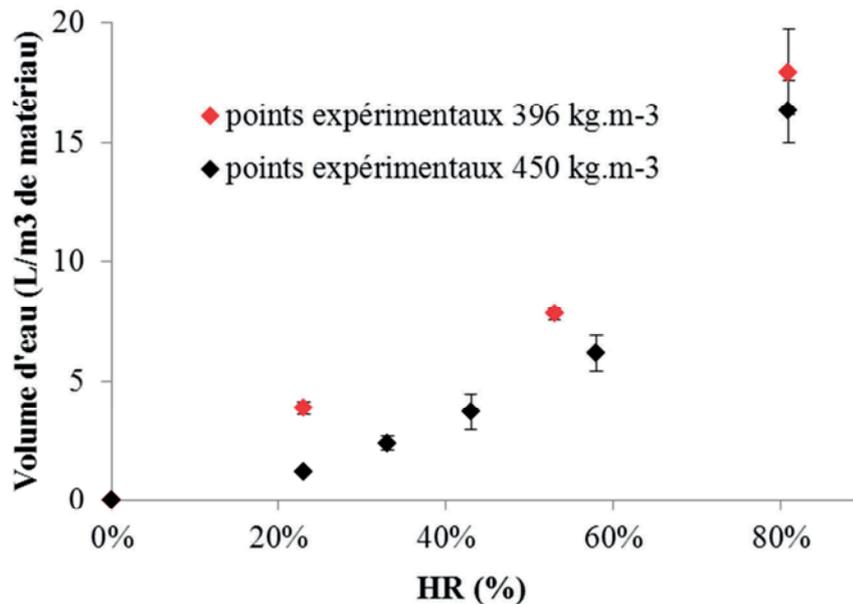


Figure 3-34 Volume d'eau par mètre cube de matériau des bétons de chanvre Easy R-bis et Easy R

Aux humidités basses (23%HR) et moyennes (autour de 50%HR), l'écart entre les volumes d'eau obtenus pour les deux bétons de chanvre reste pratiquement identique. Cet écart semble

légèrement diminuer pour des humidités plus importantes (81%HR). Le tableau 3-5 relève ces écarts.

Humidité relative	Ecart de volume (pour 1 m ³ de matériau)
23%	2,65 L
53%	2,65 L
81%	1,65 L

Tableau 3-5 *Écarts de volume d'eau normalisé observés entre les bétons de chanvre Easy R et Easy R-bis*

Le raisonnement suivant tente de comprendre et d'expliquer cette observation.

Aux très faibles humidités, la teneur en eau du matériau augmente par le recouvrement de la surface porale d'une première couche de molécules d'eau. C'est le lieu de l'adsorption monomoléculaire. Comme le démontre la théorie de Langmuir, cette phase d'adsorption monomoléculaire a lieu à de très faibles humidités relatives (<10-20%HR). Lorsque le recouvrement est total, la teneur en eau atteint alors une valeur donnée appelée teneur en eau moléculaire et notée u_m . Il convient de préciser que cette teneur en eau moléculaire n'est pas nécessairement atteinte en phase d'adsorption monomoléculaire. En effet, les molécules d'eau sont susceptibles de se superposer avant que la surface porale ne soit complètement remplie par une couche de molécules d'eau. L'hypothèse qui est mise en avant est de supposer que cette teneur en eau moléculaire est atteinte rapidement pour de faibles humidités relatives (<20%). A cette teneur en eau moléculaire correspond un volume d'eau normalisé équivalent V_m :

$$V_m = \frac{\rho_0}{\rho_w} u_m \quad (3-38)$$

En outre, puisque la porosité ouverte est plus grande pour un béton de chanvre de masse volumique 396 kg.m⁻³ que pour un béton de chanvre de masse volumique 450 kg.m⁻³, la surface porale totale y est donc plus importante. En conséquence, le volume occupé par la première couche de molécules d'eau est plus important pour un béton de chanvre de masse volumique plus faible. Des mesures expérimentales complémentaires sont toutefois à envisager afin d'étayer cette hypothèse. La figure 3-35 schématise ce processus.

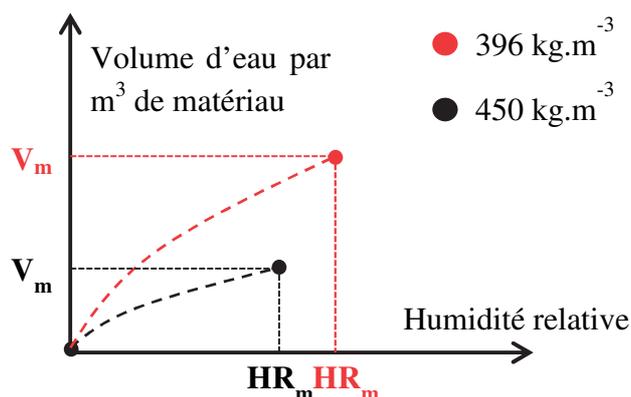


Figure 3-35 Evolution du volume d'eau normalisé aux très faibles humidités relatives

Il est à noter que le volume moléculaire n'est évidemment pas atteint pour les mêmes humidités relatives (HR_m) selon la masse volumique du matériau.

En s'appuyant sur les observations expérimentales décrites précédemment (figure 3-34), durant la phase d'adsorption polymoléculaire, une fois atteinte la teneur en eau moléculaire, on admet que l'écart des volumes occupés par l'eau dans le matériau reste constant entre les deux bétons de chanvre. Cet écart est ainsi supposé maintenu jusqu'à la formation de ponts liquides et au remplissage des pores par condensation capillaire. Cette condensation capillaire se produit plus rapidement pour un béton de masse volumique élevée (à partir d'une humidité relative critique notée HR_c sur la figure 3-36). En effet, le compactage, entraînant une augmentation de la masse volumique, a tendance à resserrer les pores et ainsi favoriser les mécanismes liés à la condensation capillaire. Dès lors qu'apparaît ce phénomène, le volume d'eau s'accroît jusqu'à saturer le volume accessible offert par la porosité ouverte.

A 396 kg.m^{-3} , en adoptant la même démarche que celle utilisée pour béton de chanvre à 320 kg.m^{-3} , on montre que la porosité ouverte est de 71,5% et la teneur eau à saturation de 180,5% ce qui explique que le volume accessible à l'eau du béton de chanvre Easy R-bis soit plus important que celui du béton de chanvre Easy R de masse volumique plus faible.

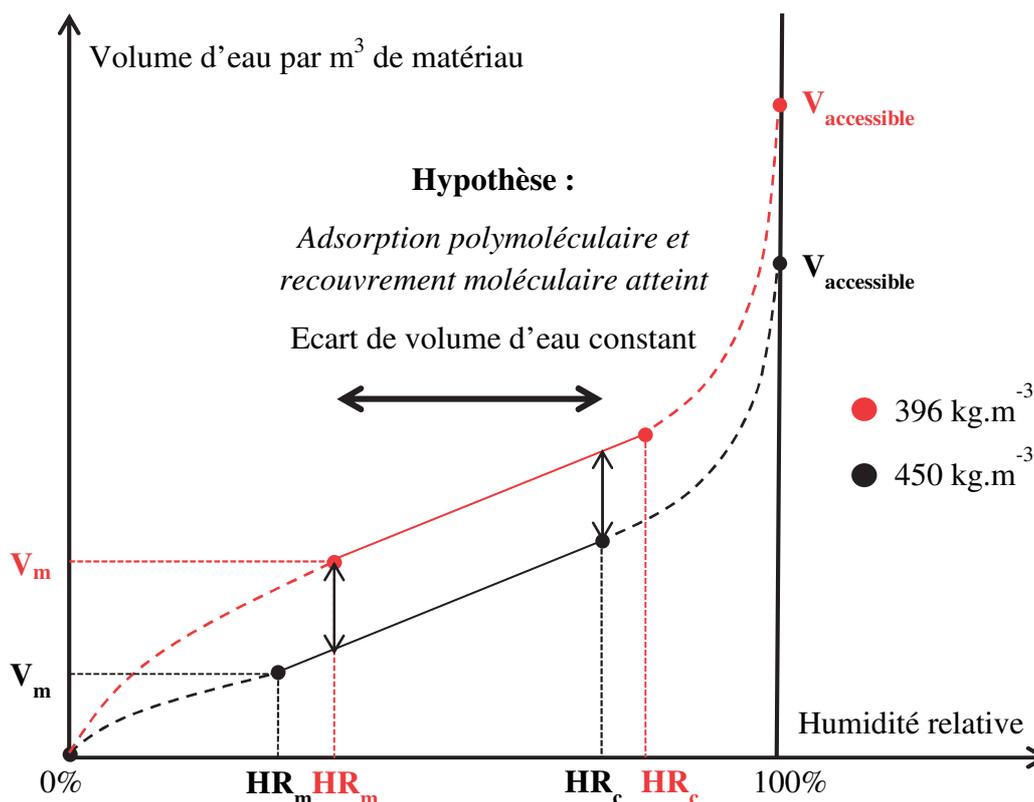


Figure 3-36 Evolution théorique du volume d'eau par mètre cube de matériau des bétons de chanvre en fonction de la masse volumique

Le décalage du début de la phase de condensation capillaire pour les deux bétons de chanvre peut expliquer la légère diminution de l'écart des volumes d'eau observé à 81%HR.

Dès lors, l'objectif est de se servir de ces arguments pour construire la branche d'adsorption principale du béton de chanvre Easy P.

Basé sur l'hypothèse forte de conservation de l'écart de volume d'eau pendant l'adsorption polymoléculaire une fois le recouvrement moléculaire atteint, le raisonnement mené jusqu'ici propose une approche qualitative qui tente d'expliquer l'influence d'une variation de la masse volumique sur l'évolution de la teneur en eau en phase d'adsorption.

Cependant, d'un point de vue quantitatif, il se heurte à la méconnaissance des humidités moléculaires (HR_m) d'une part et de transition entre phase d'adsorption polymoléculaire et condensation capillaire d'autre part (HR_c). L'évolution réelle de la teneur en eau aux très faibles et aux très fortes humidités reste donc partiellement inconnue. De plus, l'écart qui sépare les courbes d'adsorption principale à 396 kg.m⁻³ (Easy R-bis) et 320 kg.m⁻³ (Easy P) demeure fondamentalement inconnu. L'absence de données expérimentales reste ainsi très préjudiciable dans la perspective de connaissance précise du comportement du béton de chanvre à 320 kg.m⁻³.

On décide d'utiliser le modèle de Van Genuchten dont les coefficients sont déterminés par la méthode des moindres carrés. On choisit de privilégier l'optimisation du comportement en phase d'adsorption aux humidités usuelles. Ce choix contraint par les données expérimentales

nécessite une restriction du domaine de validité du modèle à 90%HR. En effet, si aux très faibles humidités, le choix de modélisation ne soulève pas d'incohérence physique ce n'est pas le cas aux très fortes humidités. En effet, le formalisme mathématique adopté de Van Genuchten entraîne un croisement des courbes après 90%HR alors qu'il a été justifié précédemment que la branche d'adsorption d'un béton plus léger doit se trouver nécessairement au-dessus de celle d'un béton plus lourd. Ce croisement est dû au choix de modélisation effectué. Cependant, le manque de valeurs expérimentales et la méconnaissance de l'évolution de la teneur en eau aux très fortes humidités ainsi que l'incertitude liée à la valeur réelle de la teneur en eau à saturation sont autant d'obstacles à une modélisation réaliste dans cette gamme d'humidité. Ceci-dit, cette anomalie d'origine mathématique n'est pas préjudiciable à notre modélisation qui se contente de traduire le comportement aux humidités usuelles.

On s'appuie donc sur ce raisonnement et ses limites afin de construire la branche d'adsorption principale d'un béton de chanvre Easy P.

A 320 kg.m^{-3} , la courbe d'adsorption principale est construite de telle manière que l'écart de volume d'eau entre cette courbe et la courbe à 396 kg.m^{-3} soit proportionnel à l'écart qu'il existe entre la courbe à 450 kg.m^{-3} et la courbe à 396 kg.m^{-3} . Il est ainsi arrondi à 3,5 L à 23%HR et 53%HR et à 2,3 L à 81%HR. Rien ne permet de justifier physiquement le choix de ces écarts et de ce point de vue il est tout à fait critiquable. Il permet avant tout de répondre à l'objectif fixé d'estimer la courbe d'adsorption principale du béton de chanvre Easy P sur les plages d'humidités usuelles. Toutefois, des mesures expérimentales complémentaires réalisées à 23%HR et 69%HR ont montrées la pertinence de la modélisation adoptée.

La figure 3-37 représente l'évolution des teneurs en eau à 450 kg.m^{-3} , 396 kg.m^{-3} et 320 kg.m^{-3} des bétons de chanvre respectivement Easy R, Easy R-bis et Easy P sous ces hypothèses.

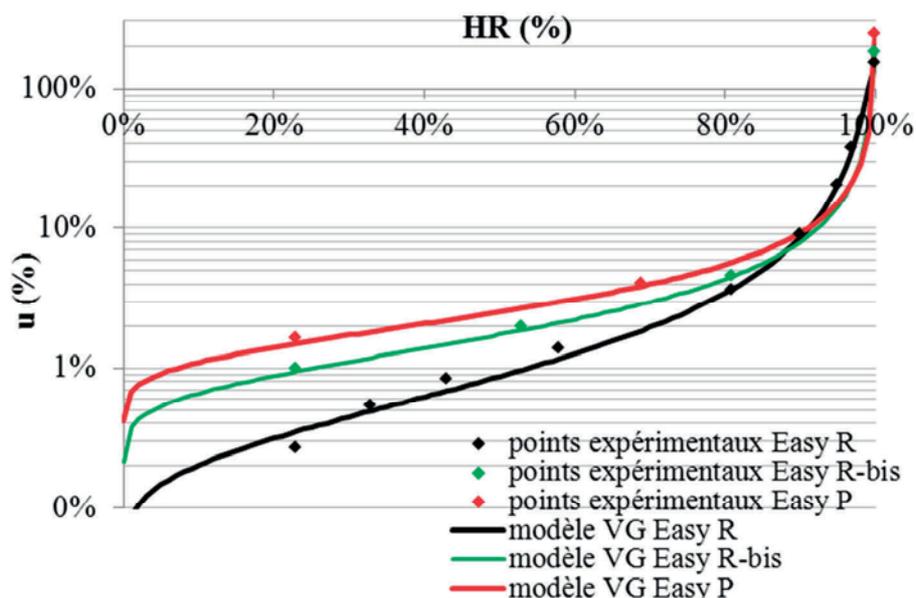


Figure 3-37 Evolution de la teneur en eau en fonction de la masse volumique

Par ailleurs, la figure 3-38 compare les capacités hydriques massiques expérimentales ($du/d\phi$ exprimée en %) des courbes d'adsorption principale obtenues à partir des échantillons Easy R à celles des échantillons Easy R-bis.

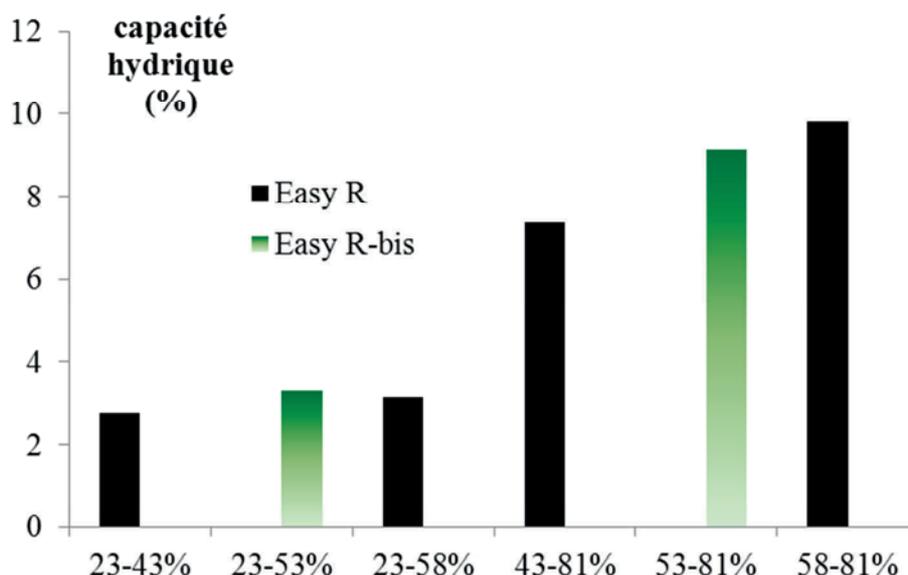


Figure 3-38 Capacités hydriques massiques expérimentales - adsorption principale -

Les capacités hydriques théoriques issues du modèle de Van Genuchten sont présentées en parallèle pour les trois bétons de chanvre Easy R, Easy R-bis et Easy P (figure 3-39). Ces capacités sont ici linéarisées.

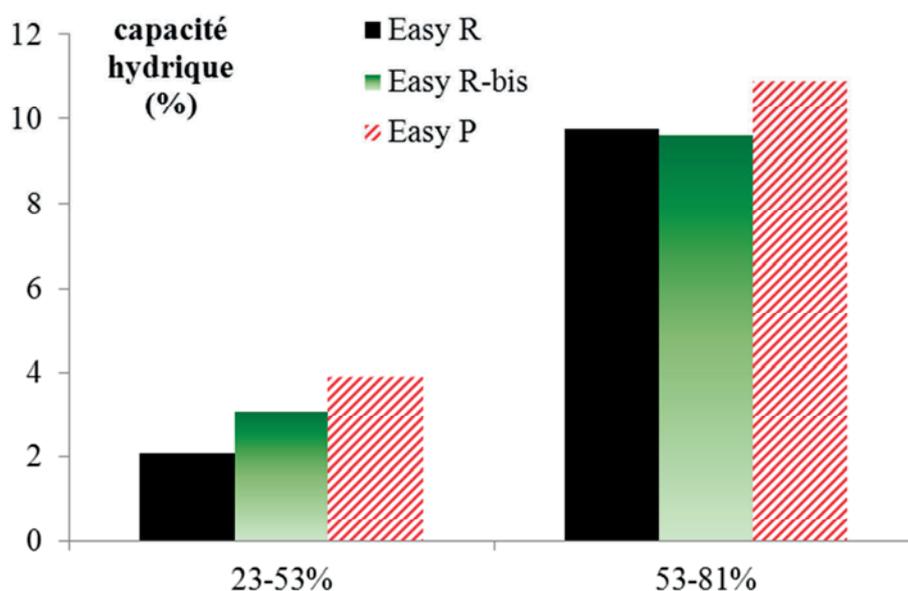


Figure 3-39 Capacités hydriques massiques théoriques - adsorption principale -

La confrontation des capacités hydriques massiques théoriques et expérimentales en phase d'adsorption principale des bétons de chanvre Easy R et Easy R-bis (figure 3-38 et 3-39) vient confirmer la pertinence de la modélisation adoptée jusqu'ici pour les modéliser. Par ailleurs, il

apparaît que les capacités hydriques, aussi bien expérimentales que théoriques, des différents bétons de chanvre sont relativement similaires.

La proximité des valeurs obtenues montrent que la capacité hydrique massique de stockage en phase d'adsorption principale est très peu sensible à la masse volumique de l'échantillonnage (dans la gamme d'humidité étudiée).

3.5.3. *Transport d'humidité*

Afin d'estimer l'impact de la masse volumique sur le transport d'humidité, on se base sur les travaux de la littérature à ce sujet. Le manque de données expérimentales concernant le béton de chanvre Easychanvre nous contraint à adopter cette démarche.

A ce titre, les travaux d'Evrard [Evrard 2006] sont une source d'information précieuse. En effet, Evrard a mesuré l'influence de la masse volumique sur le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur pour des bétons de chanvre issus d'une même composition. La différence de masse volumique de ces échantillons provient du processus de fabrication du béton de chanvre notamment sur les étapes de compactage et de malaxage. Le tableau 3-6 présente les masses volumiques et les facteurs de résistance à la diffusion de la vapeur μ_0 qu'il a mesuré après séchage en fonction du processus de fabrication. Ces derniers sont mesurés en procédant aux essais à la coupelle pour un couple d'humidité 3%HR-50%HR.

Process	Masse volumique sèche	μ_0
Référence	400 kg.m ⁻³	5,02
Fort compactage	466 kg.m ⁻³	3,59
Faible compactage	308 kg.m ⁻³	7,68
Malaxage violent	399 kg.m ⁻³	4,34

Tableau 3-6 Influence du processus de fabrication sur la masse volumique sèche et le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur

Les valeurs de masse volumique sèche qu'il obtient sont comparables à celles étudiées dans ce travail :

- pour un fort compactage, la masse volumique sèche est proche de celle de nos échantillons Easy R (450 kg.m⁻³)
- pour un faible compactage, elle est proche de celle de nos échantillons représentatifs de la paroi Easy P (320 kg.m⁻³)

Avec l'augmentation de la masse volumique, on constate que le compactage a pour effet d'augmenter la résistance à la diffusion de la vapeur du matériau.

D'un point de vue physique, il est légitime de penser que la modification de la structure poreuse entraîne des modifications des modes de transport de l'humidité à travers le béton de chanvre.

En effet, bien qu'il soit a priori difficile d'évaluer précisément l'influence du compactage sur la connexion des pores, l'augmentation de la porosité ouverte du matériau favorise les échanges hygrothermiques en facilitant notamment la migration de l'humidité.

Les travaux d'Evrard nous permettent donc d'estimer l'influence de la masse volumique sur le transport en phase vapeur dans le béton de chanvre. Dans notre gamme de masse volumique (Easy R à 450 kg.m^{-3} et Easy P à 320 kg.m^{-3}), la perméabilité à la vapeur est ainsi susceptible de passer du simple au double. En d'autres termes, le facteur de diffusion à la vapeur est divisé par deux.

Des essais à la coupelle plus nombreux menés à partir de plusieurs couples d'humidités sur le bois confirment cette conclusion ([Timusk 2005] et [Zillig 2005]).

Par extension, on admet de manière générale que la perméabilité apparente à la vapeur du béton de chanvre Easy P à 320 kg.m^{-3} est le double de celle du béton de chanvre Easy R. Dans le modèle de Künzle détaillé au paragraphe 3.4.4. précédent, la perméabilité à la vapeur, constante, est donc doublée alors que le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur est divisé par deux.

$$\begin{aligned}\mu_0|_{Easy P} &= \frac{\mu_0|_{Easy R}}{2} = 1,955 \\ \delta_p|_{Easy P} &= 2 \delta_p|_{Easy R} = 10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}\end{aligned}\quad (3-39)$$

Le facteur de résistance apparent à la diffusion de la vapeur, fonction de la teneur en eau, qui conditionne l'expression de la conductivité liquide a désormais pour expression :

$$\mu^*(u) = \frac{\delta_{p,a}(23^\circ\text{C})}{5,9625 \cdot 10^{-11} e^{23,895.u}} \quad (3-40)$$

La teneur en eau massique critique u_{cr} qui marque l'initiation du transport liquide par diffusion surfacique et condensation capillaire, est évaluée à partir de la condition :

$$\mu^*(u_{cr}) = \mu_0 \quad (3-41)$$

Avec la modélisation de la courbe d'adsorption principale retenue pour le béton de chanvre Easy P, on a :

$$u_{cr} \approx u_{ads}(43\%) \quad (3-42)$$

La figure 3-40, compare la modélisation des coefficients de transport hydrique du béton de chanvre Easy P à ceux du béton de chanvre Easy R :

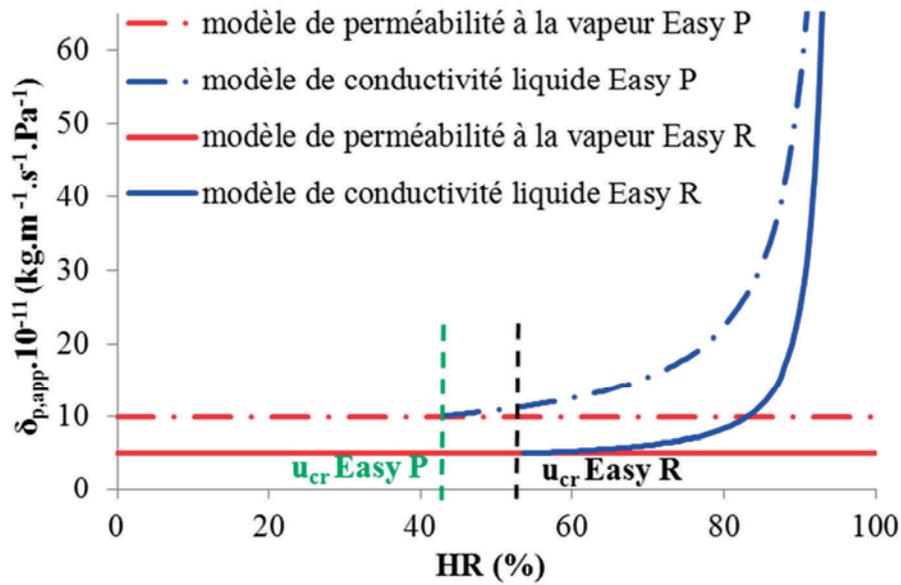


Figure 3-40 Evolution de la perméabilité apparente à la vapeur des bétons de chanvre Easy R et Easy P

Théoriquement, compte tenu de nos hypothèses, la teneur en eau critique devrait être obtenue pour une même valeur d'humidité relative pour les deux bétons de chanvre. La différence qu'il existe n'a pas ici d'origine physique et n'est qu'un artefact mathématique qui provient de l'interpolation effectuée pour construire μ^* .

La modélisation du transport vapeur et liquide à travers le matériau joue un rôle prépondérant dans les distributions d'humidité relative et de température. Ainsi l'augmentation des caractéristiques hydriques de perméabilité à la vapeur et de conductivité liquide favorise la migration de l'humidité. Dans ces conditions, l'évolution de ces coefficients de diffusion isotherme en fonction de la teneur en eau massique est représentée figure 3-41.

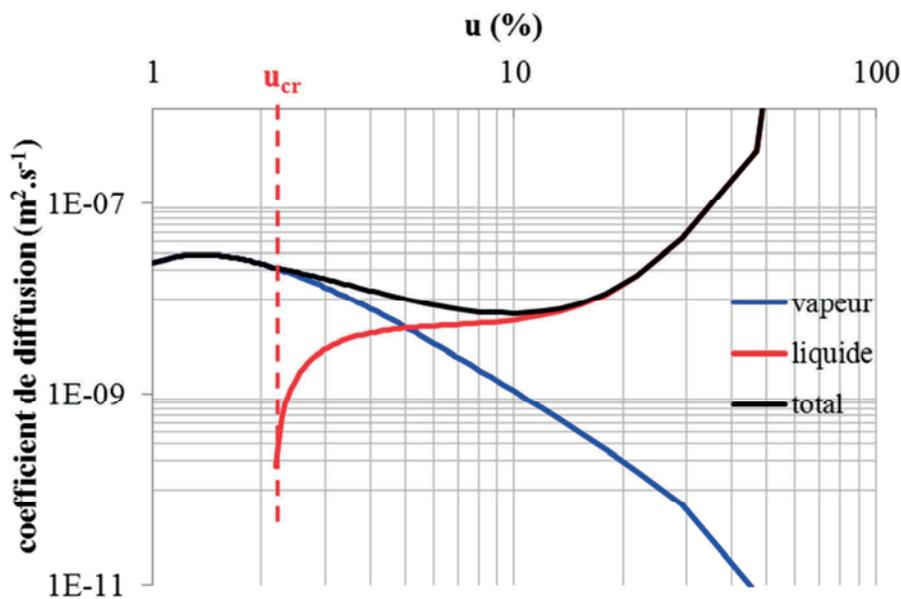


Figure 3-41 Coefficients de diffusion vapeur, liquide et total isothermes Easy P

On constate que le basculement de la prédominance liquide/vapeur se fait autour d'une teneur en eau massique voisine de 5%, valeur légèrement supérieure à celle trouvée pour le béton de chanvre Easy R (autour de 4,5%).

3.5.4. Propriétés thermiques

Une démarche analogue à celle menée sur les caractéristiques hydriques est adoptée.

3.5.4.1. Conductivité thermique

L'influence de la masse volumique sur la conductivité thermique a été largement étudiée dans la littérature. On peut notamment citer les travaux de [Cerezo 2005] qui servent de référence bibliographique à notre analyse. Dans son étude, Cerezo a travaillé avec des bétons de chanvre de formulations différentes et de masses volumiques différentes. A l'état sec, on constate que la conductivité thermique évolue linéairement en fonction de la masse volumique (cf. figure 3-42).

Plus la masse volumique d'un béton de chanvre est faible, plus sa conductivité thermique est faible. En effet, dans un béton de faible masse volumique, davantage d'air est présent à l'intérieur ce qui diminue la capacité du milieu à transmettre la chaleur renforçant ainsi son caractère isolant.

En outre, Cerezo s'est intéressée à l'influence la quantité d'eau présente dans le matériau sur la conductivité thermique en fonction de la masse volumique (cf. figure 3-43).

La conductivité thermique du béton de chanvre évolue de la même manière à l'état humide et à l'état sec en fonction de la masse volumique à savoir globalement linéairement. D'après les résultats de Cerezo, l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique à l'état sec suit une droite de coefficient directeur $2.10^{-4} \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ (identifié à partir de ces essais à 0%HR).

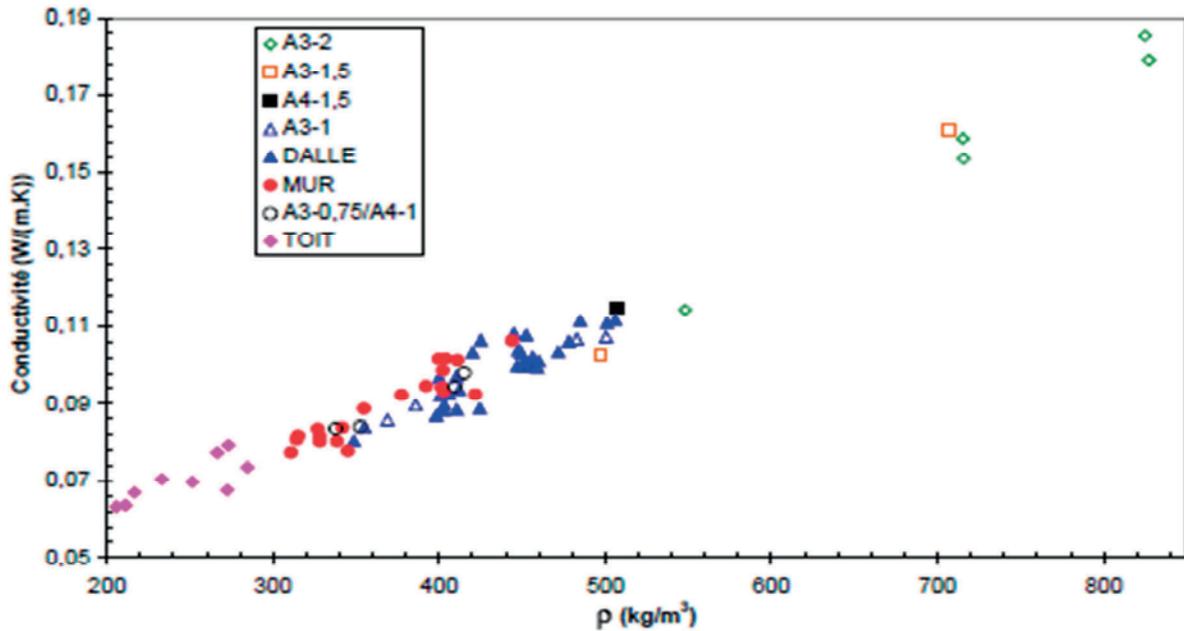


Figure 3-42 Evolution de la conductivité thermique à l'état sec en fonction de la masse volumique [Cerezo 2005]

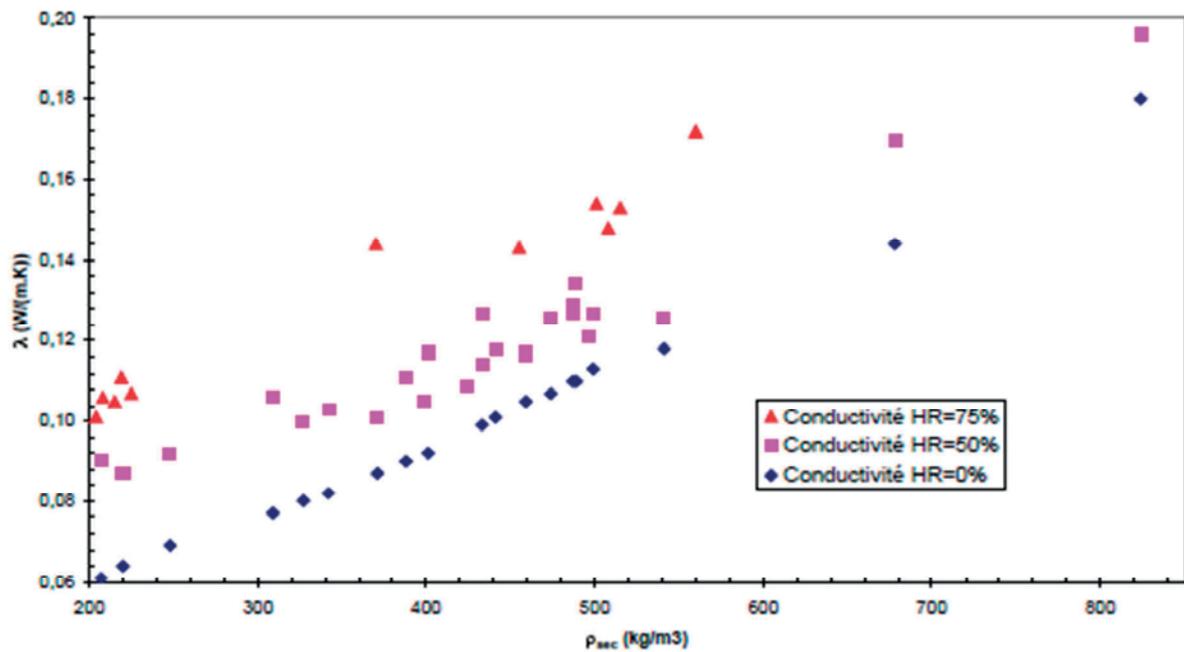


Figure 3-43 Influence de l'humidité sur la conductivité thermique du béton de chanvre [Cerezo 2005]

Au final, pour passer de la conductivité thermique d'un béton de chanvre de masse volumique sèche donnée $\rho_{0,1}$ à celle d'un béton de chanvre de masse volumique $\rho_{0,2}$, il suffit d'effectuer une translation.

La conductivité peut donc s'exprimer, en fonction de la masse volumique et de la teneur en eau par la relation (3-43).

$$\lambda(u_2, \rho_{0,2}) = \lambda(u_1)|_{\rho_{0,1}} + a(\rho_{0,2} - \rho_{0,1}) \quad (3-43)$$

où a est le coefficient directeur de la droite d'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.

En conservant la valeur de coefficient directeur de Cerezo pour notre étude, la conductivité thermique sèche du béton de chanvre Easychanvre est représentée figure 3-44 en fonction de la masse volumique. Les conductivités à l'état sec des bétons de chanvre Easy P et Easy R sont représentés.

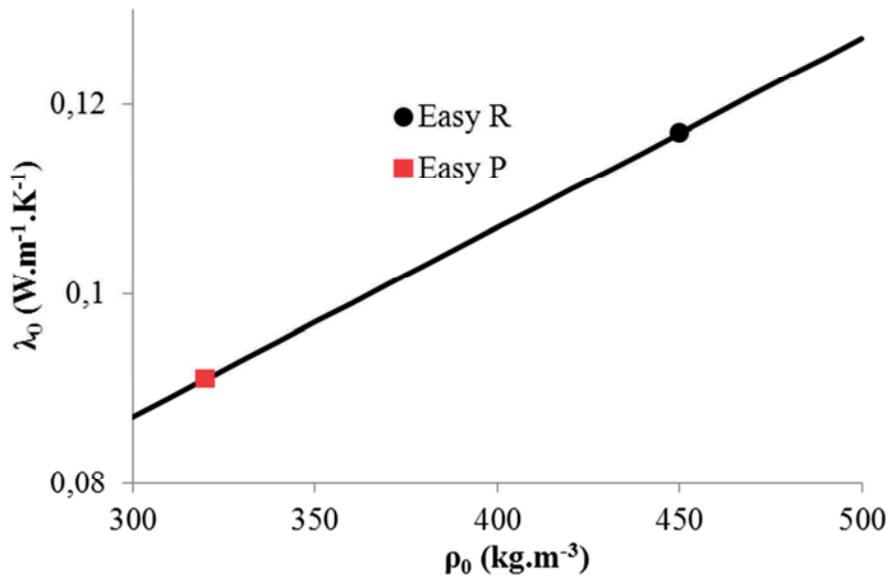


Figure 3-44 Evolution théorique de la conductivité thermique à l'état sec du béton de chanvre Easychanvre en fonction de sa masse volumique

Il est à remarquer que pour une masse volumique nulle, on retrouve pratiquement la conductivité thermique de l'air seul (0,0257 W.m⁻¹.K⁻¹ théoriquement contre 0,027 W.m⁻¹.K⁻¹ à partir de notre modélisation). Ce résultat justifie ainsi la pertinence de la modélisation retenue.

Les conductivités à l'état sec des deux bétons de chanvre sont séparées d'une valeur de 0,026 W.m⁻¹.K⁻¹. Cet écart étant maintenu quelle que soit l'humidité, on obtient :

$$\lambda|_{Easy P} = \lambda(u_{Easy R})|_{Easy R} - 0,026 \quad (3-44)$$

On constate que la conductivité ainsi exprimée est indépendante de la teneur en eau du béton de chanvre Easy P.

Afin d'introduire la dépendance à la teneur en eau du béton de chanvre Easy P de sa conductivité thermique, on admet qu'à l'état saturé, la valeur de λ_s reste inchangée à savoir la conductivité thermique de l'eau liquide de 0,6 W.m⁻¹.K⁻¹. On affecte alors la translation

uniquement à la valeur à l'état sec λ_0 . On obtient une relation analogue à celle développée pour le béton de chanvre Easy R.

La figure 3-45 compare la conductivité thermique du béton de chanvre Easy R à celle du béton de chanvre Easy P en fonction de l'humidité relative.

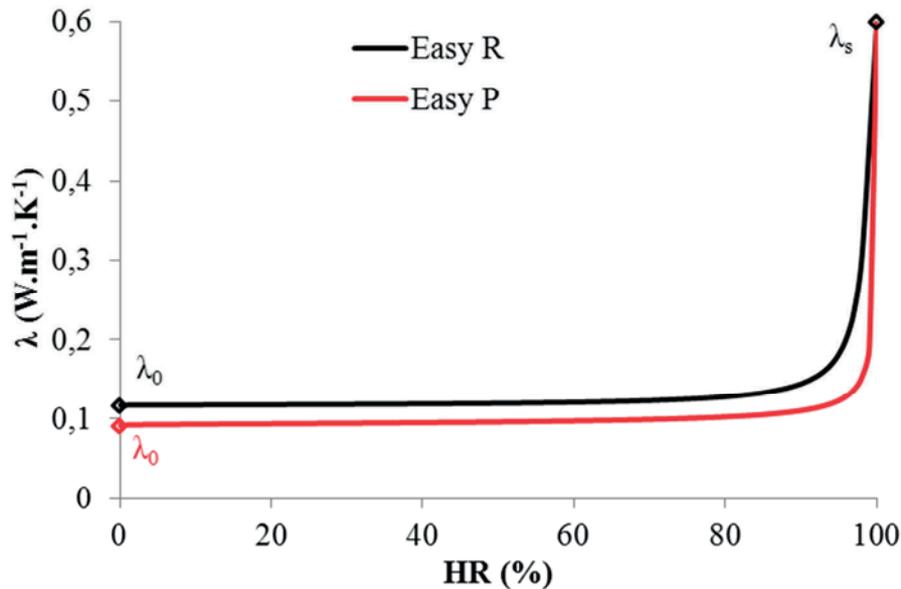


Figure 3-45 Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique selon l'approche adoptée

L'écart de $0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ est conservé sur une large gamme d'humidité relative validant ainsi les observations de Cerezo. Comme le béton de chanvre Easy R, la conductivité du béton de chanvre Easy P reste pratiquement constante sur une large gamme d'humidité relative.

3.5.4.2. Capacité thermique massique

Nous ne disposons d'aucune donnée sur l'influence de la masse volumique sur la capacité thermique massique du béton de chanvre. Compte tenu de leur composition massique Easy R et Easy P équivalente, il est admis que les capacités thermiques sèches des bétons de chanvre Easy R et Easy P sont identiques. La dépendance de la capacité thermique à la teneur en eau est rappelée par la relation (3-45) :

$$c^* = c_0 + \frac{w}{\rho_0} c_l \quad (3-45)$$

3.5.5. Bilan de l'étude

Le travail réalisé nous a permis d'exprimer les propriétés physiques, hydriques et thermiques du béton de chanvre Easy P constitutif de la paroi à partir de la connaissance de sa masse volumique. La modélisation de l'ensemble des propriétés est résumée dans le tableau 3-7.

BILAN	
Propriétés hygrothermiques isothermes du béton de chanvre Easy P	
Quantité	Expression/valeur
Isotherme d'adsorption principale $u_{ads}(\varphi)$	$u = u_{sat} \left(1 + \left \alpha_{ads} \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right ^{\eta_{ads}} \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta_{ads}}\right)}$ $\alpha_{ads} = 0,0747$ $\eta_{ads} = 1,6921$ $u_{sat} = 2,4 \text{ kg/kg}$
Perméabilité à la vapeur δ_p	$10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$
Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur μ_0	1,955
Coefficient de diffusion liquide D_l	$D_l = \left(\frac{1}{\mu^*(u)} - \frac{1}{\mu_0} \right) \delta_{p,a} p_{sat}$
Facteur de résistance apparent à la diffusion de la vapeur μ^*	$\mu^*(u) = \frac{\delta_{p,a}(23^\circ\text{C})}{5,9625 \cdot 10^{-11} e^{23,895.u}}$
Conductivité thermique équivalente λ	$\lambda = \lambda_s + (\lambda_0 - \lambda_s) \frac{w_{sat} - w}{w_{sat}}$ $\lambda_0 = 0,091 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ $\lambda_s = 0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Capacité thermique équivalente c^*	$c^* = c_0 + \frac{w}{\rho_0} c_l$ $C_0 = 1250 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Tableau 3-7 Synthèse des propriétés hygrothermiques du béton de chanvre Easy P

3.6. Conclusion

L'étude des propriétés hygrothermiques du béton de chanvre Easy R effectuée dans ce chapitre permet d'appréhender son comportement. Tout d'abord, la caractérisation expérimentale de ses propriétés justifie son intérêt d'un point de vue performance thermohydrrique en comparaison avec les propriétés de matériaux plus traditionnels. Elle montre en effet le caractère isolant (faible conductivité thermique) et régulateur hydrique (faible résistance apparente à la diffusion de la vapeur et capacité hydrique notable) de ce béton de chanvre. Ensuite, l'effort de modélisation effectué sur les propriétés hygrothermiques du béton de chanvre met en avant une méthode de travail tout à fait applicable à d'autres matériaux poreux et permet son utilisation dans un outil de simulation numérique.

Par ailleurs, la modification de la masse volumique a pour conséquence première d'entraîner une modification de la structure porale du matériau. Ainsi, plus la masse volumique est faible, plus la teneur en eau, pour une humidité relative donnée, est importante. La construction de la courbe d'adsorption principale du béton de chanvre Easy P a ainsi été effectuée à partir de cette observation sous l'hypothèse forte de conservation de l'écart de volume d'eau en phase d'adsorption polymoléculaire une fois atteint le recouvrement de la surface porale par une couche de molécules d'eau. L'estimation réalisée nous permet d'appréhender l'évolution de la teneur en eau du béton de chanvre Easy P. En outre, il est apparu que la diminution de la masse volumique a également pour conséquence de favoriser le transport d'humidité et de renforcer la capacité isolante du matériau. Au-delà de la précision, l'étude réalisée a permis de dégager des ordres de grandeur des propriétés hygrothermiques du béton de chanvre en fonction de sa masse volumique.

Dès lors la question se pose : quelle est l'influence de la masse volumique, caractérisant les différentes propriétés hygrothermiques, sur la réponse du béton de chanvre à des conditions climatiques réalistes ? La sensibilité de cette réponse en humidité et en température (variables d'étude) à la modélisation mathématique et physique des propriétés est-elle importante ?

Le chapitre 4 a pour but de répondre à ces problématiques.

4

Application à une paroi monocouche sous sollicitations isothermes

Ce chapitre présente les résultats d'une application directe du modèle de transferts thermohydriques développé au chapitre 2. Le modèle est alimenté par les valeurs des paramètres caractéristiques des propriétés thermohydriques du béton de chanvre proposées dans le chapitre 3. Les résultats simulés issus de la modélisation sont ainsi confrontés aux résultats expérimentaux recueillis à l'échelle de la paroi étudiée au laboratoire.

SOMMAIRE

<u>4.1.</u>	<u>Introduction</u>	167
<u>4.2.</u>	<u>Présentation de la paroi expérimentale</u>	168
4.2.1.	Description de la paroi	168
4.2.2.	Métrologie mise en place	172
<u>4.3.</u>	<u>Réponse hygrothermique expérimentale de la paroi</u>	177
4.3.1.	Sollicitations climatiques imposées à la paroi.....	177
4.3.2.	Choix d'une séquence d'étude	178
4.3.3.	Analyse des résultats expérimentaux	179
<u>4.4.</u>	<u>Analyse des résultats de la simulation</u>	182
4.4.1.	Cadre de la simulation.....	182
4.4.2.	Etudes des conditions aux limites	182
4.4.3.	Influence de la variation de masse volumique	186
4.4.3.1.	Sensibilité aux paramètres.....	186
4.4.3.2.	Comparaison des bétons de chanvre Easy R et Easy P	190
4.4.3.3.	Analyse du comportement hygrothermique du béton de chanvre.....	191
4.4.4.	Analyse du transfert d'air à travers la paroi	194
4.4.5.	Influence de la position des capteurs.....	198
4.4.6.	Etude d'une autre séquence isotherme	198
4.4.6.1.	Conditions de l'étude	199
4.4.6.2.	Résultats et analyse	199
<u>4.5.</u>	<u>Conclusion</u>	201

4.1. Introduction

Le début de ce chapitre est dédié à la description de la paroi test et à son instrumentation. La métrologie mise en place permet de suivre les distributions d'humidité relative et de température au travers de la paroi et ainsi d'identifier son comportement thermohydrrique expérimental.

Ensuite, les sollicitations climatiques imposées à la paroi sont analysées afin de mettre en évidence le comportement du béton de chanvre en situation réaliste. Dans un premier temps, une séquence de sollicitations isothermes est privilégiée.

Les choix de modélisation effectués au chapitre 3, notamment de caractérisation de l'évolution de teneur et de transport d'humidité, sont discutés au regard des réponses numériques.

Afin de mieux évaluer l'impact des propriétés hygrothermiques, une étude de sensibilité aux paramètres est menée avec un double objectif :

- identifier les paramètres sensibles du modèle
- mesurer l'influence de variation de masse volumique sur les différentes propriétés hygrothermiques, sur la réponse hygrothermique de la paroi en béton de chanvre

Contrairement aux études usuelles, l'étude de cette sensibilité est axée sur l'influence des paramètres en adoptant une réflexion physique plutôt que mathématique. En effet, les études de sensibilité classiques évaluent l'impact d'un paramètre en le faisant varier autour d'une valeur de référence. La démarche adoptée dans ce travail est différente car les valeurs de référence ne sont pas clairement identifiées (propriétés hygrothermiques réelles de la paroi). Le travail de modélisation réalisé au chapitre 3 est ainsi utilisé pour discuter de la sensibilité des résultats de la modélisation aux variations des paramètres caractéristiques des propriétés hygrothermiques des bétons de chanvre de masses volumiques différentes.

4.2. Présentation de la paroi expérimentale

4.2.1. Description de la paroi

La paroi en béton de chanvre réalisée par la société Easychanvre est construite dans une chambre biclimatique (cf. figure 4-1) composée de deux chambres capables d'imposer indépendamment à la paroi des conditions typiques de climat intérieur d'un bâtiment d'une part et de climat extérieur d'autre part.



Figure 4-1 *Chambre biclimatique*

La régulation des paramètres de température et d'hygrométrie est assurée par des régulateurs universels DR4020 permettant de définir le point de consigne et une bande passante qui régit le fonctionnement des équipements de la chambre. Chaque régulateur possède deux sorties :

- pour la température : chauffage/rafraîchissement
- pour l'hygrométrie : humidification/déshumidification

Le chauffage est assuré par des convecteurs, le rafraîchissement et la déshumidification par un groupe frigorifique et l'humidification par des humidificateurs à vapeur.

Les plages de régulation des chambres climatiques sont présentées dans le tableau 4-1.

	Climat intérieur	Climat extérieur
Humidité relative	30 à 60 % \pm 2%	30 à 90 % \pm 2%
Température	18 à 27 °C \pm 0,5°C	-5 à 35 °C \pm 0,5°C

Tableau 4-1 *Plages de régulation de chaque chambre*

Les dimensions des chambres sont indiquées figure 4-2.

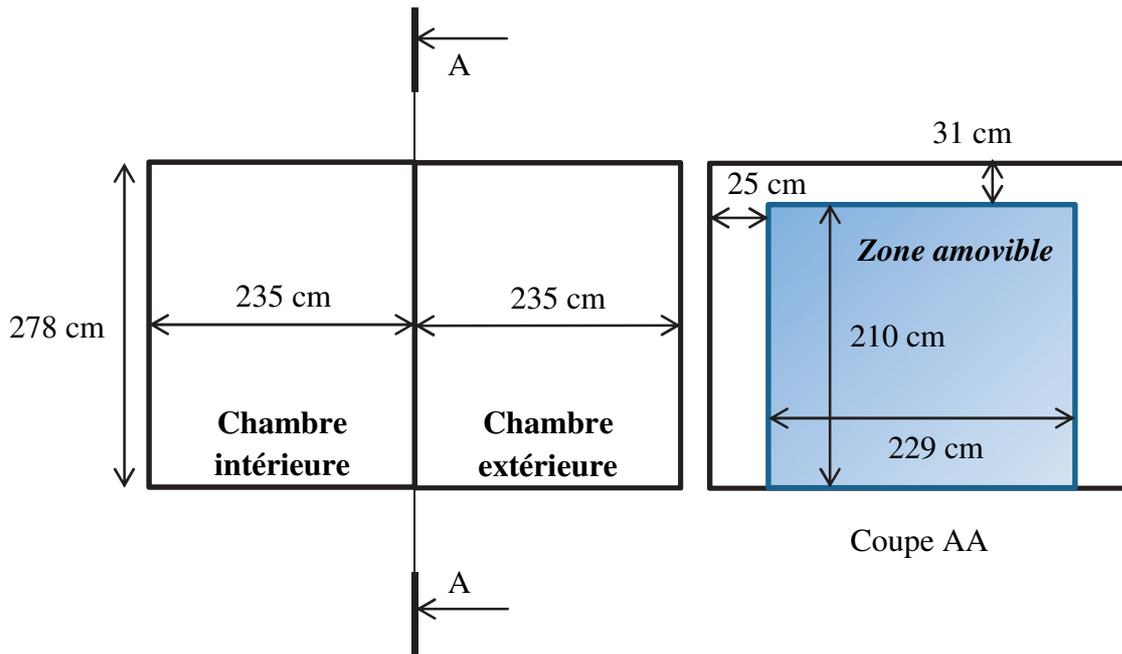


Figure 4-2 Représentation schématique de la chambre biclimatique

La zone centrale amovible est maintenue par une lèvre de 55 mm de haut et d'épaisseur 60 mm faisant tout le tour de la partie fixe. Les parois sont composées de panneaux sandwich polyuréthane de 60 mm d'épaisseur ($U = 0,40 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) afin de limiter les effets des variations climatiques externes sur les climats des chambres. Les chambres possèdent également chacune une porte de 85 cm de large et de 190 cm de haut.

Lors de la mise en œuvre courant 2009, la cloison séparative a été retirée pour laisser place à la paroi expérimentale en béton de chanvre (figure 4-3).

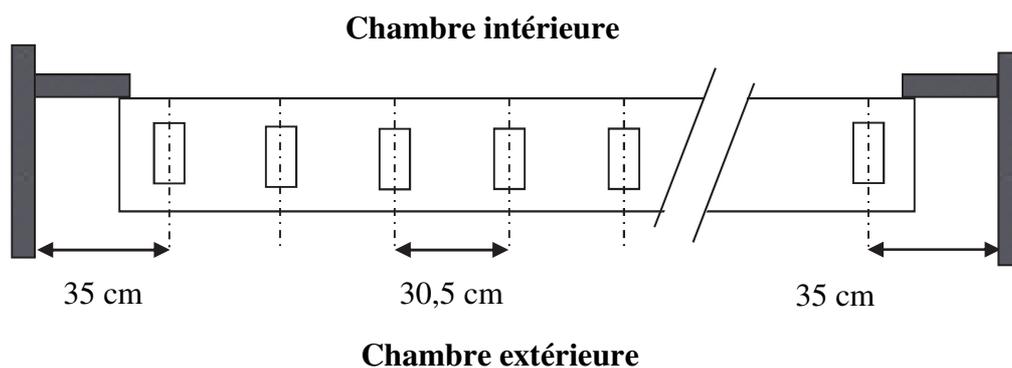


Figure 4-3 Vue de dessus de la paroi en béton de chanvre installée dans la chambre biclimatique

La paroi réalisée est composée de 31 blocs préfabriqués de béton de chanvre de 30 cm de large, 30 cm de haut et 60 cm de long (cf. figure 4-4).



Figure 4-4 Bloc préfabriqué de béton de chanvre vu de dessus

Les blocs comprennent chacun deux réservations rectangulaires de $8 \times 18 \text{ cm}^2$ destinées à recevoir les poteaux en bois lors du montage de la paroi ainsi que quatre réservations de 5 cm de diamètre destinées à recevoir les différents réseaux d'un bâtiment (électricité, eau...).

Le première rangée est mise à niveau et est fixée au sol par un mortier. Les rangées suivantes sont encollées dessus, dessous et sur les côtés. Le mortier utilisé est composé de 25 kilogrammes de chaux hydraulique naturelle pure (Calcia tradition Rénochaux) et de 10 litres d'eau. La découpe des blocs est réalisée à la scie. Les joints entre blocs sont remplis de chanvre liés avec le mortier précédent.

Les poteaux en bois sont mis en place lorsque la deuxième rangée de blocs est posée. Ces poteaux ont une section de $15 \times 5 \text{ cm}^2$. Pour des raisons de facilité de mise en œuvre, les poteaux sont en deux parties ($\approx 1,20 + 0,80 \text{ m}$) et s'arrêtent à environ 40 cm du plafond. L'espace entre les poteaux et la paroi intérieure des réservations est rempli avec un mortier composé de 25 kilogrammes de chaux (Calcia tradition Rénochaux) et 35 litres d'eau.

La figure 4-5 illustre ces différentes étapes de réalisation de la paroi.



1) Mise en place de la première rangée de blocs



2) Mise en place des autres rangées de blocs



3) Découpe des blocs



4) Remplissage des joints entre blocs



5) Remplissage de l'espace poteau-réservation



6) Paroi achevée

Figure 4-5 *Processus de mise en place de la paroi en béton de chanvre*

La structure générale de la paroi réalisée est schématisée figure 4-6.

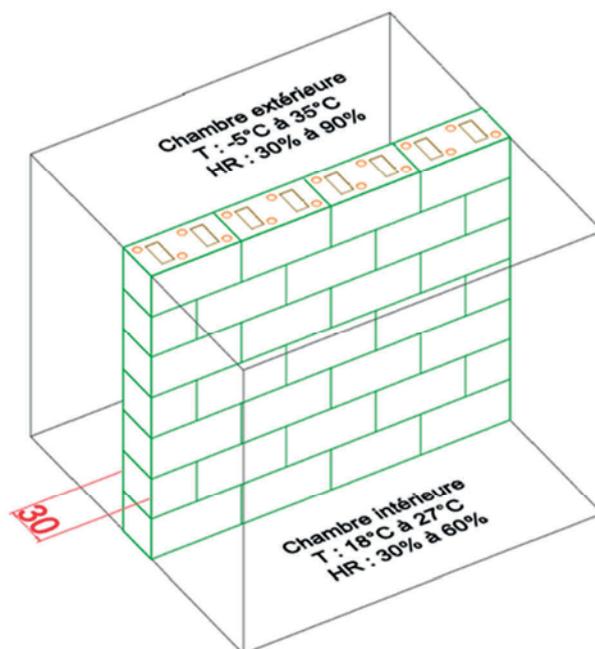


Figure 4-6 Représentation de la paroi en béton de chanvre installée dans la chambre biclimatique

4.2.2. Métrologie mise en place

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 fonctions des conditions climatiques auxquelles elle est soumise.

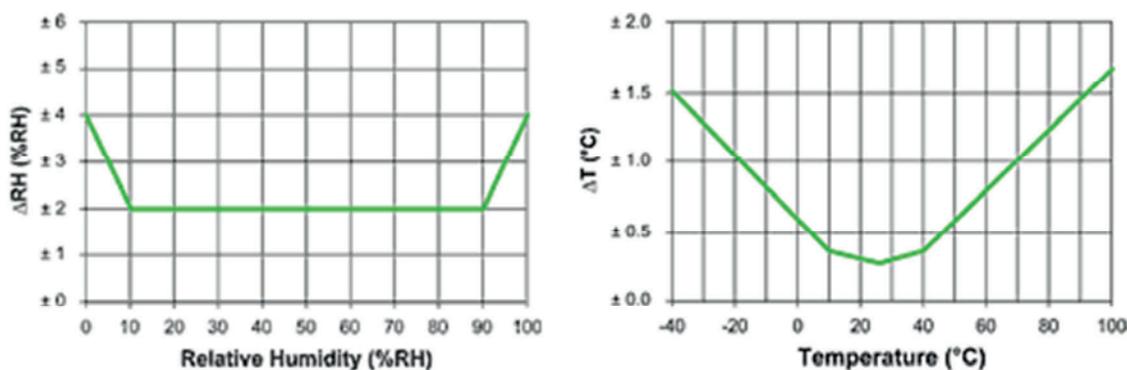


Figure 4-7 Incertitudes minimales - données fabricant²⁸ -

Ainsi, le suivi des humidités relatives et des températures est réalisé respectivement à l'aide de capteurs d'humidité (commercialisés par la société Sensirion®) et de thermocouples. Les thermocouples sont de type K et possèdent une incertitude de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Ils ont été vérifiés préalablement à leur mise en place à des températures de 0°C , 10°C , 20°C et 30°C . Les capteurs Sensirion SHT75 sont capables de fournir à la fois des relevés de température et

²⁸ Données Sensirion®

d'humidité. Les marges d'incertitude minimales évaluées par le fabricant sont présentées figure 4-7.

L'interdépendance de la température et de l'humidité relative est susceptible de générer des valeurs d'incertitudes bien plus élevées. Selon le fabricant, à 25°C, la précision en température est de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ et $\pm 1,8\% \text{HR}$ sur la plage d'humidité 10-90%HR.

Le suivi des températures et des humidités est effectué en plusieurs endroits. Les blocs sont numérotés de 1 à 31 afin de mieux les identifier. Tout d'abord, les ambiances sont contrôlées avec des capteurs situés à 1 m de la paroi et à un mètre du sol (cf. figure 4-8).



Figure 4-8 *Contrôle de l'ambiance effectué à 1 m du sol*

Un suivi en proche surface est également réalisé (cf. figure 4-9).

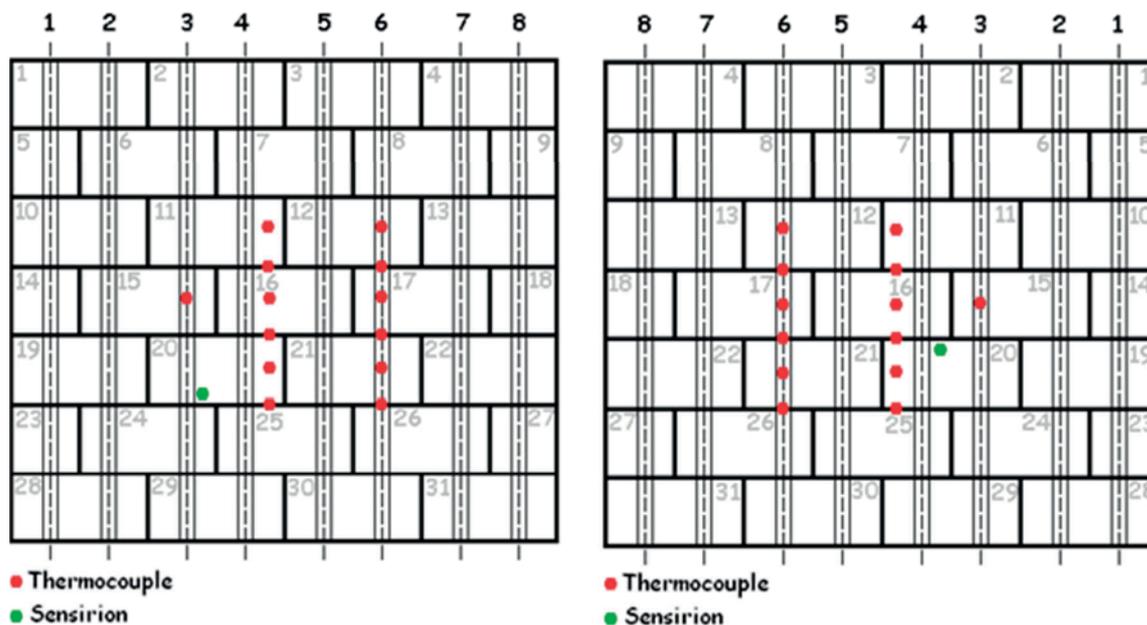


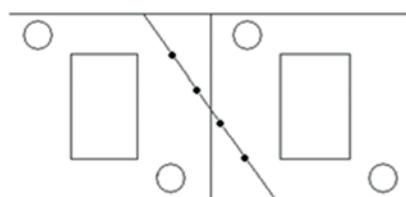
Figure 4-9 *Métriologie de la surface intérieure (à gauche) et de la surface extérieure (à droite)*

A l'intérieur de la paroi, les capteurs sont placés :

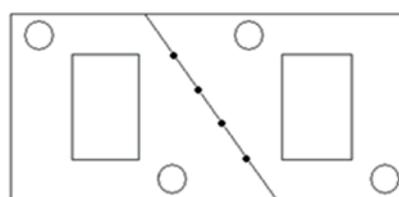
- Dans la partie courante de béton de chanvre
- Au droit des ossatures en bois
- Dans les trous de réservation

Dans le cadre de l'étude réalisée, la partie courante de béton de chanvre est privilégiée. Deux configurations sont alors rencontrées (cf. figure 4-10):

- Au cœur d'un bloc
- A l'interface entre deux blocs



Interface entre deux blocs



Au cœur d'un bloc

Figure 4-10 *Métriologie dans la partie courante en béton de chanvre*

Les blocs instrumentés sont représentés schématiquement figure 4-11.

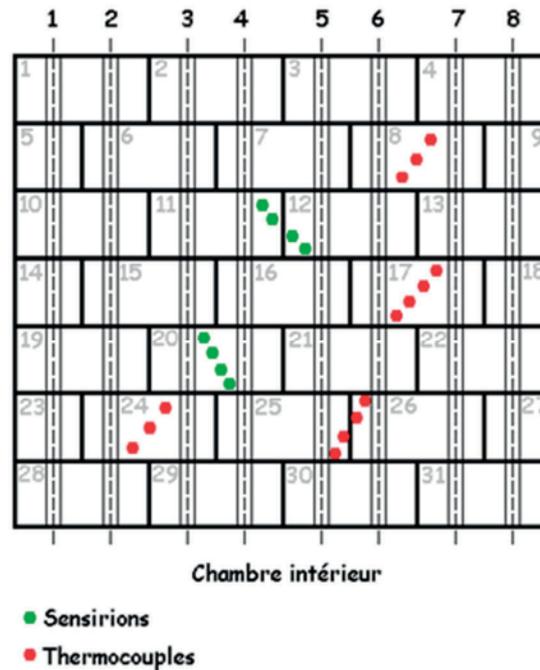


Figure 4-11 Positions des capteurs en vue de face

Dans le cadre de cette thèse, l'accent est mis sur l'étude du comportement du béton de chanvre. Ainsi, l'analyse de l'interface entre deux blocs est écartée. De fait, les humidités relatives du bloc 20 sont suivies et les températures du bloc 17. Ces blocs sont également choisis pour limiter l'influence des poteaux et des réservations sur les transferts de masse et de chaleur.

Les capteurs d'humidité et de température sont positionnés après perçage de la paroi à différentes positions. Les trous réalisés sont alors comblés avec du mortier. Les capteurs repérés figure 4-12 sont situés à 7,5 cm, 11,5 cm, 18,5 cm et 22,5 cm de la surface intérieure. x désigne la distance à la surface intérieure. Un système d'acquisition collecte les mesures toutes les cinq minutes.

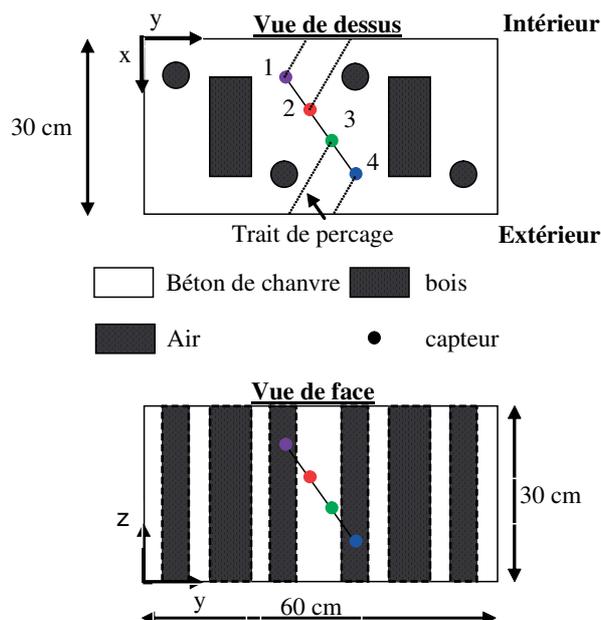


Figure 4-12 Positions des capteurs au sein d'un bloc en vue de dessus et vue de face

Si la position des thermocouples est plutôt précise en raison de la finesse du capteur, il n'en est pas de même pour les capteurs d'humidité. En effet, la tête de mesure des capteurs sensirion est relativement large d'environ 5 mm (cf. figure 4-13).

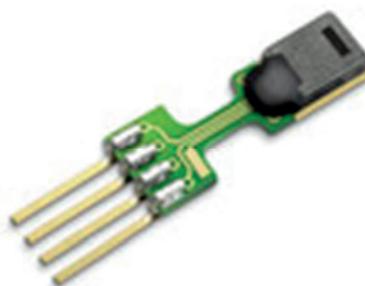


Figure 4-13 Capteur d'humidité Sensirion SHT 75²⁹

De plus, la mise en place des capteurs (par perçage oblique) accroît l'incertitude sur la position exacte des capteurs. L'incertitude totale de position de la mesure est estimée à $\pm 7,5$ mm.

²⁹ Image Sensirion®

4.3. Réponse hygrothermique expérimentale de la paroi

4.3.1. Sollicitations climatiques imposées à la paroi

Au terme de la réalisation de la paroi, les ambiances intérieure et extérieure sont stabilisées à des valeurs de consigne identiques : 23°C et 40%HR. Dès lors, la consigne de l'ambiance intérieure est maintenue à 23°C et 40%HR pendant toute la campagne d'essais alors que la consigne de l'ambiance extérieure varie fortement. Les conditions d'essai sont calculées à partir des enregistrements des ambiances lorsque celles-ci sont stabilisées. Ce sont ces conditions qui commandent le comportement thermohydrrique de la paroi. Elles sont également les données d'entrée de la simulation numérique. Les figures 4-14 et 4-15 montrent la succession respectivement des humidités relatives et des températures au cours du temps pour une partie des essais menés au laboratoire. Bien qu'il en existe d'autres, elles sont assez représentatives du type de sollicitations imposées à la paroi.

Tout d'abord, il est à noter que les ambiances, que ce soient en hygrométrie ou en température, oscillent sensiblement autour des valeurs de consigne en connaissant des fluctuations importantes. L'ambiance intérieure fluctue autour des valeurs de consigne 23°C et 40%HR qui restent constantes. L'humidité relative extérieure connaît des variations importantes entre 30%HR et 90%HR. La température extérieure reste positive et varie de 5°C à 30°C.

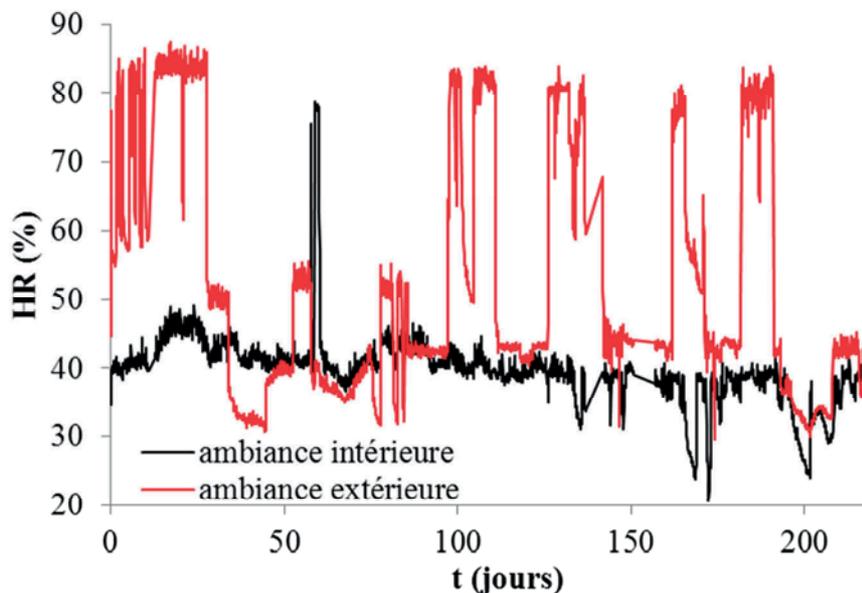


Figure 4-14 Humidités relatives intérieure et extérieure en fonction du temps

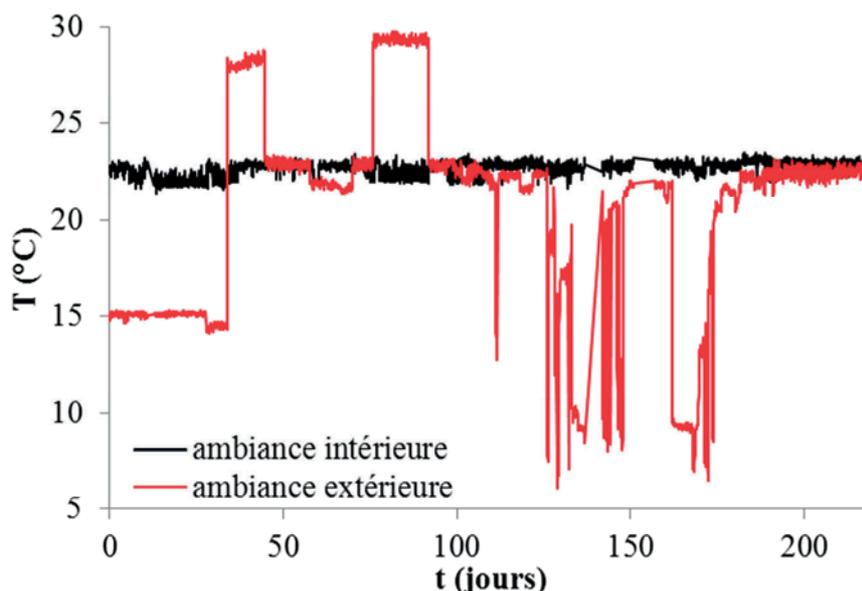


Figure 4-15 Température intérieure et extérieure en fonction du temps

Ces conditions climatiques tentent de reproduire des situations climatiques susceptibles d'être rencontrées in situ par un mur d'une habitation en béton de chanvre.

Sous ces conditions, les moteurs du transport de masse et de chaleur sont à identifier. Décrits au chapitre 2, il s'agit :

- des gradients de pression de vapeur
- des gradients de pression capillaire
- des gradients de teneur en eau
- des gradients de température
- des gradients de pression totale

La complexité de l'analyse réside dans la multiplicité et la simultanéité de ces gradients. Sur la base de cette riche campagne d'essais, il convient d'extraire des séquences d'étude représentatives et pertinentes afin de confronter les résultats expérimentaux aux résultats issus du modèle numérique développé.

Par ailleurs, l'analyse des distributions d'humidité relative et de température au sein d'un bloc, à la jonction de deux blocs et au droit de l'ossature en bois montrent que la géométrie affecte peu le comportement hygrothermique de la paroi [Collet 2011].

4.3.2. *Choix d'une séquence d'étude*

Afin d'évaluer l'impact de la modélisation des propriétés évaluées au chapitre précédent à 23°C, une séquence d'étude isotherme est choisie à cette température bien qu'elle ne soit pas exactement maintenue constante en raison des systèmes de régulation.

Dans la séquence étudiée, le mur est initialement stabilisé à 40%HR et 23°C. La durée de l'expérience est de 20 jours. Les données expérimentales sont fournies toutes les cinq minutes. Au temps $t=0$, la consigne pour l'humidité relative de la chambre extérieure est

portée à 80%HR. Les aléas liés au système de régulation de cette enceinte conduisent à des variations de l'humidité relative entre 30% et 80%HR sur la première semaine du test. Les températures des chambres et les humidités relatives mesurées lors du test sont données sur la figure 4-16.

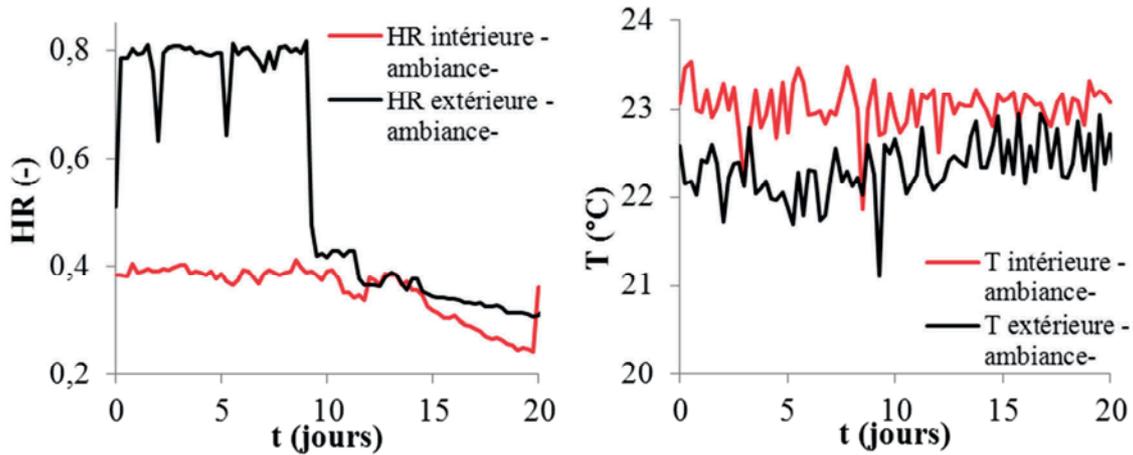


Figure 4-16 Humidités relatives (à gauche) et températures (à droite) intérieure et extérieure

L'intérêt de cette séquence d'étude est de permettre l'analyse du comportement du béton de chanvre successivement en phase d'adsorption et en phase de désorption.

4.3.3. Analyse des résultats expérimentaux

Une mesure au manomètre à eau a été réalisée entre les deux enceintes de la chambre biclimatique de part et d'autre de la paroi. La précision du système de mesure n'a pas permis de détecter de différence de pression supérieure à 10 Pa. En effet, rien ne permet a priori d'expliquer la création d'un gradient de pression totale au travers de la paroi. Par conséquent, le transport advectif est négligé. La prise en compte de ce phénomène est toutefois discutée au paragraphe 4.4.4.

Afin de mieux comprendre ce qui gouverne transport d'humidité et de chaleur sous ces conditions climatiques, la figure 4-17 présente les différents gradients qui sont imposés à la paroi.

Teneur en eau et pression capillaire peuvent s'exprimer en fonction de l'humidité relative (cf. chapitre 2 et 3). Le gradient d'humidité relative traduit ainsi le moteur global du transport d'humidité par voie liquide.

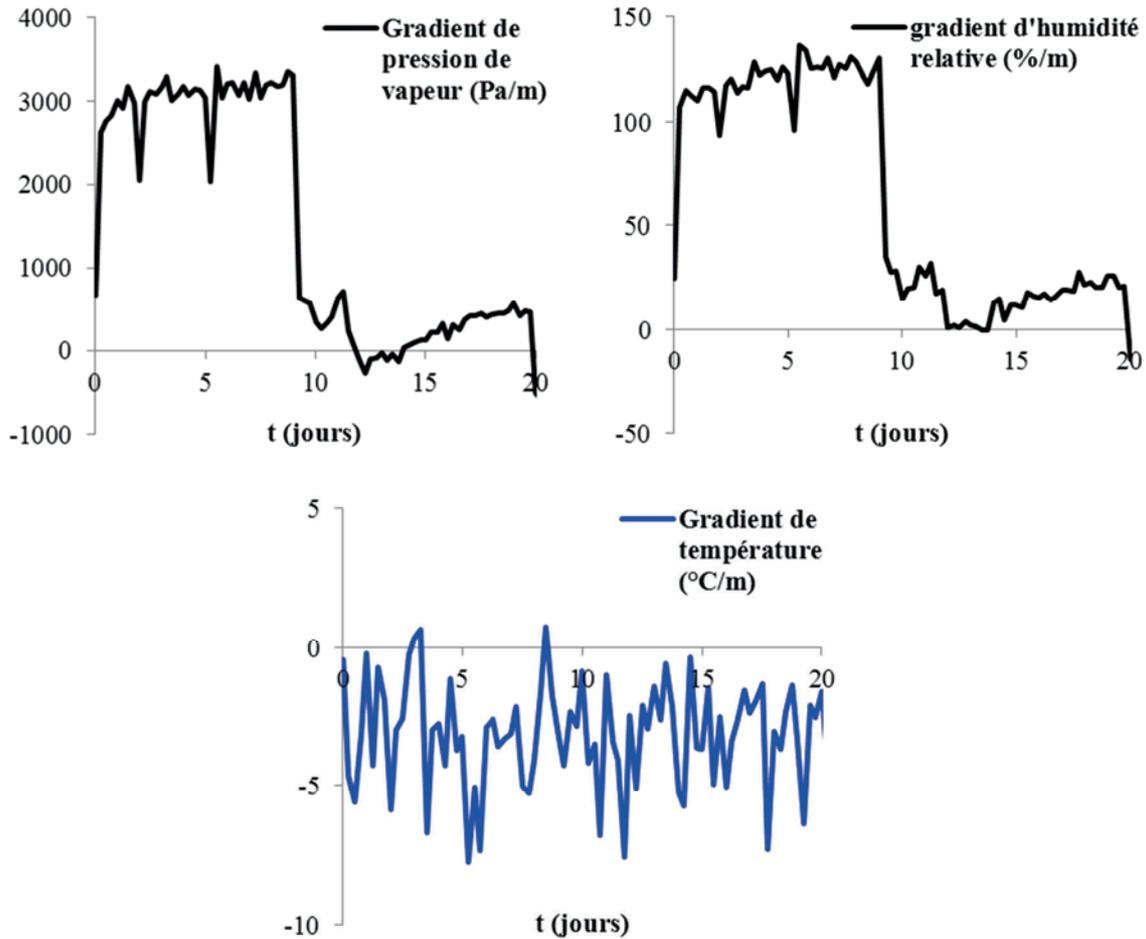


Figure 4-17 Gradients de transport de masse et de chaleur

La figure 4-17 nous permet d'affirmer que le transport par voie vapeur est le plus souvent (hormis aux alentours de 12 jours) assuré de l'ambiance extérieure vers l'ambiance intérieure dans le sens du gradient de pression partielle de vapeur. A l'inverse, tout éventuel phénomène thermodépendant tend à s'opposer au mouvement spontané de vapeur. La représentation adoptée ici ne nous permet pas de dire à quel niveau participe le transport par voie liquide. Cependant, au chapitre précédent, il a été montré que le transport par voie liquide est initié lorsque la teneur en eau dans le matériau dépasse une valeur critique. Le seul argument que l'on peut avancer ici est que les conditions sont susceptibles de contribuer au transport capillaire par l'établissement de gradients de pression de succion et au transport par diffusion surfacique par l'établissement de gradients de teneur en eau lorsque la teneur en eau au sein de la paroi dépasse la valeur de la teneur en eau critique. Le signe du gradient d'humidité relative montre que les mouvements de liquide surfacique et capillaire susceptibles d'être créés, sont dirigés de l'extérieur vers l'intérieur comme la vapeur.

Les résultats expérimentaux recueillis à travers la paroi sont présentés figure 4-18 en terme de distributions d'humidité relative et figure 4-19 en terme de distributions de température. x [cm] désigne la distance à la surface intérieure.

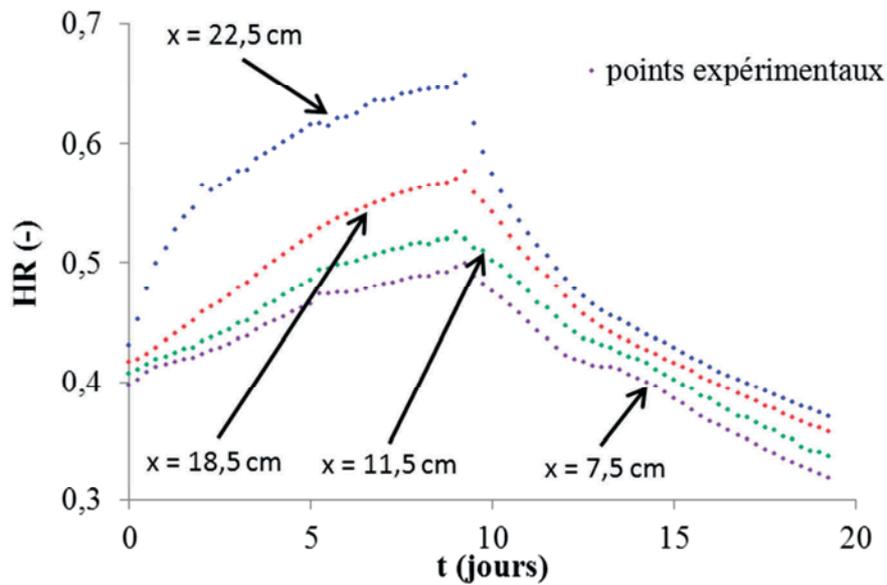


Figure 4-18 Distributions expérimentales d'humidité relative

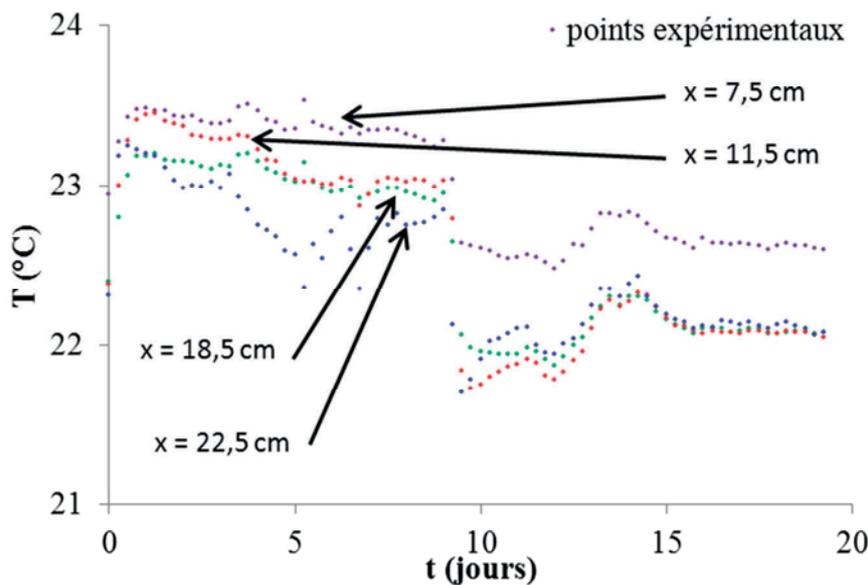


Figure 4-19 Distributions expérimentales de température

L'analyse de ces résultats montre que sous ces conditions, la distribution d'humidité relative semble gouvernée par l'humidité relative extérieure et le gradient qu'elle crée avec celle de l'ambiance intérieure. En effet, en conditions isothermes, pression de vapeur, pression capillaire et teneur en eau sont gouvernées par l'humidité relative.

La température semble quant à elle rester plus ou moins constante autour de la valeur de 23°C mais apparaît néanmoins relativement sensible à l'intensité du transport d'humidité.

L'évolution de la température mesurée dans des blocs à différentes hauteurs montre par ailleurs que la stratification de la température est, sous ces conditions, négligeable.

4.4. Analyse des résultats de la simulation

4.4.1. Cadre de la simulation

Les températures et humidités d'ambiance sont admises uniformes dans leurs chambres respectives. Ces données constituent les conditions aux limites du système paroi.

Les conditions initiales choisies sont les suivantes :

- Température : 23°C
- Humidité relative : 41%

Du point de vue de la paramétrisation numérique, trois principaux paramètres influent sur les résultats de la simulation :

- Le maillage
- Le pas de temps de calcul
- Les tolérances de calcul

Leur étude est présentée en annexe C pour le béton de chanvre Easy R. Les paramètres numériques retenus permettent d'obtenir une solution stable. Ils sont le fruit d'un compromis précision/temps de calcul et sont synthétisés dans le tableau 4-2.

BILAN	
Paramètres numériques	
Paramètre	Valeur
Maillage	Régulier 80 nœuds
Pas de temps	5 minutes
Tolérance relative de calcul	10^{-6}

Tableau 4-2 Synthèse des paramètres numériques choisis

Dans la suite du travail, les propriétés hygrothermiques utilisées pour alimenter le modèle de transfert sont celles du béton de chanvre Easy P.

4.4.2. Etudes des conditions aux limites

Dans un premier temps, afin de s'affranchir des phénomènes d'échange surfacique et simplifier l'analyse, les conditions aux limites utilisées sont des conditions de Dirichlet qui imposent températures et humidités relatives au niveau des surfaces externes. La métrologie mise en place sur la paroi permet de collecter les valeurs expérimentales des humidités et

températures proches des surfaces externes (cf. figure 4-20). Afin de respecter le formalisme de Dirichlet, ce sont ces dernières et non les valeurs d'ambiance qui alimentent, dans cette première approche, le modèle numérique.

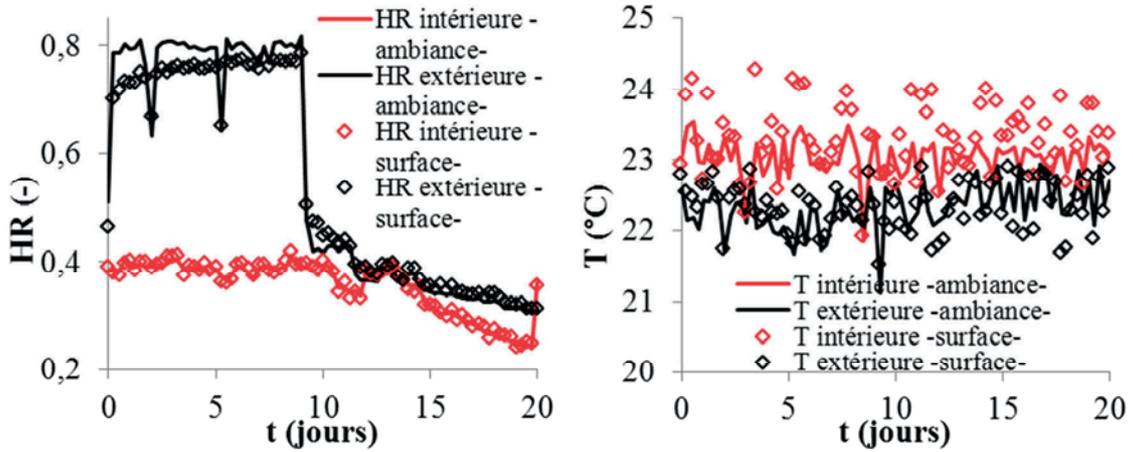


Figure 4-20 Comparaison des humidités relatives (à gauche) et des températures (à droite) des ambiances et des surfaces externes

Les figures 4-21 et 4-22 comparent ainsi respectivement les distributions simulées d'humidité relative et de température sous conditions de Dirichlet aux distributions expérimentales.

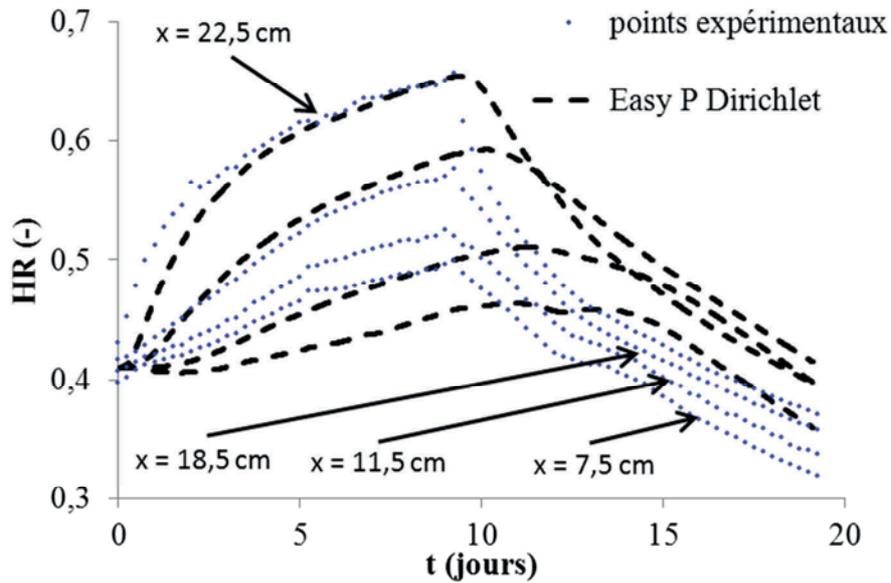


Figure 4-21 Distributions d'humidité relative - Easy P conditions de Dirichlet -

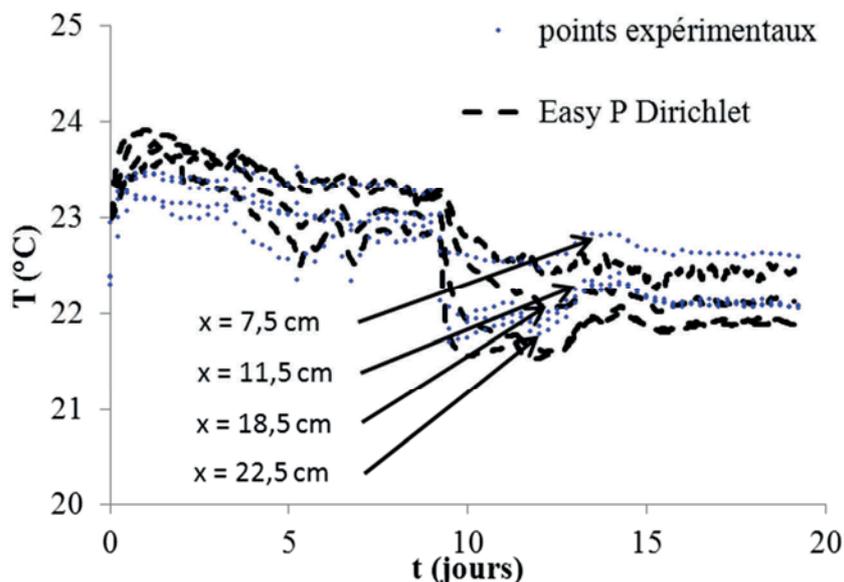


Figure 4-22 Distributions de température - Easy P conditions de Dirichlet -

Les résultats obtenus apparaissent globalement satisfaisants à la fois en température et en humidité relative. Les phénomènes de transfert de chaleur par changement de phase que l'on observe sur les distributions de température sont bien reproduits lorsque le matériau passe de la phase d'adsorption à la phase de désorption. Concernant les distributions d'humidité relative, on observe un déphasage entre résultats numériques et expérimentaux particulièrement notable pour les positions proches de la surface intérieure. En outre, l'évolution de l'humidité relative en phase de désorption semble moins bien reproduite que celle en phase d'adsorption.

Cette première approche utilisant les conditions aux limites de Dirichlet est critiquable car elle ne prend pas en compte les échanges de surface et les quantités de chaleur et d'humidité entrant (ou sortant) réellement de la paroi. En ce sens, elle ne permet d'avoir qu'une vision partielle du comportement hygrothermique de la paroi.

Ainsi, il convient de privilégier l'utilisation des conditions aux limites de type Neumann qui sont traitées par égalité de flux au niveau des surfaces externes de paroi. Les coefficients d'échange surfacique, massiques et thermiques, sont évalués par une série de corrélations (cf. chapitre 2). Les effets de surface et phénomènes de couche limite perturbent les valeurs fournies. Ils dépendent notamment de l'état de surface de la paroi. Afin de prendre en compte de manière simple ces particularités locales, le coefficient de rugosité déjà évoqué au chapitre 2 est étudié. Ce coefficient de rugosité dépend de la profondeur des aspérités qui dessinent la surface de la paroi. A titre comparatif, les données de la littérature fournissent des valeurs de l'ordre de :

- 1 pour le verre (surface lisse)
- 1,52 pour le béton
- 1,67 pour la brique

Compte tenu de ces valeurs et de l'état de surface du béton de chanvre qui laisse apparaître en surface de profondes aspérités liées à sa structure porale, on se propose de comparer l'influence de ce paramètre pour des valeurs de coefficient de rugosité R_f de 1, 2 et 3 (cf. figures 4-23 et 4-24).

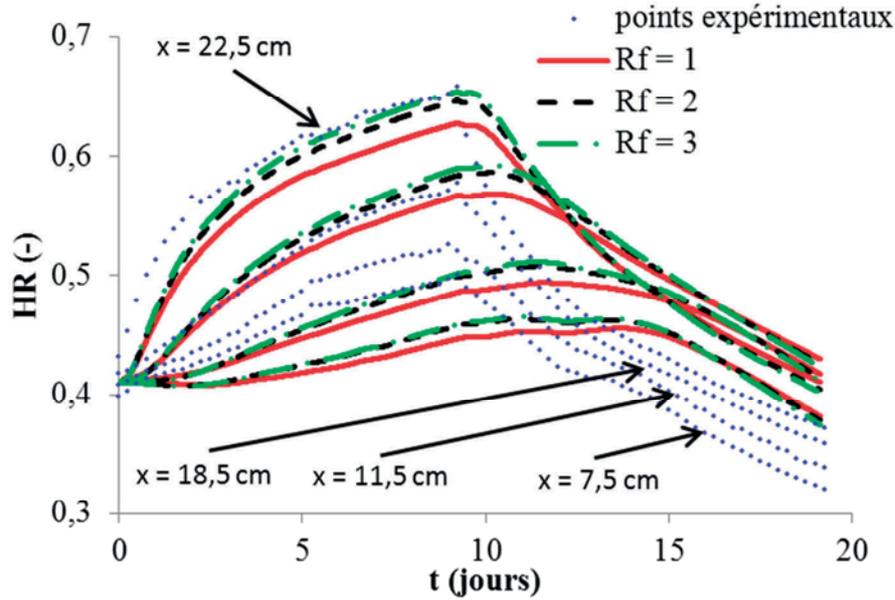


Figure 4-23 Distributions d'humidité relative - influence du coefficient de rugosité -

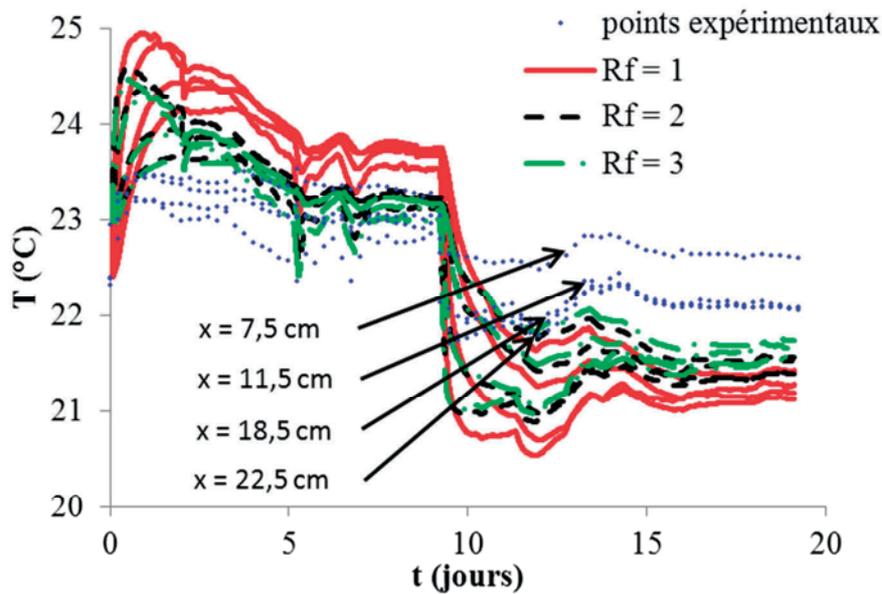


Figure 4-24 Distributions de température - influence du coefficient de rugosité -

Quel que soit le coefficient de rugosité, on constate que si les solutions numériques obtenues en conditions de Neumann sont très similaires à celles obtenues en conditions de Dirichlet en termes de distributions d'humidité relative, cette conclusion se révèle moins évidente pour les distributions de température. En effet, pour cette séquence d'étude, les échanges de chaleur semblent légèrement surestimés.

La modélisation des coefficients d'échange est donc discutable mais permet d'obtenir une première approximation tout à fait acceptable des échanges surfaciques en conditions isothermes.

Les réponses numériques (température et humidité) se révèlent en outre particulièrement sensibles aux valeurs des coefficients d'échanges même si pour les valeurs élevées de coefficient de rugosité, les différences observées se réduisent nettement.

Une valeur de coefficient de rugosité de 2 semble toutefois légitime d'un point de vue physique et permet de mieux appréhender les phénomènes de surface de la paroi en béton de chanvre. La figure 4-25 compare ainsi les humidités relatives et températures de surface expérimentales et simulées avec ce coefficient de rugosité.

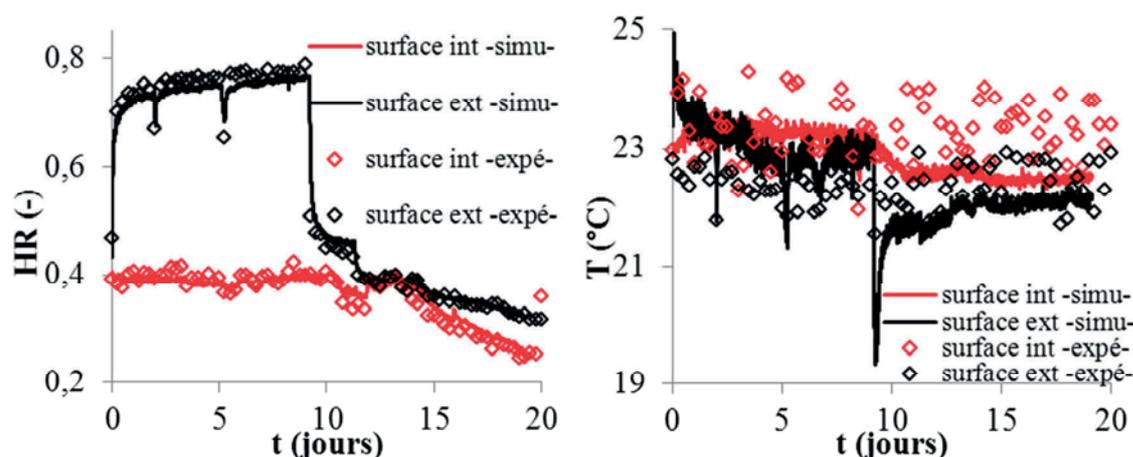


Figure 4-25 Humidités relatives (à gauche) et températures (à droite) de surface : résultats expérimentaux et numériques

Températures et humidités de surface expérimentales connaissent des fluctuations très importantes. Bien qu'elles ne permettent pas de valider la justesse de la modélisation des échanges surfaciques, la similitude des courbes des humidités et températures de surface expérimentales et numériques semble toutefois confirmer la pertinence de la solution retenue.

Dans la suite du travail, les échanges de surface sont modélisés avec les conditions de Neumann et le coefficient de rugosité retenu est de 2.

4.4.3. Influence de la variation de masse volumique

4.4.3.1. Sensibilité aux paramètres

L'objectif de cette étude est d'identifier les paramètres hygrothermiques pour lesquels les réponses numériques en température et humidité relative sont les plus sensibles.

La masse volumique est le paramètre qui caractérise physiquement le matériau. Les propriétés hydriques et thermiques du béton de chanvre lui sont ainsi directement associées (cf. chapitre 3). La sensibilité aux paramètres du modèle est menée en comparant les réponses numériques obtenues en termes de température et d'humidité relative à partir des propriétés de

bétons de chanvre de masses volumiques différentes. A cette fin, le travail de modélisation présenté au chapitre 3 nous a permis d'obtenir l'ensemble des propriétés hygrothermiques de deux bétons de chanvre Easy R et Easy P de masses volumiques apparentes à l'état sec éloignées respectivement de 450 kg.m^{-3} et 320 kg.m^{-3} .

En outre, l'étude de l'influence de la modélisation mathématique sur les paramètres de transport d'humidité et la teneur en eau menée parallèlement à cette analyse, ne révèle aucune sensibilité significative (cf. annexe D).

Dans le cadre de cette étude de sensibilité, les paramètres analysés sont :

- la masse volumique apparente à l'état sec ρ_0
- la teneur en eau w modélisée par la courbe d'adsorption principale
- les paramètres de transport d'humidité : perméabilité relative δ_p et coefficient de diffusion liquide D_l
- la conductivité thermique λ
- la capacité thermique à l'état sec C_0

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de cette étude de sensibilité est présenté en détails en annexe D.

Les conclusions de ce travail sont discutées dans cette section en termes de sensibilité relative qui s'exprime par la relation :

$$s = \frac{\frac{\Delta X}{X}}{\frac{\Delta P}{P}} \quad (4-1)$$

X désigne les réponses du modèle (φ et T) et P les paramètres du modèle rappelés précédemment.

La figure 4-26 présente les sensibilités relatives obtenues pour deux positions de mesure ($x = 22,5 \text{ cm}$ et $x = 7,5 \text{ cm}$) à l'intérieur de la paroi des réponses numériques.

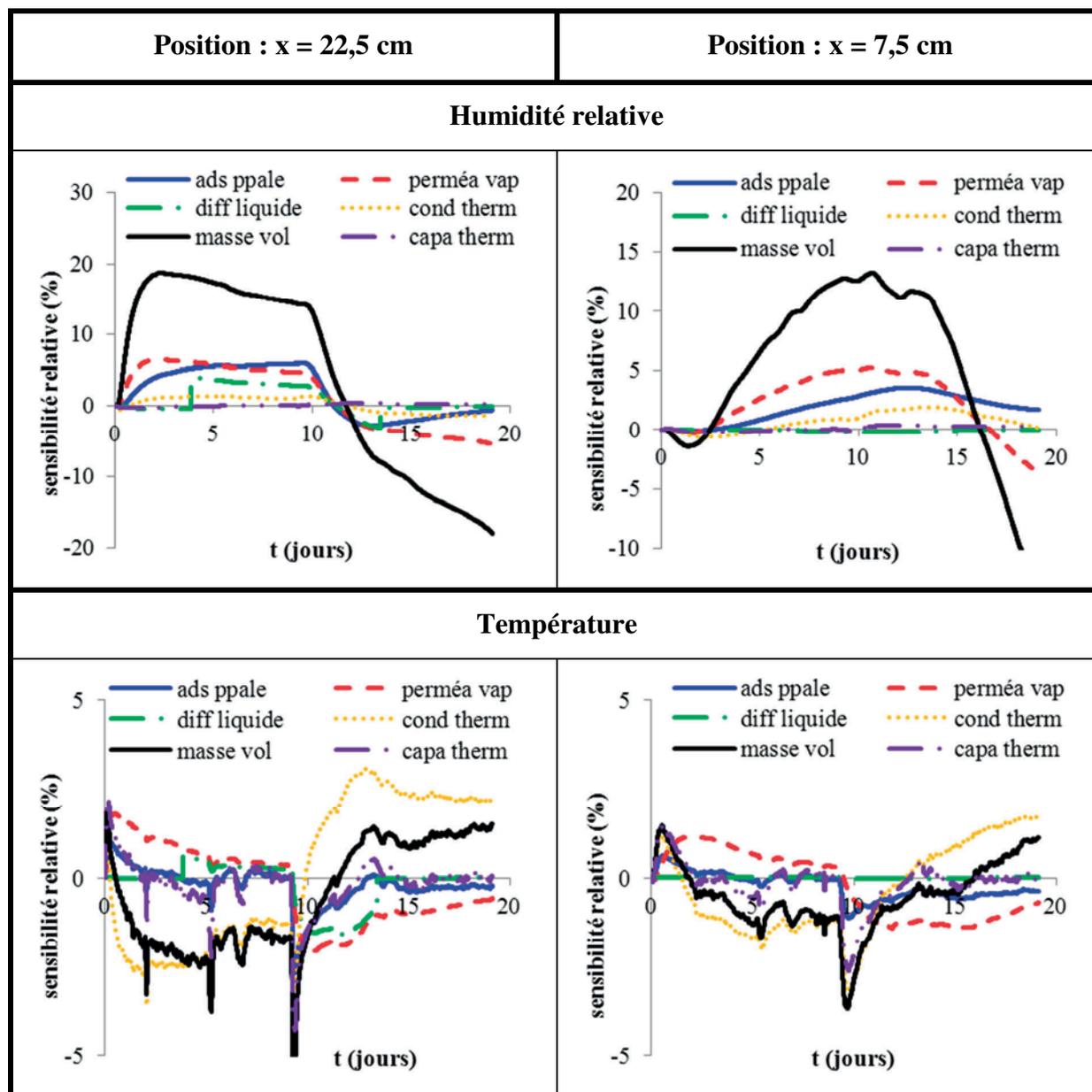


Figure 4-26 Sensibilités relatives des humidités relatives et températures au paramétrage

La masse volumique apparente à l'état sec apparaît comme le paramètre le plus impactant sur l'évolution de la variable humidité relative. Elle affecte également significativement l'évolution de la température. Mathématiquement, elle intervient dans l'expression de la capacité hydrique (exprimée en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) qui conditionne l'inertie hydrique de la paroi et dans l'expression de la teneur en eau (exprimée en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) qui participe à l'évolution des coefficients de transport de chaleur et de masse. Elle intervient également dans le terme d'inertie thermique.

La sensibilité à la masse volumique apparente à l'état sec des réponses numériques est par ailleurs à relier à celle de la courbe d'adsorption principale. En effet, il a été montré au chapitre 3 que la capacité hydrique (pente de la courbe d'adsorption principale) exprimée en % était pratiquement identique pour les bétons de chanvre étudiés et se révélait donc peu

sensible à la variation de masse volumique du matériau. Les évolutions des capacités hydriques exprimées en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ sont donc avant tout dues à la valeur de la masse volumique. Pour rappel :

$$\frac{dw}{d\varphi} = \rho_0 \frac{du}{d\varphi} \quad (4-2)$$

La figure 4-27 représente les capacités hydriques des trois bétons de chanvre étudiés au chapitre 3, Easy R, Easy R-bis et Easy P.

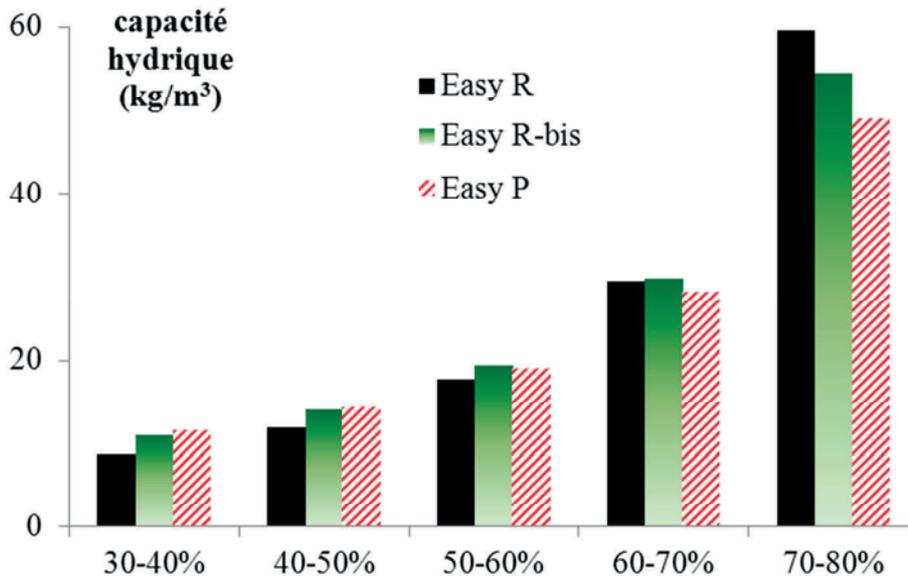


Figure 4-27 Capacités hydriques massiques

D'autre part, les caractéristiques de transport de l'humidité sont des paramètres influents du modèle qui conditionnent les distributions d'humidité et influent sur le transport de chaleur. A titre explicatif, les sauts de sensibilité au coefficient de diffusion liquide observés figure 4-26 résultent directement de la modélisation effectuée sur le transport liquide qui apparaît lorsque la teneur en eau dépasse une valeur critique.

Par ailleurs, l'influence de la conductivité thermique se traduit avant tout sur l'évolution de la température au sein de la paroi. Telle qu'elle a été introduite, la capacité thermique à l'état sec est indépendante de la masse volumique. Cependant, sa sensibilité a été évaluée à partir des valeurs extrêmes recueillies dans la littérature. Son influence reste toutefois limitée en comparaison à celle des autres paramètres.

De manière générale, il est à noter que les réponses du modèle se révèlent particulièrement sensibles au paramétrage lors des changements brutaux d'ambiance notamment lors du basculement adsorption/désorption.

Cependant, l'étude de sensibilité menée en tant que telle pour laquelle les paramètres sont analysés indépendamment ne fournit qu'une vision partielle de l'influence de la variation de masse volumique. En effet, bien que de même composition, le fait que la masse volumique

apparente du béton de chanvre Easy P soit différente de celle du béton de chanvre Easy R implique des différences dans leur structure porale. Transferts hygrothermiques et stockage à la fois de chaleur et d'humidité s'en trouvent ainsi modifiés conjointement. L'analyse de la variation de masse volumique sur les réponses de la paroi ne peut être menée que de manière globale avec un paramétrage complet pour être réellement pertinente.

4.4.3.2. Comparaison des bétons de chanvre Easy R et Easy P

A ce stade, il est intéressant de simuler et de comparer les distributions d'humidité relative et de température à partir de la modélisation complète des bétons de chanvre Easy R et Easy P (figures 4-28 et 4-29). Cette étude permet ainsi d'estimer l'influence de la variation de masse volumique sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre sous sollicitations climatiques isothermes.

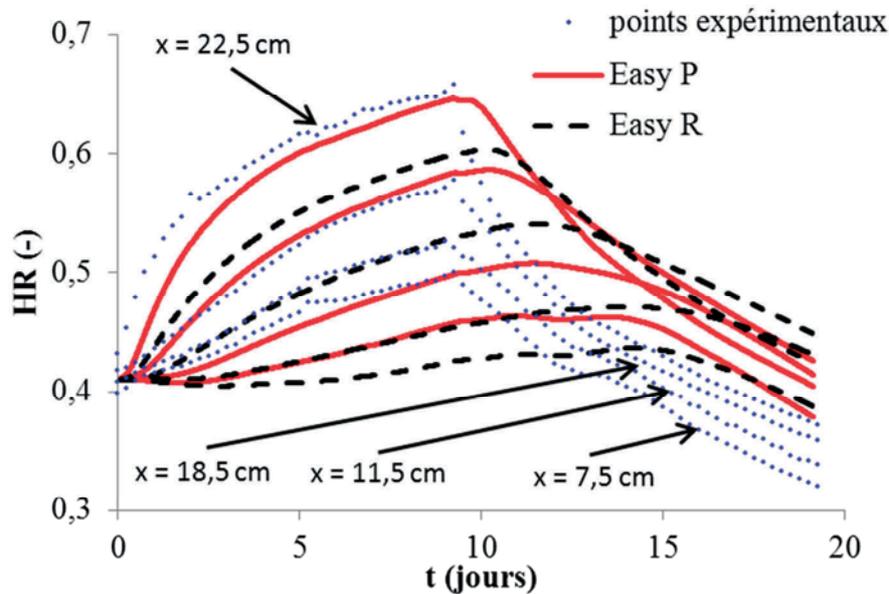


Figure 4-28 Distributions d'humidité relative - Easy R vs Easy P -

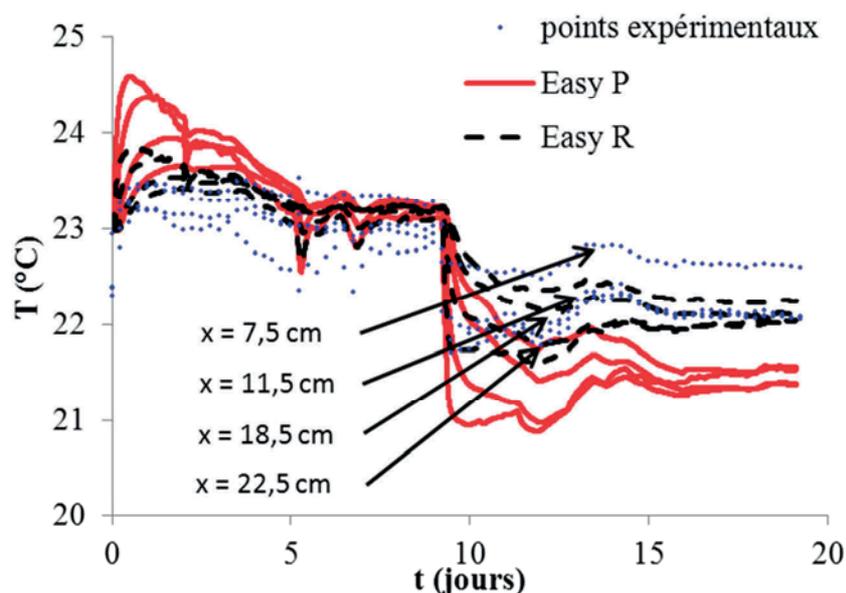


Figure 4-29 Distributions de température - Easy R vs Easy P -

Les figures 4-28 et 4-29 montrent que la masse volumique a une influence réelle sur la réponse hygrothermique du béton de chanvre. Le béton de chanvre Easy P favorise davantage la migration d'humidité. Le caractère plus isolant de ce dernier est toutefois contrebalancé par les transports de chaleur sensible et d'évaporation/condensation. Le couplage fort qu'il existe entre chaleur et humidité a une influence sur les distributions à la fois de température et d'humidité.

L'évolution de la capacité hydrique avec la masse volumique explique notamment la meilleure reproduction des réponses numériques de la paroi par le béton de chanvre Easy P que par le béton de chanvre Easy R.

Toutefois, bien que les réponses du béton de chanvre Easy P se rapprochent davantage des réponses réelles de la paroi que celles du béton de chanvre Easy R avant tout en terme de distribution d'humidité relative, sa modélisation complète ne permet pas de simuler de manière totalement satisfaisante le comportement expérimental du matériau notamment en phase de désorption.

4.4.3.3. Analyse du comportement hygrothermique du béton de chanvre

Afin de mieux comprendre le comportement du béton de chanvre, une analyse de la contribution des différents modes de transport est effectuée.

Au niveau de la chaleur, sont ainsi comparés les termes de flux :

- conductif
- enthalpique par chaleur sensible de voie vapeur et de changement d'état
- enthalpique par chaleur sensible de liquide

Et au niveau de l'humidité, les termes :

- diffusif par voie vapeur
- diffusif par voie liquide

Ces différentes contributions sont étudiées à travers le matériau respectivement en phase d'adsorption (à 5 jours) et en phase de désorption (à 10 jours et à 15 jours). A 10 jours, on se situe en début de désorption juste après le pic d'humidité relatif alors qu'à 15 jours le phénomène est déjà largement établi. A ces instants sont également représentés les profils d'humidité relative et de température.

Sur les figures suivantes, $x = 0$ cm désigne la position de la surface intérieure et $x = 30$ cm celle de la surface extérieure.

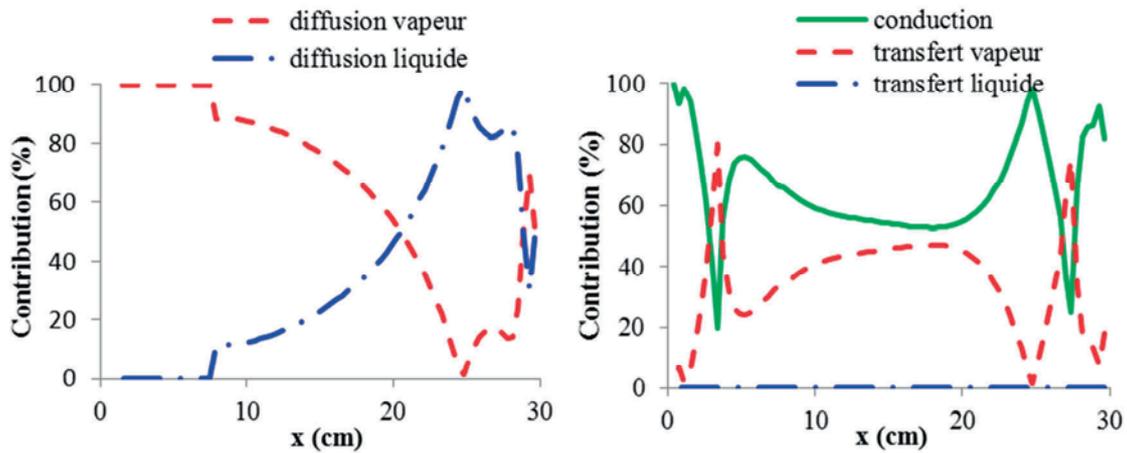


Figure 4-30 Contributions au transport de l'humidité (à gauche) et de la chaleur (à droite) en phase d'adsorption à 5 jours

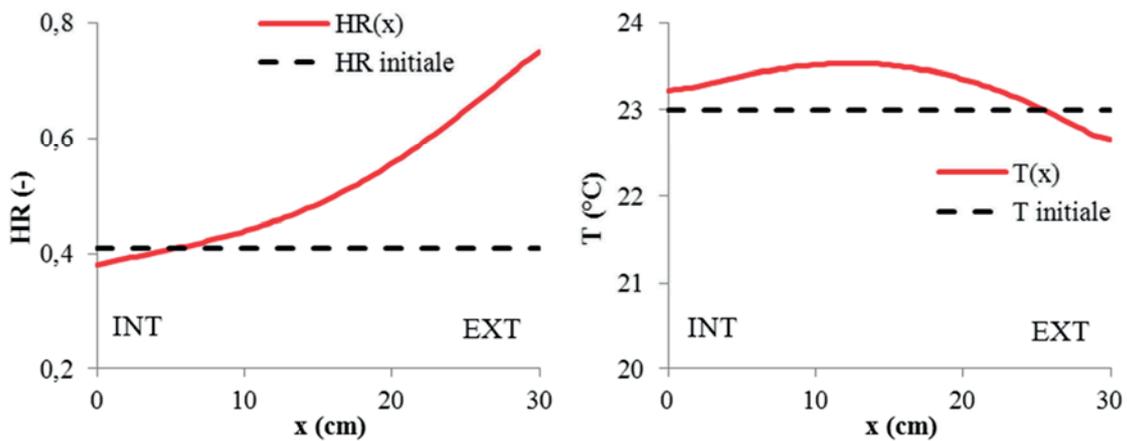


Figure 4-31 Profils d'humidité relative (à gauche) et de température (à droite) en phase d'adsorption à 5 jours

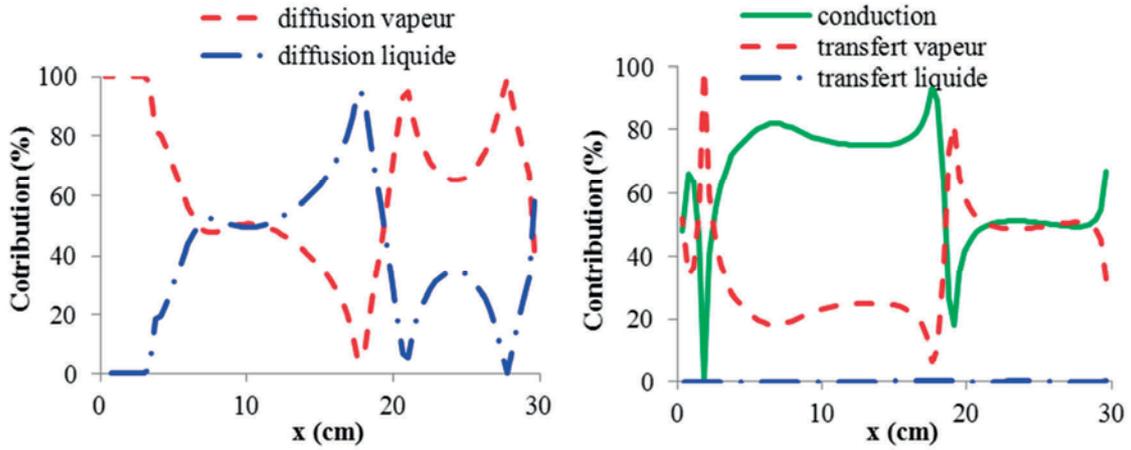


Figure 4-32 Contributions au transport de l'humidité (à gauche) et de la chaleur (à droite) en début de phase de désorption à 10 jours

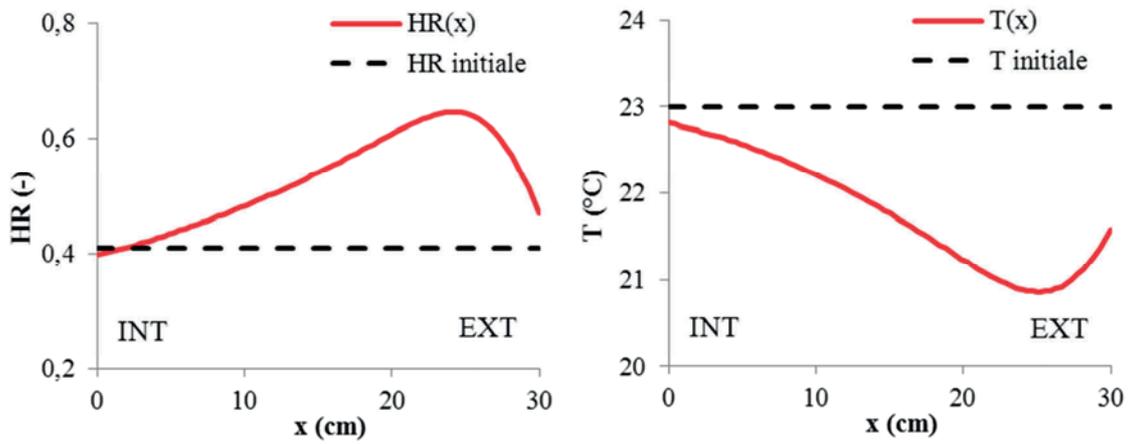


Figure 4-33 Profils d'humidité relative (à gauche) et de température (à droite) en phase de désorption à 10 jours

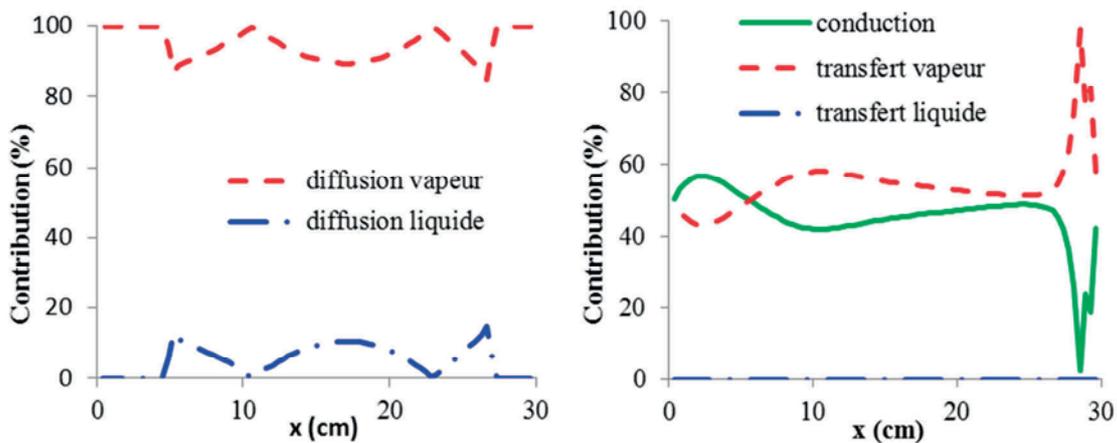


Figure 4-34 Contributions au transport de l'humidité (à gauche) et de la chaleur (à droite) en cours de phase de désorption à 15 jours

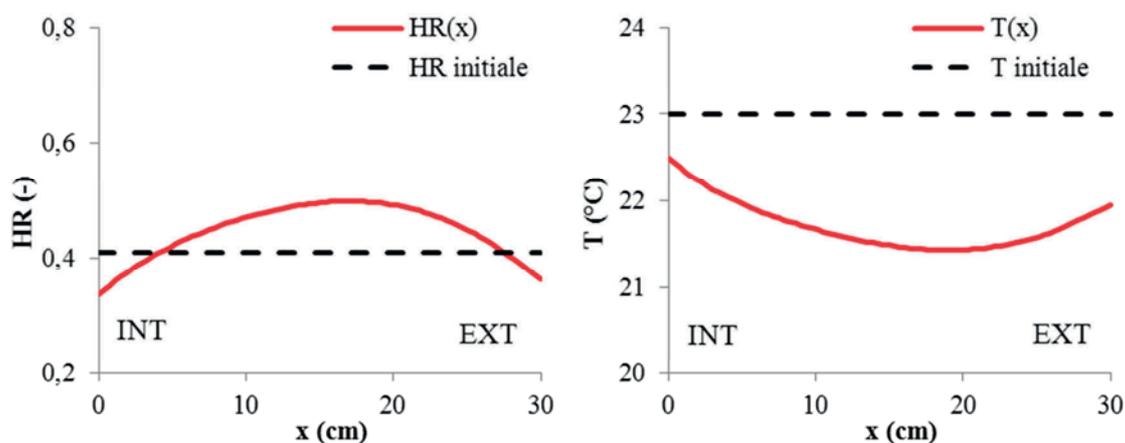


Figure 4-35 Profils d'humidité relative (à gauche) et de température (à droite) en phase de désorption à 15 jours

En phase d'adsorption (figure 4-30), le transfert d'humidité se fait conjointement par voie vapeur et liquide. Par ailleurs, le transport de chaleur reste majoritairement conductif. Toutefois, il est influencé par les mouvements d'humidité à travers le matériau et les phénomènes d'évapo-condensation associés dans les zones proches des surfaces externes.

En début de désorption, le transfert d'humidité se fait successivement sous forme vapeur et liquide. Là encore, le transport de chaleur est tributaire du transport d'humidité.

En fin de désorption, le transport par voie liquide est très nettement négligeable devant le transport vapeur dans toute l'épaisseur du matériau. Conduction thermique et transfert d'humidité par changement de phase régissent principalement le transport de chaleur.

Quel que soit l'instant et le régime de sorption, le transfert par chaleur sensible demeure négligeable devant les autres contributions.

La représentation des profils d'humidité relative permet de visualiser l'évolution du front d'humidité durant la phase de désorption qui se déplace vers l'intérieur de la paroi en perdant en amplitude. Les profils de température, sensiblement influencés par les phénomènes d'évapo-condensation conditionnés en situation isotherme par les gradients d'humidité relative, connaissent une évolution symétrique aux profils d'humidité.

Cette analyse permet de mieux comprendre le comportement du béton de chanvre en phase d'adsorption et en phase de désorption mais ne permet toutefois pas d'expliquer les lacunes de la modélisation.

Hormis la modélisation des propriétés hygrothermiques, qu'est-ce qui pourrait influencer sur les réponses simulées de la paroi en béton de chanvre ?

4.4.4. Analyse du transfert d'air à travers la paroi

La forte porosité ouverte du béton de chanvre offre à l'air la possibilité de transiter à travers le matériau sous l'effet de gradients de pression et ainsi de perturber les phénomènes de transport d'humidité et de chaleur. Aucune mesure n'a été effectuée au laboratoire pour

évaluer la capacité du matériau à laisser circuler l'air en son sein. Cependant, [Cerezo 2005] dans le cadre de la caractérisation des propriétés acoustiques du béton de chanvre a effectué des mesures de perméabilité à l'air réalisées à l'aide d'un perméamètre dont le principe est schématisé figure 4-36.

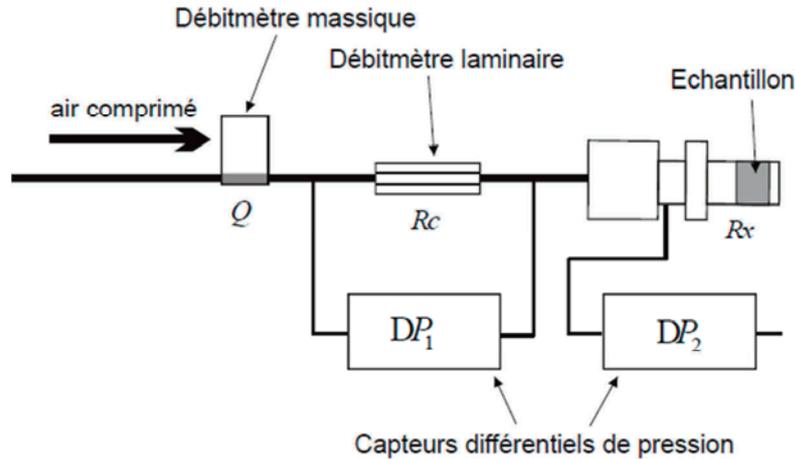


Figure 4-36 Principe de mesure³⁰

Cet appareil permet de mesurer la résistivité au passage de l'air d'un matériau en imposant un débit massique au travers de l'échantillon. Des capteurs mesurent la chute de pression aux bornes de cet échantillon pour un écoulement de type laminaire (débit limité à $1,8 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et la relation 4-3 permet de déduire la résistance au passage de l'air.

$$v = \frac{k_{air}}{\mu_a} \nabla P \quad (4-3)$$

$v \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ désigne la vitesse d'écoulement de l'air, $k_{air} \text{ [m}^2]$ la perméabilité à l'air, $\mu_a \text{ [Pa} \cdot \text{s}]$ la viscosité dynamique de l'air et $P \text{ [Pa]}$ la pression totale. L'appellation de perméabilité à l'air est ici impropre, il serait plus juste de parler de perméabilité absolue (ou perméabilité intrinsèque). Elle est déterminée sur échantillon sec. En conditions sèches, la perméabilité à l'air $\delta_{air} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}]$ au sens propre du terme a pour expression :

$$\delta_{air} = \rho_a \frac{k_{air}}{\mu_a} \quad (4-4)$$

Pour des dosages intermédiaires chènevotte/chaux fournissant une masse volumique apparente à l'état sec comprise entre 350 et $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, selon Cerezo, les valeurs de perméabilité absolue à l'air sont comprises entre $3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ et $6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$. Elle justifie la grandeur de ces valeurs en comparaison à d'autres matériaux de construction par la forte porosité ouverte

³⁰ Schéma tiré de [Cerezo 2005]

du matériau. La perméabilité à l'air du béton de chanvre est ainsi de l'ordre de $10^{-4} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$. Cette valeur apparaît excessivement élevée, supérieure à celle des laines isolantes par exemple.

A contrario, dans ses travaux de thèse, Evrard évoque une perméabilité à l'air de l'ordre de $2,1.10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$, valeur qui semble plus réaliste. En conséquence la perméabilité absolue du béton de chanvre est de l'ordre de 10^{-15} m^2 , valeur qui apparaît plus légitime.

Par ailleurs, en présence d'eau, la perméabilité effective de l'air a tendance à diminuer. En effet, l'espace occupé par l'eau empêche l'air de circuler. On introduit ainsi la notion de perméabilité relative.

[Lefebvre 2006] présente des relations qui permettent d'exprimer la perméabilité relative d'un milieu poreux à une phase mouillante et à une phase non mouillante.

Dans [Mualem 1976] est ainsi proposé un modèle analytique simple de prédiction des courbes de perméabilité relative à partir des courbes de pression capillaire en fonction de la saturation effective S_e . La saturation effective se définit par :

$$S_e = \frac{u}{u_{sat}} \quad (4-5)$$

car pour le béton de chanvre, la teneur en eau résiduelle est nulle. La perméabilité relative à l'eau k_{rw} est déterminée selon Mualem par :

$$k_{rw} = \sqrt{S} \left[\frac{\int_0^S \frac{dS_e}{p_c(S_e)}}{\int_0^1 \frac{dS_e}{p_c(S_e)}} \right]^2 \quad (4-6)$$

Ainsi, Van Genuchten a montré que lorsque son modèle [Van Genuchten 1980] est intégré dans le modèle de Mualem, on obtient la relation :

$$k_{rw} = \sqrt{S} \left[1 - \left(1 - S^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (4-7)$$

m est le coefficient utilisé par Van Genuchten dans son modèle de sorption.

Cette relation découle de l'expression de conductivité hydraulique en milieu non saturé proposée par Van Genuchten :

$$K_l = K_s S^\lambda \left[1 - \left(1 - S^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (4-8)$$

où K_s [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$] désigne la conductivité hydraulique à saturation et λ un paramètre de connectivité des pores (pris à 0,5 ici).

Parker montre aussi que la courbe de perméabilité effective au fluide non mouillant k_{rnw} peut être obtenue de façon similaire [Parker 1989].

$$k_{rnw} = \sqrt{1 - S} \left[1 - S^{1/m} \right]^{2m} \quad (4-9)$$

Dans notre cas d'étude, le fluide non mouillant est l'air. Le graphique 4-37 montre l'évolution des perméabilités relatives k_{rw} et k_{rnw} du béton de chanvre Easy P sous ces hypothèses.

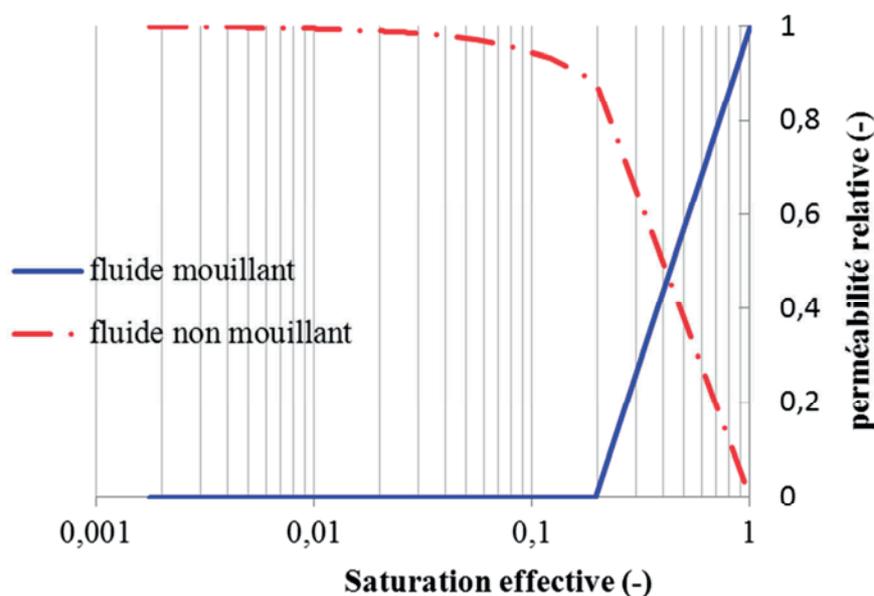


Figure 4-37 Perméabilité relative du béton de chanvre Easy P à l'eau et à l'air

La teneur en eau à saturation étant très largement supérieure aux valeurs de teneur en eau rencontrées en zone hygroscopique, la perméabilité relative est donc, dans nos conditions d'étude, pratiquement égale à 1 :

$$k_{eff} = k_{air} k_{rnw} \approx k_{air} \quad (4-10)$$

Néanmoins, cette approche théorique est critiquable à plus d'un titre :

- La perméabilité relative à l'eau (et par corrélation également la perméabilité relative à l'air) s'appuie sur l'approche mathématique de Van Genuchten de détermination de conductivité hydraulique qui ne considère que le transport d'eau capillaire.
- De plus, selon Lefebvre, il y a ségrégation de l'écoulement des fluides qui ne s'écoulent pas dans les mêmes pores simultanément. Chaque fluide développe plutôt son propre réseau d'écoulement.

Dans le cas du béton de chanvre, l'estimation de la perméabilité effective à l'air est donc sujet à discussion et nécessite une étude plus approfondie. Il serait notamment intéressant d'étudier la valeur de perméabilité absolue du béton de chanvre à différentes humidités pour mieux comprendre les interactions qui existent entre le transport d'humidité et la circulation de l'air.

Par ailleurs, la mesure au manomètre à eau réalisée entre les deux enceintes de la chambre biclimatique de part et d'autre de la paroi n'a pas permis de détecter de différence de pression totale. L'existence d'un gradient de pression totale au travers de la paroi est donc inattendue.

En outre, les résultats obtenus en l'absence de transfert d'air montrent que ce phénomène est probablement négligeable dans notre étude. Une étude numérique complémentaire [Aït Ouméziane 2011] pour laquelle la paroi est soumise à un gradient de pression de totale de 10 Pa montre que pour une large gamme de valeurs de perméabilités à l'air (de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-11} $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$), le phénomène de transfert d'air était négligeable.

4.4.5. Influence de la position des capteurs

L'incertitude liée à la position du capteur d'humidité au sein de la paroi est évaluée à $\pm 7,5$ mm (cf. paragraphe 4.2.2.). La figure 4-38 présente les résultats de la simulation sur les distributions d'humidité relative prenant en compte cette incertitude.

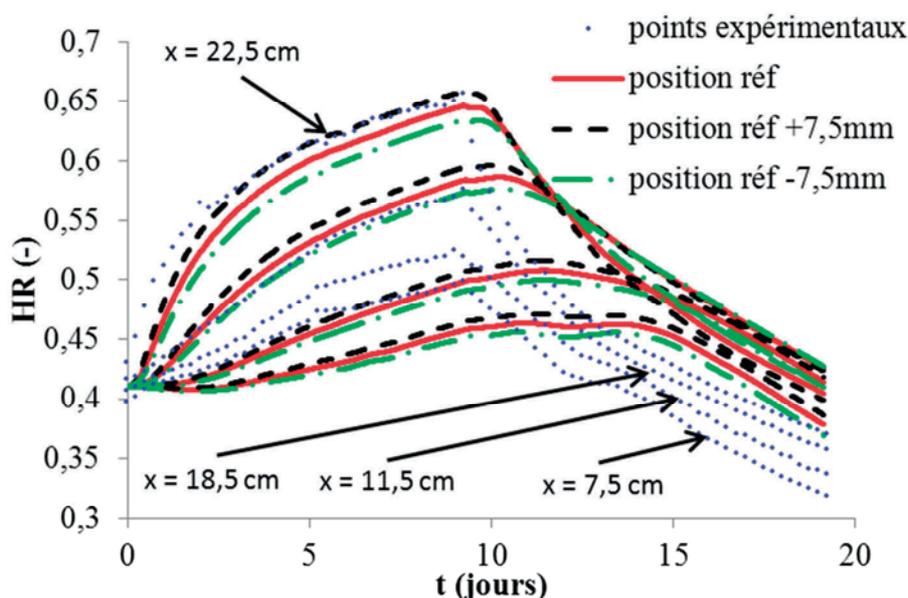


Figure 4-38 Distributions d'humidité relative - influence de la position des capteurs d'humidité -

La figure 4-38 montre que la position des capteurs n'explique pas les disparités des réponses numériques. Les différences entre résultats numériques et expérimentaux sont comprises dans la gamme d'incertitude des capteurs (environ 2%HR).

4.4.6. Etude d'une autre séquence isotherme

L'intérêt de traiter une autre séquence d'étude isotherme est double :

- il s'agit tout d'abord de valider la démarche de modélisation des propriétés du béton de chanvre Easy P adoptée dans ce chapitre
- d'autre part, la mise en parallèle des résultats obtenus pour les deux séquences doit permettre de mettre en lumière et souligner les limites et insuffisances de la modélisation

4.4.6.1. Conditions de l'étude

Dans cette séquence, le mur est initialement stabilisé à 40%HR et 23°C. La durée de l'expérience est de 2 semaines. Au temps $t=0$, la consigne de l'humidité extérieure est portée à 80%HR. Les aléas liés au système de régulation de cette enceinte conduisent à des variations importantes de l'humidité relative entre 50% et 85%HR. Les températures des chambres et les humidités relatives mesurées lors du test sont données sur la figure 4-39.

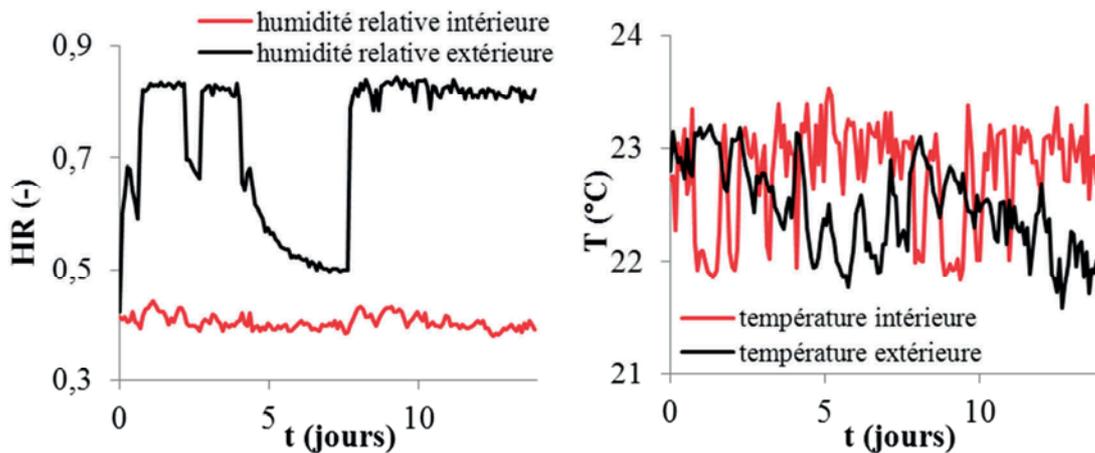


Figure 4-39 Humidités relatives (à gauche) et températures (à droite) intérieure et extérieure

Les propriétés hygrothermiques alimentant le modèle de transfert sont celles du béton de chanvre Easy P.

Le transfert d'air à travers la paroi est négligé. Les conditions aux limites sont des conditions de Neumann et le coefficient de rugosité de la paroi est de 2.

Les conditions initiales choisies sont les suivantes :

- Température : 23°C
- Humidité relative : 41%

4.4.6.2. Résultats et analyse

Les résultats issus de la modélisation adoptée sont présentés figure 4-40 et 4-41 respectivement pour les distributions d'humidité relative et de température.

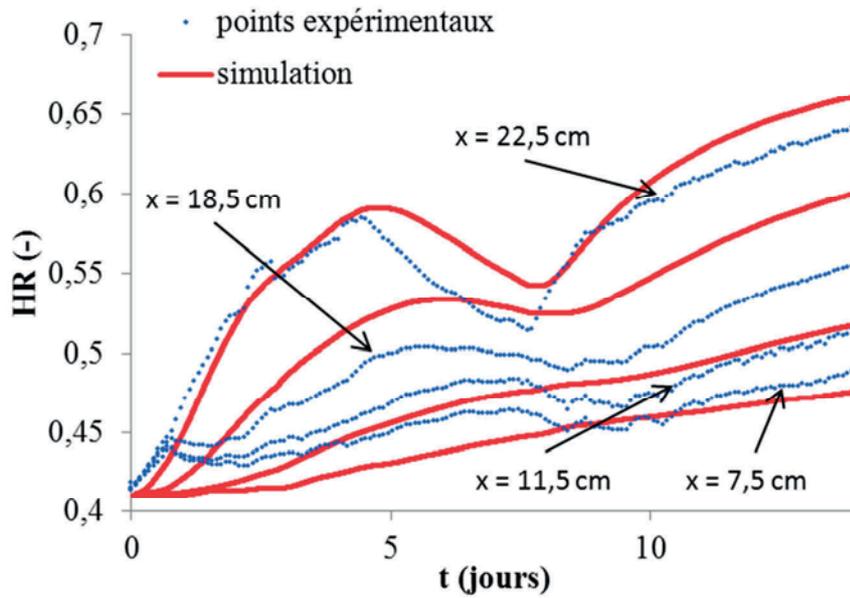


Figure 4-40 Distributions d'humidité relative - Cas isotherme n°2 -

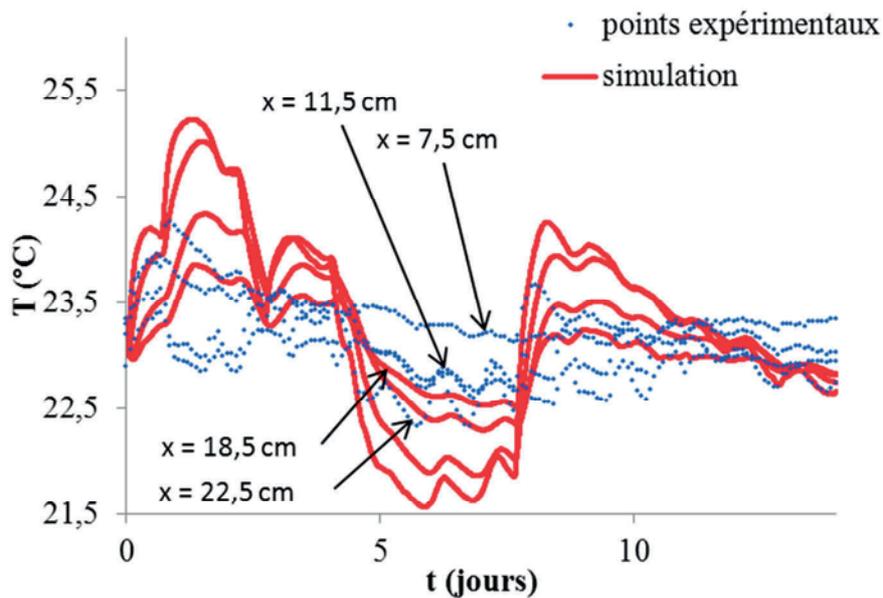


Figure 4-41 Distributions de température - Cas isotherme n°2 -

Les observations de ces résultats viennent corroborer celles effectuées pour la première séquence d'étude. Globalement, les résultats sont satisfaisants mais montrent que la cinétique de distribution de l'humidité n'est pas respectée notamment en phase de désorption.

4.5. Conclusion

Les réponses hygrothermiques simulées du béton de chanvre sont influencées par les valeurs des paramètres de modélisation. En conditions isothermes, les distributions d'humidité relative et de température à travers la paroi sont particulièrement sensibles aux paramètres de transport d'humidité, perméabilité à la vapeur et coefficient de diffusion liquide. Cependant, la teneur en eau apparaît comme le paramètre le plus sensible dans la mesure où d'une part elle intervient dans l'expression de la capacité hydrique, associée à la valeur de la masse volumique à l'état sec, et d'autre part, conditionne l'évolution de toutes les propriétés hygrothermiques.

Par ailleurs, la variation de masse volumique du béton de chanvre a une influence sur les distributions à la fois de température et d'humidité à travers la paroi. Ainsi, un béton de chanvre de faible masse volumique favorise davantage la migration d'humidité. Les phénomènes de transport de chaleur induits par la diffusion d'humidité tels que l'évapo-condensation viennent en revanche diminuer sa capacité d'isolation thermique.

Par ailleurs, la modélisation adoptée présente quelques lacunes puisqu'elle ne permet pas de reproduire les cinétiques hydriques durant la phase de désorption.

Dans tout le chapitre, l'évolution de la teneur en eau est décrite par l'isotherme d'adsorption principale. Or, le béton de chanvre est caractérisé par une forte hystérésis. Il convient donc de revenir sur cette hypothèse. En effet, en raison de ce phénomène, la courbe d'adsorption principale sous-estime la teneur en eau réelle du matériau. En outre, la capacité hydrique, dérivée de la teneur en eau sur l'humidité $dw/d\phi$, est surestimée notamment en phase de désorption. Le stockage de l'humidité dans le matériau et corrélativement les cinétiques de distribution de l'humidité relative dans la paroi sont donc mal évalués.

Les divergences observées entre résultats numériques et expérimentaux sont donc probablement attribuables à la mauvaise évaluation de la teneur en eau et de la capacité hydrique du béton de chanvre.

Le chapitre suivant a pour objectif de caractériser et modéliser le phénomène d'hystérésis du béton de chanvre sur l'évolution de la teneur en eau. La prise en compte de ce phénomène est-elle suffisante pour répondre au comportement thermohydrique réel du matériau ?

5

Le phénomène d'hystérésis

Le béton de chanvre présente un comportement hydrique fortement hystérétique. Ce phénomène complexe gouverne notamment les cinétiques de distribution d'humidité relative et influe sur les capacités de stockage et de transport hygrothermique au sein du matériau. Ce chapitre s'attache ainsi à la caractérisation expérimentale du phénomène d'hystérésis afin d'en proposer une modélisation. L'objectif est alors d'évaluer l'impact réel de ce phénomène hystérétique sur la réponse du matériau.

SOMMAIRE

5.1. L'hystérésis ou le retard de l'effet sur la cause	206
5.1.1. Pourquoi étudier le phénomène d'hystérésis?	206
5.1.2. Origine du phénomène d'hystérésis	206
5.1.3. L'histoire hydrique	208
5.2. Caractérisation expérimentale de l'hystérésis du béton de chanvre	209
5.3. Prise en compte du phénomène d'hystérésis	211
5.3.1. Modélisation du phénomène d'hystérésis	211
5.3.2. Le modèle physique de Carmeliet	211
5.3.3. Le modèle mathématique de Huang	213
5.3.4. Le modèle empirique de Pedersen	215
5.3.5. Comparaison théorique des modèles	216
5.3.5.1. Points d'inversion.....	216
5.3.5.2. La $i^{\text{ème}}$ branche d'adsorption	217
5.3.5.3. La $i^{\text{ème}}$ branche de désorption.....	219
5.3.6. Traitement numérique	220
5.3.7. Validation numérique	222
5.4. Application au béton de chanvre	226
5.4.1. Modélisation de la courbe de désorption principale du béton de chanvre	226
5.4.1.1. Principe mathématique	226
5.4.1.2. Application	228
5.4.1.2.1. Courbe de désorption principale Easy R.....	228
5.4.1.2.2. Courbe de désorption principale Easy R-bis.....	229
5.4.1.3. Bilan et synthèse.....	230
5.4.2. Analyse du phénomène d'hystérésis : étude du béton de chanvre Easy R-bis.....	231
5.4.2.1. Etude du modèle de Pedersen.....	231
5.4.2.2. Application du modèle de Carmeliet.....	233
5.4.2.3. Application du modèle de Huang	234
5.4.2.4. Comparaison des modèles	235
5.4.3. Analyse et conclusion.....	237
5.5. Validation de la modélisation de l'hystérésis sur des essais de capacité hydrique	239
5.5.1. Définition et caractérisation de l'essai	239
5.5.2. Application au béton de chanvre Easy R	241
5.5.2.1. Résultats expérimentaux	241
5.5.2.2. Etude numérique	242
5.5.3. Application au béton de chanvre Easy P	244
5.5.3.1. Courbe de désorption principale du béton de chanvre Easy P	244

5.5.3.1.1. Analyse de l'influence de la masse volumique.....	244
5.5.3.1.2. Analyse des capacités hydriques.....	245
5.5.3.1.3. Confrontation expérimentale.....	246
5.5.4. Bilan	249
5.6. Application à la paroi.....	250
5.6.1. Influence de la prise en compte de l'hystérésis.....	250
5.6.2. Histoire hydrique et teneur en eau initiale.....	251
5.6.2.1. Teneurs en eau initiale extrêmes	252
5.6.2.2. Teneurs en eau initiales intermédiaires	255
5.6.2.3. Gradients de teneur en eau initiale	257
5.6.2.4. Optimisation de la réponse numérique.....	260
5.6.3. Application à une autre séquence isotherme	261
5.7. Conclusion.....	263

5.1. L'hystérésis ou le retard de l'effet sur la cause

5.1.1. Pourquoi étudier le phénomène d'hystérésis?

L'hystérésis qui caractérise l'isotherme de sorption décrite au chapitre 3 n'est pas propre au béton de chanvre ou aux matériaux à base végétale mais se rencontre plus généralement pour tout type de milieu poreux.

Les recherches sur le béton de chanvre montrent la nécessité de prendre en compte le phénomène d'hystérésis dans le modèle global de transferts [Samri 2008, Tran Le 2011]. Le manque de données expérimentales et l'angle de recherche choisis ont contraint ces travaux à ne pas s'intéresser en détail à ce phénomène.

Toutefois, de nombreuses études récentes ([Van Belleghem 2010, Steeman 2009, Kwiatkowski 2009] ...) se sont intéressées au phénomène d'hystérésis et montrent son influence sur les transferts d'humidité dans les matériaux de construction. Des résultats similaires sont observés pour le béton de chanvre à partir d'une approche purement numérique [Aït Ouméziane 2011]. En effet, les isothermes d'adsorption et de désorption principales ne décrivent pas l'évolution réelle de la teneur en eau en usage courant. Ces courbes principales peuvent être considérées comme des limites physiques à l'évolution de la teneur en eau. La teneur en eau à une humidité relative donnée située entre les courbes principales dépend de l'histoire thermohydrrique vécue par le matériau et est décrite par des courbes intermédiaires. L'hystérésis se traduit par une diminution de la capacité hydrique par rapport à celle des courbes principales.

Dès lors la question se pose : comment prendre en compte ce phénomène ? Par ailleurs, la prise en compte du phénomène d'hystérésis permet-elle de répondre de manière plus satisfaisante au comportement hygrothermique du béton de chanvre sous sollicitations climatiques ?

Afin de répondre à ces questions, ce chapitre est divisé en trois parties qui ont des objectifs clairement définis :

- D'une part, il s'agit de caractériser expérimentalement le phénomène d'hystérésis au sein du béton de chanvre par l'obtention de courbes intermédiaires expérimentales.
- D'autre part, il s'agit d'évaluer et d'analyser les modèles d'hystérésis capables de reproduire le comportement hystérétique du béton de chanvre.
- Enfin, l'impact du phénomène d'hystérésis est évalué numériquement en reprenant les simulations décrites au chapitre 4.

5.1.2. Origine du phénomène d'hystérésis

Le phénomène capillaire d'hystérésis est attribué principalement à la morphologie de l'espace poral d'une part et à l'angle de contact de l'interface liquide/solide d'autre part.

La morphologie de l'espace poral se traduit par l'effet de l'arrangement spatial des pores, c'est-à-dire le blocage des pores face à l'entrée d'air dans les processus de désorption et face à

l'entrée d'eau lors des processus d'adsorption. Elle participe également à l'effet « bouteille d'encre » (cf. figure 5-1). Le remplissage d'un pore en forme de bouteille d'encre, sous pression croissante, ne se fait que lorsque la pression atteint la valeur nécessaire pour remplir le col du rayon d'entrée. Lors de la vidange de ce pore, lorsque la pression atteint de nouveau cette valeur, le ménisque qui remplit le col d'accès se vidange, la continuité du liquide se rompt et une certaine quantité d'eau reste piégée dans le pore.

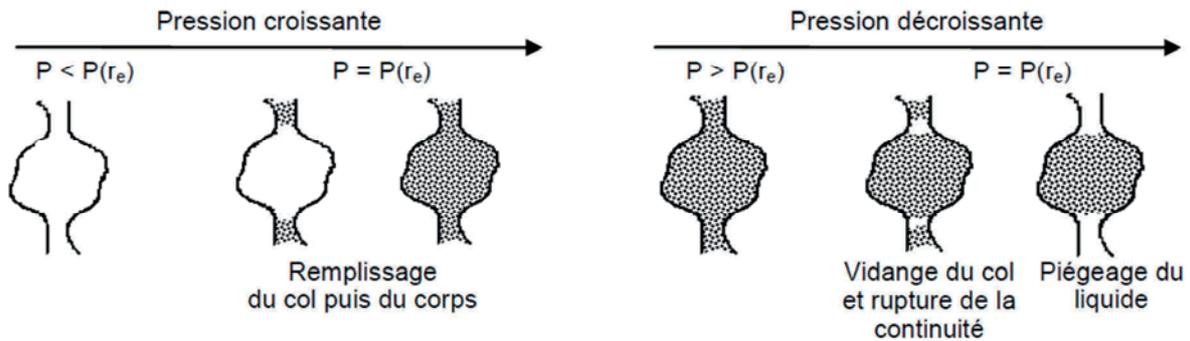


Figure 5-1 Effet bouteille d'encre³¹

L'autre cause avancée pour expliquer le phénomène d'hystérésis est lié à l'angle de contact (cf. figure 5-2).

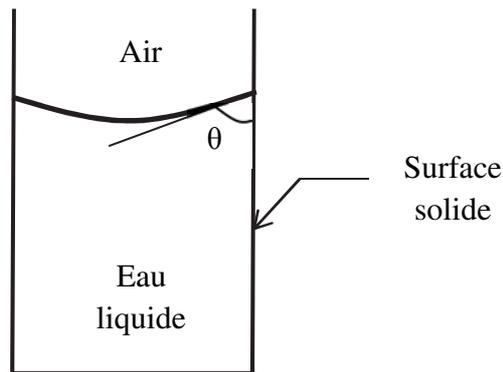


Figure 5-2 Angle de contact à l'interface liquide/solide

Les lois de Young-Laplace et de Kelvin permettent d'exprimer l'humidité relative φ en fonction de la tension superficielle σ , du rayon de pore r et de l'angle de contact θ :

$$\varphi = e^{\frac{-2\sigma\cos\theta}{\rho_l M_l T r}} \quad (5-1)$$

Il existe un écart d'angle de contact de quelques degrés selon que le matériau est en phase d'adsorption ou de désorption [Laroussi 1972]. Plus la surface porale est rugueuse, plus l'angle formé est important. L'hystérésis s'explique alors par le fait que l'angle θ devient plus grand en adsorption qu'en désorption [Berit 1998].

³¹ Schéma extrait de [Collet 2004]

5.1.3. L'histoire hydrique

La teneur en eau d'un matériau poreux au comportement hystérétique ne peut être évaluée indépendamment de l'histoire hydrique vécue par le matériau. En effet, les variations continues d'humidité relative et de température auxquelles est soumise la paroi engendrent une évolution de la teneur en eau. Lorsque l'on s'intéresse à l'étude du comportement hygrothermique d'une paroi à un instant donné, l'évaluation de la teneur en eau initiale ne peut s'affranchir de l'influence de l'histoire vécue par le matériau. Cependant, sans un suivi régulier du matériau (stockage du matériau, sollicitations en cours de vie...), il est impossible de connaître précisément la teneur en eau locale. D'un point de vue numérique, il est envisageable de créer une histoire fictive ou d'imposer une teneur en eau initiale pour tenter de reproduire les cycles de variations d'humidité et de température réellement vécues par le matériau (cf. figure 5-3).

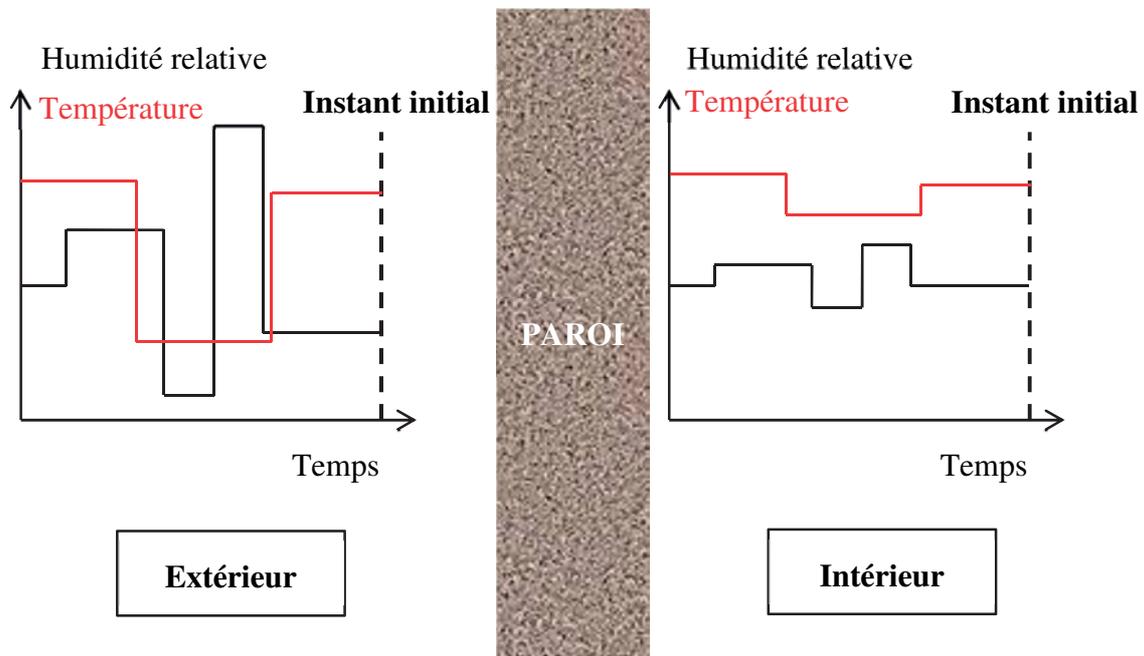


Figure 5-3 Chargement hydrique d'une paroi

L'histoire hydrique est difficile à apprécier. Les sollicitations climatiques extérieures et intérieures sont très généralement différentes l'une de l'autre et fluctuent rapidement ce qui ne permet pas l'établissement d'un régime permanent. La teneur en eau au sein de la paroi possède une distribution donc inhomogène qui se traduit par l'existence de gradients de teneur en eau.

La prise en compte numérique de cette particularité justifie l'utilisation d'un modèle d'hystérésis.

L'influence de l'histoire hydrique et de la manière dont elle est simulée est discutée par la suite.

5.2. Caractérisation expérimentale de l'hystérésis du béton de chanvre

Afin de caractériser ce phénomène, une campagne expérimentale a été menée au laboratoire pour déterminer les courbes intermédiaires à la température de référence de 23°C à partir d'échantillons Easy R-bis dont la masse volumique apparente à l'état sec est de 396 kg.m^{-3} . La détermination de la branche expérimentale d'adsorption principale de ce béton de chanvre Easy R-bis a été présentée au chapitre 3.

A partir de cette courbe d'adsorption principale, deux courbes intermédiaires de désorption primaire sont construites en imposant des humidités décroissantes. Elles suivent le « chemin hydrique » 53-23%HR et 81-43-23%HR respectivement. Par la suite, les courbes d'adsorption secondaires 23-53%HR et 23-43-81%HR sont également construites en réimposant des humidités croissantes aux échantillons. Le processus expérimental suivi pour construire ces branches intermédiaires est basé sur les méthodes du dessiccateur et de la chambre climatique qui imposent une humidité relative donnée.

Les résultats bruts sont représentés figure 5-4.

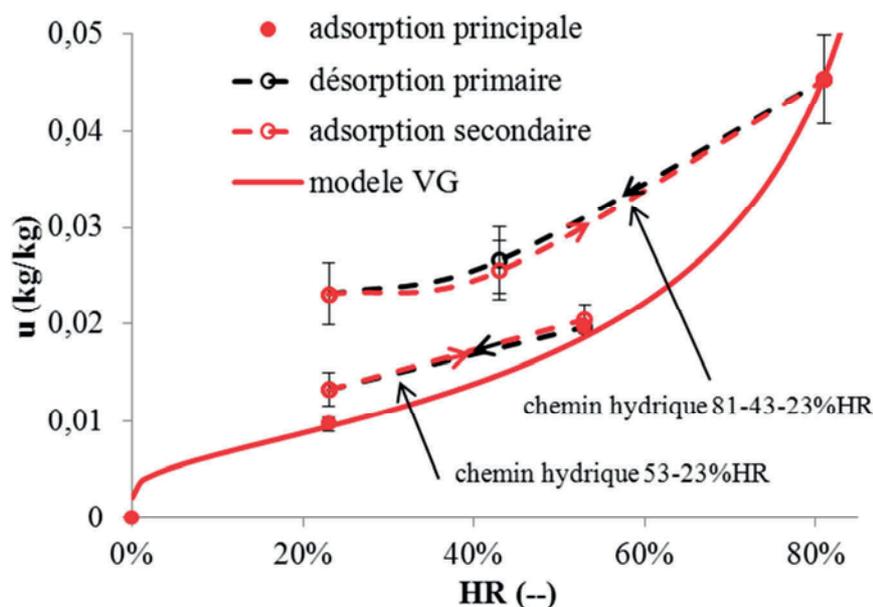


Figure 5-4 Courbes intermédiaires de sorption/désorption et courbe principale d'adsorption du béton de chanvre Easy R-bis (interpolations en traits pointillés non représentatives (Excel))

La construction de ces courbes intermédiaires révèle tout d'abord que le phénomène d'hystérésis influence clairement sur l'évolution de la teneur en eau au sein du béton de chanvre. La courbe d'adsorption principale sous-estime la valeur réelle de teneur en eau du matériau. En phase d'adsorption secondaire, on constate qu'aux humidités relatives étudiées à 53% et 81%HR, les teneurs en eau obtenues sont très proches de celles des désorptions primaires.

En outre, la capacité hydrique de stockage caractérisée par la pente des courbes intermédiaires apparaît bien plus faible pour les courbes intermédiaires que pour la courbe d'adsorption

principale. Ce résultat montre que le choix simple et usuel de la courbe d'adsorption principale pour décrire l'évolution de la teneur en eau du béton de chanvre conduit à une surestimation de la capacité hydrique réelle.

L'étude théorique et numérique du phénomène d'hystérésis semble donc incontournable pour décrire correctement le comportement thermohydrique du béton de chanvre d'une part afin de faire une estimation correcte de la valeur de la teneur en eau réelle et d'autre part pour évaluer la capacité hydrique réelle du matériau.

5.3. Prise en compte du phénomène d'hystérésis

5.3.1. Modélisation du phénomène d'hystérésis

Selon [Lehmann 1998], il existe deux principaux types de modèles d'hystérésis dans la littérature auxquels on peut ajouter les approches empiriques :

- les modèles physiques de type Mualem
- les modèles mathématiques de type Kool et Parker
- les modèles empiriques de type Pedersen

Hormis les modèles empiriques, les deux autres groupes de modèles sont dépendants du domaine ce qui signifie que seuls les pores ayant accès à l'air ambiant sont capables de recevoir ou d'évacuer l'humidité. Cet accès est conditionné par le fait que les pores adjacents soient remplis d'eau ou d'air. Les modèles physiques expliquent l'allure des courbes intermédiaires par les propriétés physiques du matériau comme la distribution du rayon des pores [Mualem 1974]. Les modèles mathématiques supposent que les courbes intermédiaires ont une forme analogue aux courbes principales [Kool & Parker 1987]. Leurs expressions mathématiques sont ainsi similaires à celles des courbes principales. Le phénomène d'hystérésis peut également être décrit par une approche empirique comme le propose le modèle de Pedersen [Pedersen 1990].

Il existe une différence fondamentale entre les modèles mathématiques et physiques d'une part et les modèles empiriques d'autre part : les deux premiers types de modèles sont des modèles prédictifs qui ne nécessitent que la connaissance des isothermes de sorption/désorption principales alors que l'empirisme des modèles de type Pedersen requiert la connaissance d'au moins une courbe primaire.

Les trois types de modèles sont étudiés dans ce chapitre au travers de modèles décrits dans la littérature :

- le modèle physique de Carmeliet [Carmeliet 2005] basé sur le modèle de Mualem
- le modèle mathématique de Huang [Huang 2005] basé sur le modèle de Kool et Parker
- le modèle empirique de Pedersen

5.3.2. Le modèle physique de Carmeliet

Le modèle d'hystérésis de Mualem est représenté schématiquement dans un espace à deux dimensions appelé espace de Mualem. Il est défini par deux fonctions f et a (espace f - a). La fonction f caractérise la distribution des sites de sorption possibles et la fonction normalisée a l'accessibilité à ces sites de sorption. La teneur en eau est ainsi définie par intégration dans l'espace de Mualem des fonctions f et a . L'évaluation de la courbe d'adsorption principale permet de définir la fonction f à partir de sa primitive :

$$u = u_{ads}(\varphi) = \int_0^{\varphi} f(\varphi) d\varphi \int_0^1 a(\varphi) d\varphi = F(\varphi) \quad (5-2)$$

On note A la primitive de la fonction a . Puisque a est normalisée, $A(1) = 1$. En effet, lorsque le matériau adsorbe l'humidité de 0 à φ , toutes les sites sont accessibles (cf. figure 5-5 a)).

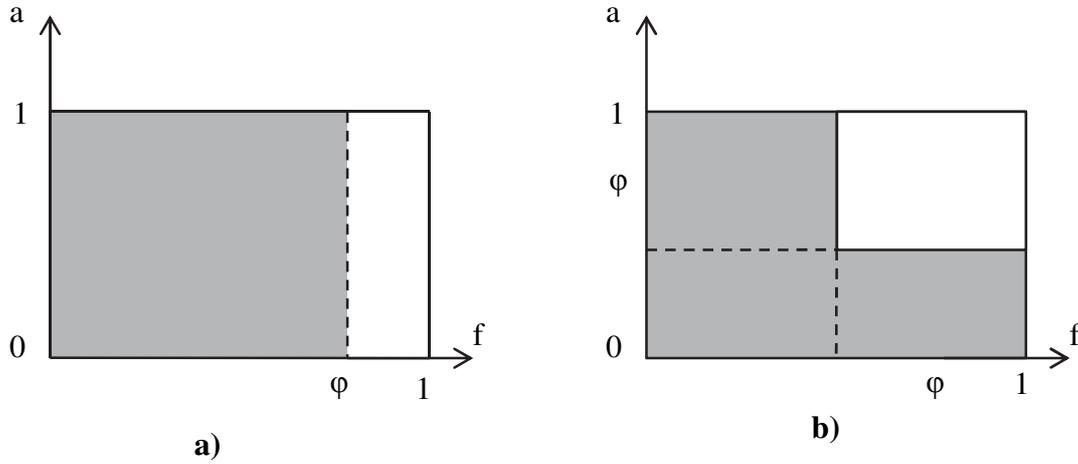


Figure 5-5 Espace f - a de la courbe d'adsorption principale a) et de la courbe de désorption principale b)

L'évaluation de la courbe de désorption principale permet de définir la fonction a à partir de sa primitive A . Ainsi, lorsque l'on désorbe de 1 à φ , seuls les pores accessibles à la désorption de 1 à φ sont affectés. Certains pores ne se vident pas totalement du fait de la présence d'eau piégée liée à l'effet bouteille d'encre (cf. figure 5-5 b)).

$$\begin{aligned} u &= u_{des}(\varphi) = \int_0^{\varphi_{max}} f(\varphi) d\varphi \int_0^1 a(\varphi) d\varphi - \int_{\varphi}^{\varphi_{max}} f(\varphi) d\varphi \int_{\varphi}^1 a(\varphi) d\varphi \\ &= u_{sat} - (u_{sat} - F(\varphi))(1 - A(\varphi)) \end{aligned} \quad (5-3)$$

La simplification de la relation (5-3) permet d'obtenir :

$$A(\varphi) = \frac{u_{des}(\varphi) - u_{ads}(\varphi)}{u_{sat} - u_{ads}(\varphi)} \quad (5-4)$$

La répétition de ce raisonnement pour une $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire d'adsorption conduit à la relation :

$$u(\varphi, i) = u_{i-1} + (1 - A(\varphi_{i-1}))(u_{ads}(\varphi) - u_{ads}(\varphi_{i-1})) \quad (5-5)$$

où (φ_{i-1}, u_{i-1}) désigne le $i^{\text{ème}}$ point d'inversion entre la $i-1^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire de désorption et la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire d'adsorption.

De la même manière, la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire de désorption s'écrit :

$$u(\varphi, i) = u_{i-1} - (1 - A(\varphi))(u_{ads}(\varphi_{i-1}) - u_{ads}(\varphi)) \quad (5-6)$$

où (φ_{i-1}, u_{i-1}) désigne le $i^{\text{ème}}$ point d'inversion entre la $i-1^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire de d'adsorption et la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire de désorption.

On adopte la notation $u(\varphi, i)$ pour désigner la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire, i désignant l'ordre de la courbe intermédiaire.

Les figures 5-6 a) et b) représentent les courbes d'adsorption et de désorption primaires (ordre 1) dans l'espace de Mualem.

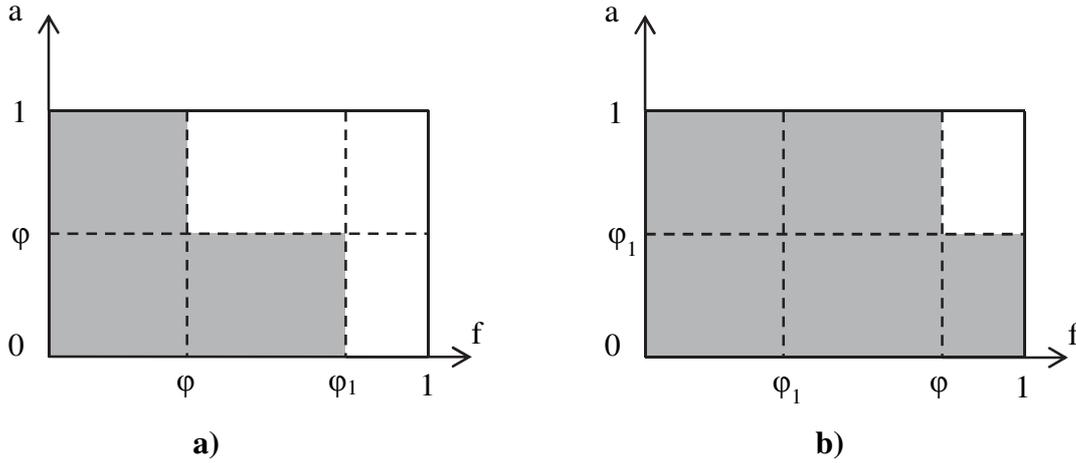


Figure 5-6 Espace f - a de la courbe d'adsorption primaire a) et de la courbe de désorption primaire b)

5.3.3. Le modèle mathématique de Huang

Les modèles mathématiques de type Kool et Parker supposent que les courbes intermédiaires ont une forme similaire aux courbes d'adsorption et de désorption principales. Ainsi, la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire reprend la forme du modèle de Van Genuchten précédemment utilisé :

$$u(\varphi, i) = u_r(i) + (u_s(i) - u_r(i)) \left[\left(1 + \left| \alpha \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right|^\eta \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)} \right] \quad (5-7)$$

Les indices α et η sont les paramètres issus des expressions des courbes principales d'adsorption et de désorption. $u_r(i)$ et $u_s(i)$ désignent respectivement les teneurs en eau résiduelle et de saturation de la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire.

Il est à noter que les courbes principales d'adsorption/désorption fournissent les valeurs des teneurs en eau résiduelle et de saturation à l'ordre 0 : $u_r(0) = 0$ et $u_s(0) = u_{\text{sat}}$.

Selon le formalisme adopté par Huang, le terme entre crochets dans l'équation (5-7) est le même pour toutes les courbes intermédiaires dépendant uniquement de la phase, adsorption ou désorption. La détermination de la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire est ainsi uniquement basée sur les paramètres $u_r(i)$ et $u_s(i)$. Le calcul de ces paramètres s'appuie sur le fait que les dernier et

avant-dernier points d'inversion respectivement (φ_i, u_i) et (φ_{i-1}, u_{i-1}) appartiennent à la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire (cf. figure 5-7).

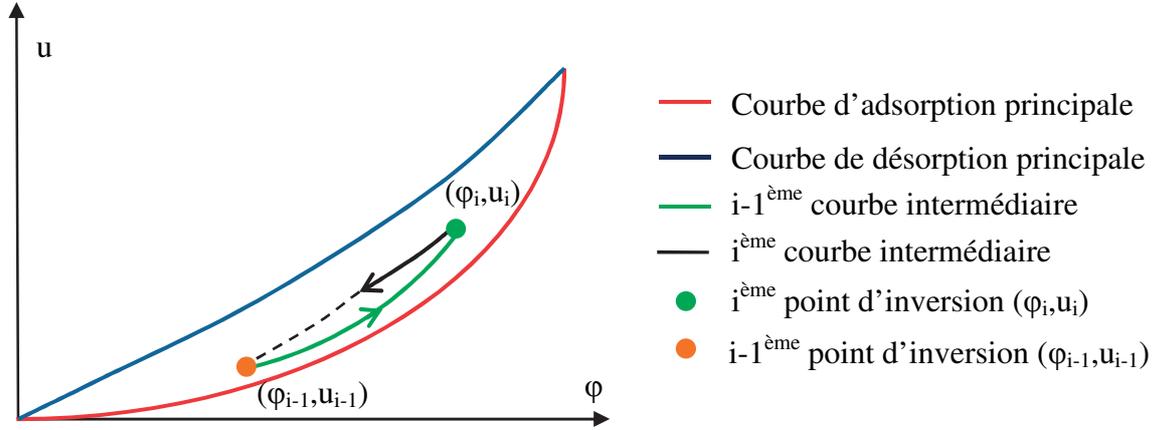


Figure 5-7 Représentation schématique de la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire de désorption

Sur ce principe, déterminer $u_r(i)$ et $u_s(i)$ revient à résoudre un système linéaire à deux équations. La partie suivante détaille le processus de construction de ces courbes intermédiaires.

Sont tout d'abord introduites les fonctions f et g qui s'écrivent respectivement :

$$f(\varphi) = \left[\left(1 + \left| \alpha_{ads} \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right|^{\eta_{ads}} \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta_{ads}}\right)} \right] \quad (5-8)$$

$$g(\varphi) = \left[\left(1 + \left| \alpha_{des} \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right|^{\eta_{des}} \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta_{des}}\right)} \right] \quad (5-9)$$

La $i^{\text{ème}}$ branche de désorption s'écrit alors :

$$u(\varphi, i) = u_r(i) + (u_s(i) - u_r(i))g(\varphi) \quad (5-10)$$

Or, la $i^{\text{ème}}$ branche de désorption passe par les points d'inversion (φ_i, u_i) et (φ_{i-1}, u_{i-1}) d'où :

$$\begin{cases} u_i = u_r(i) + (u_s(i) - u_r(i))g(\varphi_i) \\ u_{i-1} = u_r(i) + (u_s(i) - u_r(i))g(\varphi_{i-1}) \end{cases} \quad (5-11)$$

La résolution de ce système permet ainsi d'écrire les expressions des teneurs en eau résiduelle et de saturation.

$$\begin{cases} u_r(i) = \frac{u_i g(\varphi_{i-1}) - u_{i-1} g(\varphi_i)}{g(\varphi_{i-1}) - g(\varphi_i)} \\ u_s(i) = \frac{u_{i-1}(1 - g(\varphi_i)) - u_i(1 - g(\varphi_{i-1}))}{g(\varphi_{i-1}) - g(\varphi_i)} \end{cases} \quad (5-12)$$

En raisonnant de manière analogue, les teneurs en eau résiduelle et de saturation d'une $i^{\text{ème}}$ branche d'adsorption ont pour expression :

$$\begin{cases} u_r(i) = \frac{u_i f(\varphi_{i-1}) - u_{i-1} f(\varphi_i)}{f(\varphi_{i-1}) - f(\varphi_i)} \\ u_s(i) = \frac{u_{i-1}(1 - f(\varphi_i)) - u_i(1 - f(\varphi_{i-1}))}{f(\varphi_{i-1}) - f(\varphi_i)} \end{cases} \quad (5-13)$$

Et la $i^{\text{ème}}$ branche d'adsorption s'écrit alors :

$$u(\varphi, i) = u_r(i) + (u_s(i) - u_r(i))f(\varphi) \quad (5-14)$$

5.3.4. Le modèle empirique de Pedersen

Le modèle de Pedersen est basé sur une pondération des capacités hydriques des courbes d'adsorption et de désorption principales.

Ainsi, après une série de processus alternés d'adsorption/désorption, la capacité hydrique d'une courbe intermédiaire d'adsorption prend la forme :

$$\left. \frac{du}{d\varphi} \right|_{hyst,ads} = \frac{A(u - u_{ads})^B \left. \frac{du}{d\varphi} \right|_{des} + (u - u_{des})^B \left. \frac{du}{d\varphi} \right|_{ads}}{(u_{des} - u_{ads})^B} \quad (5-15)$$

De la même manière, la capacité hydrique d'une courbe intermédiaire de désorption prend la forme :

$$\left. \frac{du}{d\varphi} \right|_{hyst,des} = \frac{(u - u_{ads})^B \left. \frac{du}{d\varphi} \right|_{des} + C(u - u_{des})^B \left. \frac{du}{d\varphi} \right|_{ads}}{(u_{des} - u_{ads})^B} \quad (5-16)$$

u_{ads} (kg/kg) et u_{des} (kg/kg) désignent les teneurs en eau respectivement des courbes d'adsorption et de désorption principales et u (kg/kg) la teneur en eau réelle.

Pour déterminer les paramètres A, B et C, trois approches différentes peuvent être envisagées :

- choisir les valeurs proposées par Pedersen à savoir : $A = C = 0,1$ et $B = 2$. Ainsi, il n'est pas nécessaire de connaître expérimentalement une courbe d'adsorption ou de désorption primaire. Cependant, de nombreuses recherches montrent qu'il convient de

déterminer ces coefficients en fonction des matériaux étudiés, leur comportement hydrique pouvant être assez éloigné ([Carmeliet 2005], [Frandsen 2005]).

- supposer que les coefficients sont identiques pour les courbes intermédiaires d'adsorption et désorption. La connaissance d'une courbe primaire et d'une courbe secondaire est alors nécessaire.
- choisir $B = 2$. A et C sont alors différents selon que l'on se place en phase d'adsorption ou de désorption. La connaissance d'une courbe primaire de désorption et d'une courbe secondaire d'adsorption est alors requise.

5.3.5. Comparaison théorique des modèles

Le modèle de Pedersen ne peut être comparé directement aux deux autres modèles en raison de sa nature empirique. Uniquement les modèles mathématique de Huang et physique de Carmeliet sont ainsi comparés.

5.3.5.1. Points d'inversion

Dans le formalisme adopté de Huang, il existe une fermeture des courbes intermédiaires entre les points d'inversion dans la construction des courbes intermédiaires (cf. figure 5-8). La question est donc de savoir si le modèle de Carmeliet vérifie également cette fermeture.

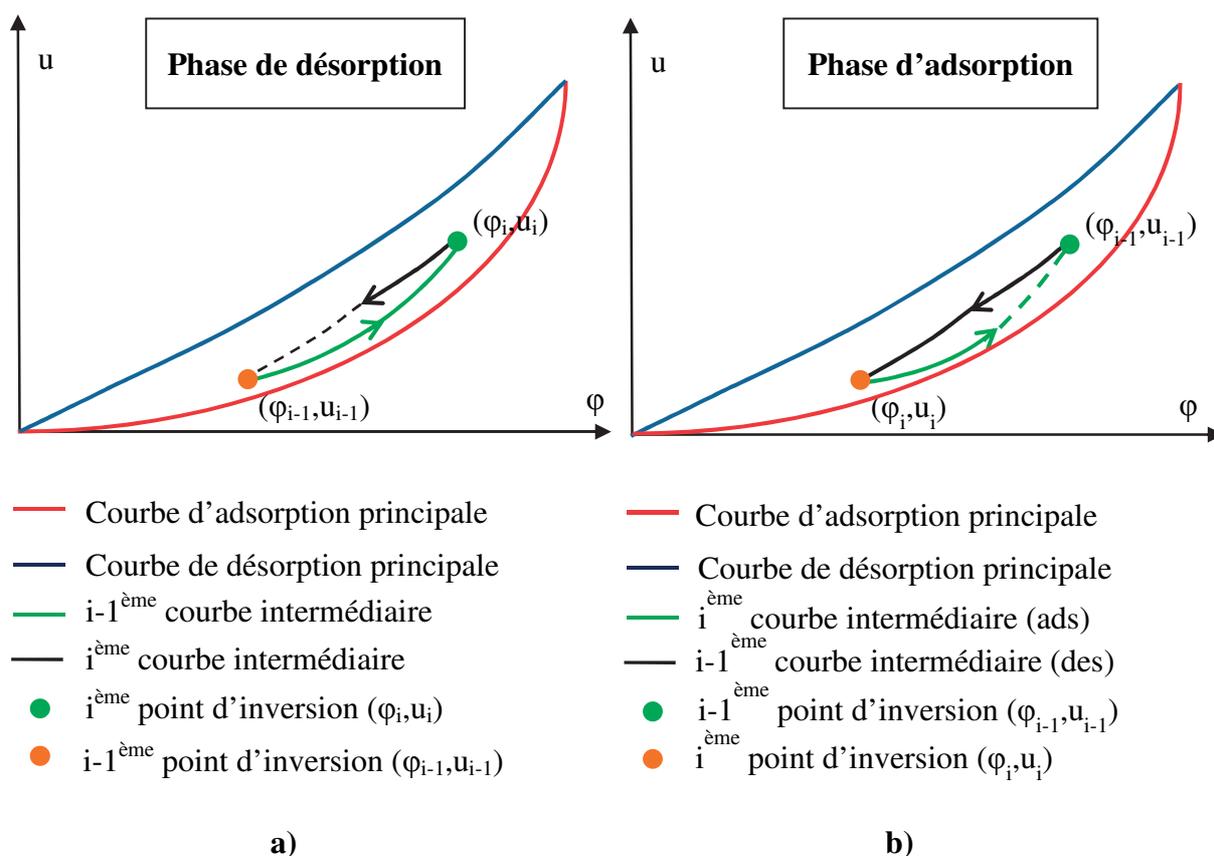


Figure 5-8 Représentation schématique de la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire en phase de désorption (à gauche a)) et d'adsorption (à droite b))

On note X [kg/kg] la teneur en eau massique du point de la $i^{\text{ème}}$ courbe intermédiaire tel que $X = u(\varphi_{i-1})$.

En phase d'adsorption :

Le point (φ_{i-1}, X) appartient à la $i^{\text{ème}}$ branche d'adsorption (figure 5-8 b)) donc, d'après le modèle de Carmeliet, on a :

$$X = u_i - (1 - A(\varphi_i))(u_{ads}(\varphi_{i-1}) - u_{ads}(\varphi_i)) \quad (5-17)$$

De plus, le point (φ_i, u_i) appartient à la $i-1^{\text{ème}}$ branche de désorption donc il vérifie :

$$u_i = u_{i-1} + (1 - A(\varphi_i))(u_{ads}(\varphi_{i-1}) - u_{ads}(\varphi_i)) \quad (5-18)$$

En substituant l'expression de u_i de l'équation (5-18) dans l'équation (5-17), on obtient finalement :

$$X = u_{i-1} \quad (5-19)$$

En phase de désorption :

On utilise un raisonnement analogue : le point (φ_{i-1}, X) appartient à la $i^{\text{ème}}$ branche de désorption (figure 5-8 a)) donc, d'après le modèle de Carmeliet, on a :

$$X = u_i + (1 - A(\varphi_{i-1}))(u_{ads}(\varphi_i) - u_{ads}(\varphi_{i-1})) \quad (5-20)$$

Le point (φ_{i-1}, u_{i-1}) appartient à la $i-1^{\text{ème}}$ branche d'adsorption donc il vérifie :

$$u_i = u_{i-1} - (1 - A(\varphi_{i-1}))(u_{ads}(\varphi_i) - u_{ads}(\varphi_{i-1})) \quad (5-21)$$

En procédant par substitution, on montre que l'on obtient finalement :

$$X = u_{i-1} \quad (5-22)$$

Le modèle de Carmeliet, issu du formalisme de Mualem, vérifie donc bien le critère de fermeture imposé par Huang.

5.3.5.2. La $i^{\text{ème}}$ branche d'adsorption

On rappelle que la $i^{\text{ème}}$ branche d'adsorption écrite avec le modèle de Huang a pour expression :

$$u(\varphi, i) = u_r(i) + (u_s(i) - u_r(i))f(\varphi) \quad (5-23)$$

Le développement des termes résiduel et de saturation conduit ainsi à :

$$\begin{cases} u_r(i) = \frac{u_i f(\varphi_{i-1}) - u_{i-1} f(\varphi_i)}{f(\varphi_{i-1}) - f(\varphi_i)} \\ u_s(i) - u_r(i) = -\frac{u_i - u_{i-1}}{f(\varphi_{i-1}) - f(\varphi_i)} \end{cases} \quad (5-24)$$

Parallèlement, l'écriture du modèle de Carmeliet sous cette forme devient pour la $i^{\text{ème}}$ branche d'adsorption :

$$u(\varphi, i) = u_i + (1 - A(\varphi_i))(u_{sat} f(\varphi_i)) + (1 - A(\varphi_i))u_{sat} f(\varphi) \quad (5-25)$$

soit :

$$\begin{cases} [u_r(i)]^{carmeliet} = u_{i-1} + (1 - A(\varphi_i))(u_{sat} f(\varphi_i)) \\ [u_s(i) - u_r(i)]^{carmeliet} = (1 - A(\varphi_i))u_{sat} \end{cases} \quad (5-26)$$

Il a été montré au paragraphe précédent que le point (φ_{i-1}, u_{i-1}) appartient à la $i^{\text{ème}}$ branche de d'adsorption d'où en utilisant la relation (5-25) :

$$u_{i-1} = u_i + (1 - A(\varphi_i))(u_{sat} f(\varphi_i)) + (1 - A(\varphi_i))u_{sat} f(\varphi_{i-1}) \quad (5-27)$$

Par ailleurs, le point (φ_i, u_i) appartient à la $i-1^{\text{ème}}$ branche de désorption donc :

$$u_i = u_{i-1} - (1 - A(\varphi_i))u_{sat}(f(\varphi_{i-1}) - f(\varphi_i)) \quad (5-28)$$

La soustraction de l'équation (5-27) à l'équation (5-28) conduit à :

$$\begin{aligned} u_i - u_{i-1} &= u_{i-1} - (1 - A(\varphi_i))u_{sat}(f(\varphi_{i-1}) - f(\varphi_i)) \\ &\quad - u_i - (1 - A(\varphi_i))(u_{sat} f(\varphi_i)) - (1 - A(\varphi_i))u_{sat} f(\varphi_{i-1}) \end{aligned} \quad (5-29)$$

La simplification de cette expression permet d'obtenir la relation :

$$u_i - u_{i-1} = (1 - A(\varphi_i))u_{sat}(f(\varphi_i) - f(\varphi_{i-1})) \quad (5-30)$$

Ainsi, on obtient au final :

$$\begin{aligned} [u_s(i) - u_r(i)]^{carmeliet} &= (1 - A(\varphi_i))u_{sat} \\ &= \frac{u_i - u_{i-1}}{f(\varphi_i) - f(\varphi_{i-1})} \\ &= [u_s(i) - u_r(i)]^{huang} \end{aligned} \quad (5-31)$$

Par ailleurs,

$$[u_r(i)]^{carmeliet} = u_i + (1 - A(\varphi_i))(u_{sat} f(\varphi_i)) \quad (5-32)$$

En multipliant cette expression par $(f(\varphi_i) - f(\varphi_{i-1})) / (f(\varphi_i) - f(\varphi_{i-1}))$, on obtient après simplification :

$$[u_r(i)]^{carmeliet} = \frac{f(\varphi_i)[u_i + (1 - A(\varphi_i))(u_{sat})(f(\varphi_i) - f(\varphi_{i-1}))] - u_i f(\varphi_{i-1})}{f(\varphi_i) - f(\varphi_{i-1})} \quad (5-33)$$

Or, le point (φ_{i-1}, u_{i-1}) appartient à la $i^{\text{ème}}$ branche de d'adsorption donc la relation (5-27) qui le traduit est vérifiée. L'utilisation de cette relation dans l'équation (5-33) permet finalement d'écrire :

$$\begin{aligned} [u_r(i)]^{carmeliet} &= \frac{f(\varphi_i)u_{i-1} - u_i f(\varphi_{i-1})}{f(\varphi_i) - f(\varphi_{i-1})} \\ &= [u_r(i)]^{huang} \end{aligned} \quad (5-34)$$

En phase d'adsorption, les formulations de Huang et Carmeliet sont donc rigoureusement identiques.

5.3.5.3. La $i^{\text{ème}}$ branche de désorption

La démarche utilisée au paragraphe précédent est reproduite : on traduit le formalisme de Carmeliet par une relation analogue à celle Huang.

On rappelle que la $i^{\text{ème}}$ branche de désorption écrite avec le modèle de Huang a pour expression :

$$u(\varphi, i) = u_r(i) + (u_s(i) - u_r(i))g(\varphi) \quad (5-35)$$

Le développement de termes résiduel et de saturation conduit ainsi à :

$$\begin{cases} u_r(i) = \frac{u_i g(\varphi_{i-1}) - u_{i-1} g(\varphi_i)}{g(\varphi_{i-1}) - g(\varphi_i)} \\ u_s(i) - u_r(i) = -\frac{g_i - g_{i-1}}{g(\varphi_{i-1}) - g(\varphi_i)} \end{cases} \quad (5-36)$$

Parallèlement, l'écriture du modèle de Carmeliet sous cette forme devient pour la $i^{\text{ème}}$ branche d'adsorption :

$$u(\varphi, i) = u_i + (1 - A(\varphi))(u_{sat}f(\varphi_i)) + (1 - A(\varphi))u_{sat}f(\varphi) \quad (5-37)$$

soit :

$$\begin{cases} [u_r(i)]^{carmeliet} = u_{i-1} + (1 - A(\varphi))(u_{sat}f(\varphi_i)) \\ [u_s(i) - u_r(i)]^{carmeliet} = (1 - A(\varphi))u_{sat} \end{cases} \quad (5-38)$$

La différence entre les modèles de Huang et de Carmeliet en phase de désorption apparaît dès lors évidente. En effet, pour le modèle de Huang, les coefficients $u_r(i)$ et $u_s(i)$ sont constants alors que pour le modèle de Carmeliet, ils dépendent de l'humidité relative réelle.

L'application de ces modèles sur un cas pratique doit nous permettre de mettre en évidence l'impact de ces différences.

5.3.6. *Traitement numérique*

L'état hydrique du matériau est caractérisé par le couple humidité relative/teneur en eau (φ, u) .

L'élément clé du traitement numérique du phénomène d'hystérésis, quel que soit le modèle utilisé, est le critère de transition entre les phases de sorption. Il permet d'identifier notamment les points d'inversion. Il est fonction de la teneur en eau du matériau et s'écrit :

$$c_{inv} = [u(t) - u(t - \delta t)][u(t - \delta t) - u_{i-1}] \quad (5-39)$$

$u(t)$ (kg/kg) désigne la teneur en eau réelle du matériau à l'instant t , $u(t - \delta t)$ la teneur en eau à l'instant $t - \delta t$ et u_{i-1} la teneur en eau du dernier point d'inversion.

Numériquement, ce critère implicite est très contraignant car il nécessite d'introduire la teneur en eau réelle à l'instant t alors que le but est précisément de la déterminer.

La monotonie des courbes principales et intermédiaires permet néanmoins de l'exprimer en fonction des humidités relatives. Le critère d'inversion de phase retenu a ainsi pour expression :

$$c_{inv} = [\varphi(t) - \varphi(t - \delta t)][\varphi(t - \delta t) - \varphi_{i-1}] \quad (5-40)$$

$\varphi(t)$ (kg/kg) désigne l'humidité relative réelle du matériau à l'instant t , $\varphi(t - \delta t)$ l'humidité relative à l'instant $t - \delta t$ et φ_{i-1} l'humidité relative du dernier point d'inversion.

Si $c_{inv} > 0$, on n'a pas d'inversion. A l'inverse, si $c_{inv} < 0$, on a inversion de phase et $(\varphi(t - \delta t), u(t - \delta t))$ devient le nouveau dernier point d'inversion : $\varphi(t - \delta t) = \varphi_i$ et $u(t - \delta t) = u_i$.

Concernant les modèles de Huang et Carmeliet, le processus d'implémentation de l'hystérésis est le même. La figure 5-9 illustre à l'aide d'un diagramme la méthode d'évaluation de la teneur en eau dans le cadre de la modélisation de Huang. Présentée au chapitre 2, la paroi est discrétisée en un certain nombre de nœuds de maillage. Chaque point du maillage possède sa propre fonction teneur en eau puisque l'évolution de la teneur en eau y est différente. Ainsi, dans ce diagramme, i et j correspondent respectivement à l'ordre de la courbe intermédiaire et au nœud de maillage. $param$ désigne l'ensemble des paramètres qui permettent de construire les branches intermédiaires. Il est évident que $param$ est différent selon le choix du modèle.

A un instant t donné, si l'humidité relative réelle $\varphi(t)$ est en dehors de l'intervalle défini par les précédents points d'inversion $[\varphi_{i-1}, \varphi_i]$ ou $[\varphi_i, \varphi_{i-1}]$ selon que l'on soit respectivement en désorption ou en adsorption, il est possible que le couple $(\varphi(t), u(t))$ se trouve sur une courbe intermédiaire d'ordre inférieur.

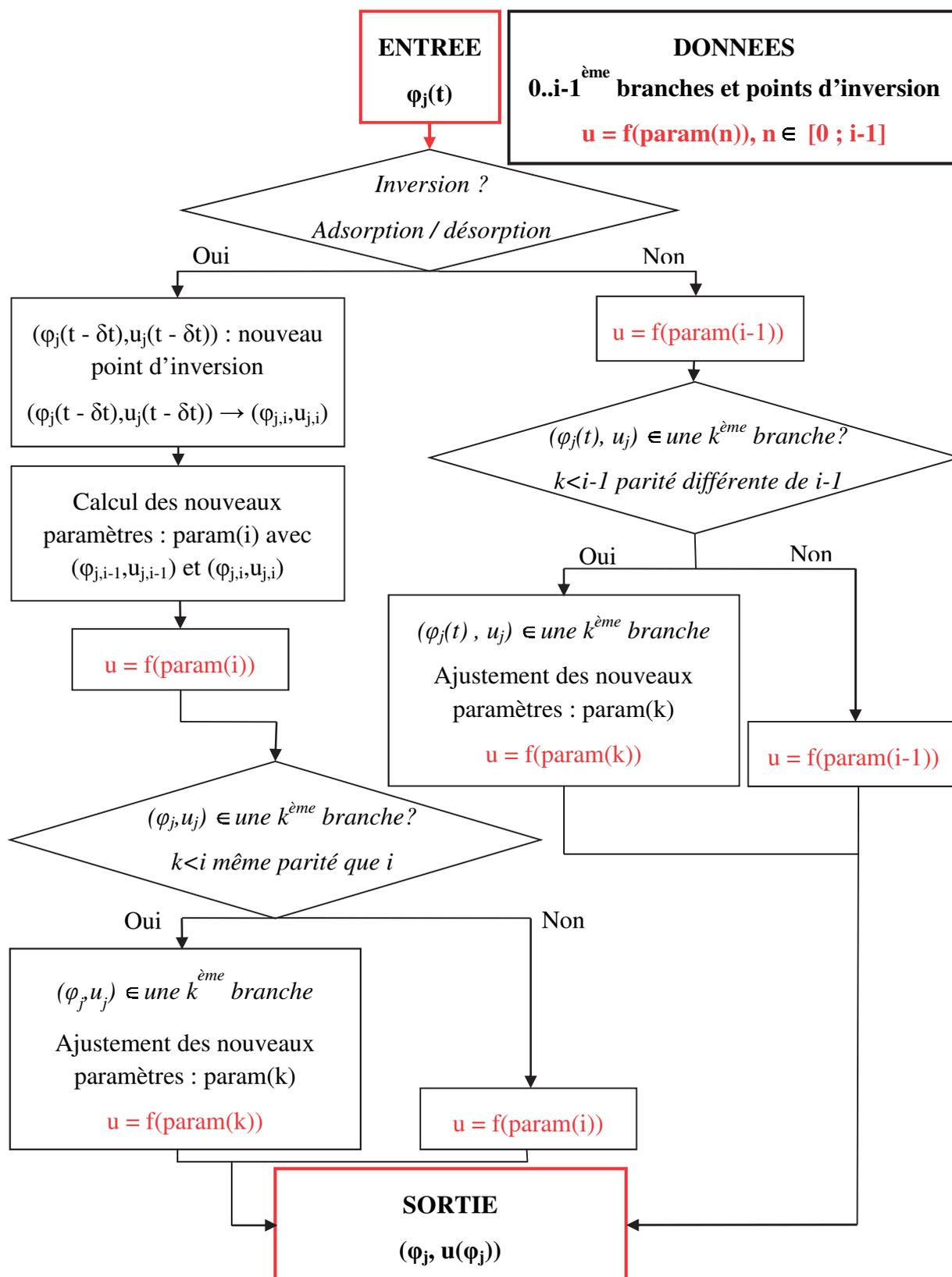


Figure 5-9 Diagramme algorithmique d'évaluation de la teneur en eau avec le modèle de Huang

Par ailleurs, l'implémentation du modèle de Pedersen ne nécessite pas un traitement numérique aussi avancé ce qui peut justifier son utilisation en première approximation.

5.3.7. Validation numérique

Dans un premier temps, les modèles d'hystérésis développés précédemment, mathématique, physique et empirique, sont testés sur les cas expérimentaux et théoriques présentés par Carmeliet dans [Carmeliet 2005].

Le matériau utilisé dans cette étude est le bois de chêne. Carmeliet y compare son modèle physique basé sur les travaux de Mualem et le modèle empirique de Pedersen avec les résultats expérimentaux issus d'essais de sorption.

Les courbes d'adsorption et de désorption principales sont décrites par les expressions :

$$\begin{cases} u_{ads}(\varphi) = u_{sat} \left(1 - \frac{\ln(\varphi)}{\alpha_a} \right)^{-\frac{1}{n_a}} \\ u_{des}(\varphi) = u_{sat} \left(1 - \frac{\ln(\varphi)}{\alpha_d} \right)^{-\frac{1}{n_d}} \end{cases} \quad (5-41)$$

Le calage des paramètres A, B et C utilisés pour construire le modèle de Pedersen se fait à partir de la détermination expérimentale de branches d'adsorption et de désorption primaires.

L'ensemble des paramètres déterminés et utilisés par Carmeliet est synthétisé dans le tableau 5-1 :

	u_{sat} (kg/kg)	α	1/n	A	B	C
Adsorption	0,25	0,402	1,349	0,921	2	
Désorption	0,25	1,284	2,178		2	0,285

Tableau 5-1 Coefficients utilisés par Carmeliet

Dans son étude de comparaison de modèles, Carmeliet impose un protocole de charge pour lequel il fait varier l'humidité relative (cf. figure 5-10).

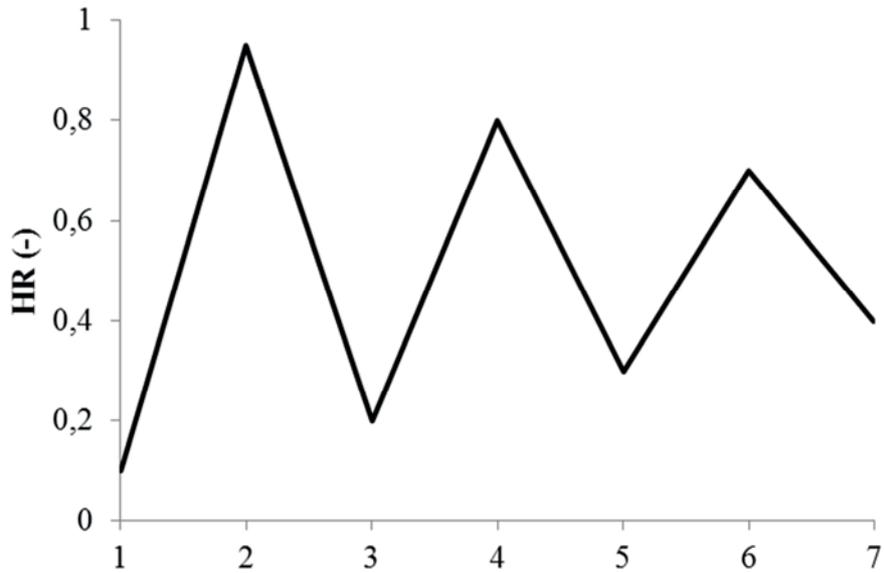


Figure 5-10 Variations d'humidité au cours de l'essai

Les différents modèles d'hystérésis présentés dans les paragraphes précédents sont implémentés sous Matlab et comparés les uns aux autres pour la séquence de chargement fixée par Carmeliet figure 5-10. Dans un premier temps, les résultats issus des modèles de Pedersen et Carmeliet sont présentés figures 5-11 et 5-12.

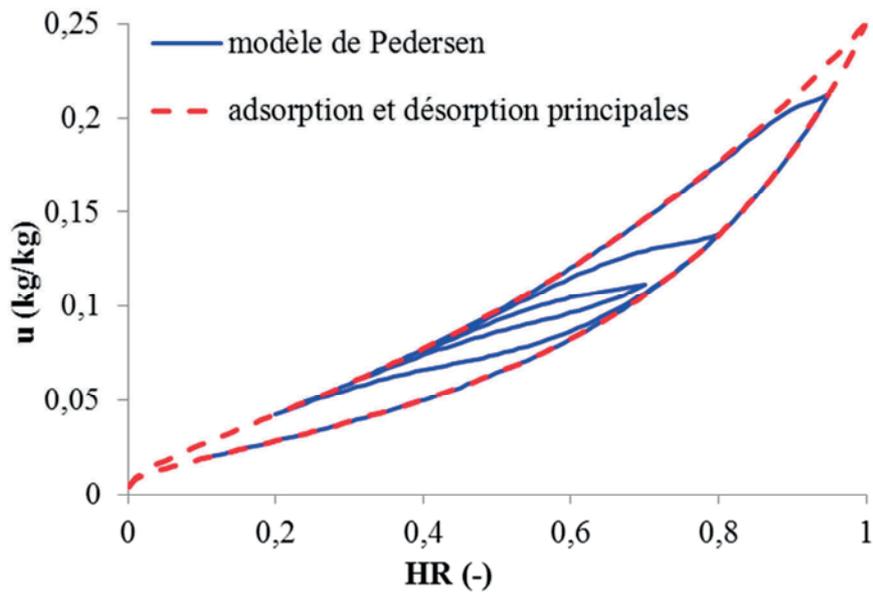


Figure 5-11 Modèle de Pedersen -résultats simulation-

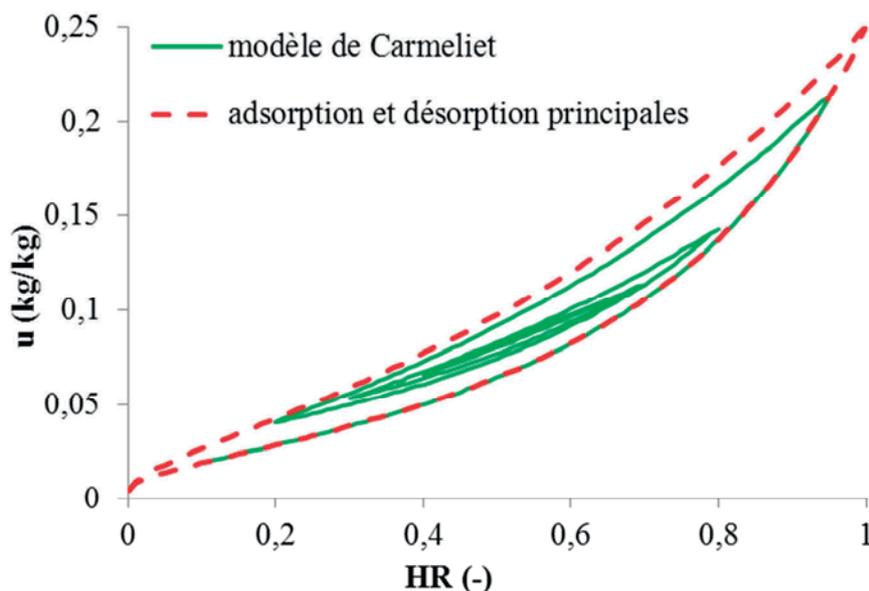


Figure 5-12 *Modèle de Carmeliet -résultats simulation-*

Les modèles de Pedersen et de Carmeliet fournissent des résultats identiques à ceux présentés dans [Carmeliet 2005] et attestent ainsi de leur correcte implémentation. Le lecteur intéressé pourra se référer à l'article [Carmeliet 2005] pour plus de détails. Le modèle d'hystérésis de Pedersen fait tendre, après une série de cycles successifs, les courbes intermédiaires vers les courbes principales alors que le modèle de Carmeliet suit des courbes intermédiaires qui se situent entre les deux courbes principales. Par ailleurs, l'allure des courbes intermédiaires notamment en phase de désorption ne sont pas identiques pour les deux modèles : dans le modèle de Pedersen, les courbes de désorption intermédiaires sont convexes et les courbes d'adsorption intermédiaires concaves alors que toutes sont concaves dans le modèle de Carmeliet.

Carmeliet montre également dans ses travaux que le modèle de Pedersen est d'un point de vue physique moins logique que le modèle qu'il propose en raison des variations importantes de la capacité hydrique.

Enfin, à titre de comparaison, le même protocole d'étude est appliqué au modèle de Huang. Les résultats sont fournis figure 5-13.

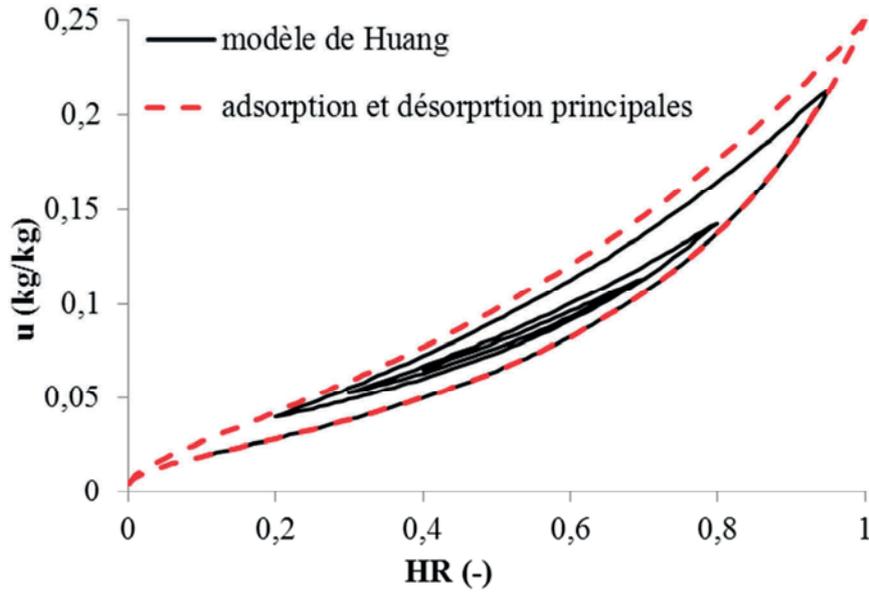


Figure 5-13 *Modèle de Huang -résultats simulation-*

Sur cet exemple, les modèles de Carmeliet et de Huang apparaissent très proches. Toutefois une analyse plus précise vient confirmer les résultats du paragraphe 5.3.5. à savoir une similitude des courbes intermédiaires d'adsorption et des différences (très faibles ici) des courbes intermédiaires de désorption.

5.4. Application au béton de chanvre

5.4.1. Modélisation de la courbe de désorption principale du béton de chanvre

La modélisation de la courbe de désorption principale est d'une importance cruciale dans la construction des modèles d'hystérésis quels qu'ils soient.

On rappelle que l'on dispose des courbes expérimentales principales d'adsorption des bétons de chanvre Easy R et Easy R-bis de masse volumique apparente à l'état sec respectivement de 450 kg.m^{-3} et 396 kg.m^{-3} .

Par ailleurs, il a été vu au chapitre 2 que pour le béton de chanvre Easy R, la courbe de désorption 97-0%HR ne devait pas être considérée comme une courbe de désorption principale mais plutôt comme une courbe de désorption primaire.

Pour le béton de chanvre Easy R-bis, on possède les courbes expérimentales intermédiaires présentées au paragraphe 5.2. :

- 53-23%HR et 81-43-23%HR en désorption primaire
- 23-53%HR et 23-43-81%HR en adsorption secondaire

Pour les deux bétons de chanvre, la courbe de désorption principale demeure fondamentalement inconnue.

Le paragraphe suivant a ainsi pour objectif, pour chaque béton de chanvre, de construire la courbe de désorption principale à partir des données de désorption primaire obtenues expérimentalement. En ce sens, la démarche utilisée se révèle originale car on raisonne à rebours des applications usuelles des modèles d'hystérésis qui supposent connues les deux courbes principales.

5.4.1.1. Principe mathématique

L'utilisation de modèles d'hystérésis est un outil précieux pour construire les courbes de désorption principales.

Les modèles de Huang et de Carmeliet sont ainsi utilisés et comparés pour construire les courbes de désorption primaire.

Le principe de calcul est basé sur une optimisation paramétrique. L'objectif est de déterminer les coefficients α_{des} et η_{des} qui conditionnent la relation de Van Genuchten en désorption principale :

$$u = u_{sat} \left(1 + \left| \alpha_{des} \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right|^{\eta_{des}} \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta_{des}}\right)} \quad (5-42)$$

La teneur en eau à saturation u_{sat} (kg/kg) est identique à celle de la courbe d'adsorption principale développée au chapitre 3 : $u_{sat} = 1,5$ kg/kg pour le béton de chanvre Easy R et $u_{sat} = 1,805$ kg/kg pour le béton de chanvre Easy R-bis.

La courbe de désorption primaire, d'ordre 1, s'exprime avec le modèle de Carmeliet :

$$u(\varphi, 1) = u_1 - (1 - A(\varphi))(u_{ads}(\varphi_1) - u_{ads}(\varphi)) \quad (5-43)$$

Le point (φ_1, u_1) est le point d'inversion qui conditionne la construction de cette courbe primaire. Il est situé sur la courbe d'adsorption principale au niveau du point d'inversion.

De même, la courbe de désorption primaire d'ordre 1 s'exprime avec le modèle de Huang :

$$u(\varphi, 1) = u_r(1) + (u_s(1) - u_r(1))g(\varphi) \quad (5-44)$$

Les teneurs en eau résiduelle et de saturation sont déterminées à partir de la résolution d'un système de deux équations (cf. paragraphe 5.3.3.) :

$$\begin{cases} u_r(1) = \frac{u_1 g(\varphi_0) - u_0 g(\varphi_1)}{g(\varphi_0) - g(\varphi_1)} \\ u_s(1) = \frac{u_0(1 - g(\varphi_1)) - u_1(1 - g(\varphi_0))}{g(\varphi_0) - g(\varphi_1)} \end{cases} \quad (5-45)$$

L'expression développée de la relation (5-44) conduit finalement à :

$$u(\varphi, 1) = \frac{u_1 g(\varphi_0) - u_0 g(\varphi_1)}{g(\varphi_0) - g(\varphi_1)} + \frac{g_0 - g_1}{g(\varphi_0) - g(\varphi_1)} g(\varphi) \quad (5-46)$$

Comme dans le modèle de Carmeliet, (φ_1, u_1) est le point d'inversion situé sur la courbe d'adsorption principale. (φ_0, u_0) est le point d'inversion initial qui caractérise la courbe d'adsorption principale : $\varphi_0 = 0$ et $u_0 = u_{ads}(0)$.

La méthode des moindres carrés pondérés est alors utilisée pour minimiser la quantité :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{nb} y_i |u_i(\varphi, 1) - u_{i,exp}|^2 \quad (5-47)$$

$u_i(\varphi, 1)$ est la teneur en eau calculée à partir des modèles de Carmeliet et de Huang exprimée respectivement par les équations (5-43) et (5-46), $u_{i,exp}$ les valeurs des teneurs en eau expérimentales de désorption primaire, y_i le poids de la valeur expérimentale et nb le nombre de mesures.

Une contrainte supplémentaire est considérée pour obtenir une courbe de désorption principale physiquement acceptable (relation 5-48).

$$\forall \varphi, u_{des}(\varphi) \geq u_{ads}(\varphi) \quad (5-48)$$

5.4.1.2. Application

5.4.1.2.1. Courbe de désorption principale Easy R

L'optimisation de la courbe de désorption primaire 97-0%HR permet d'obtenir les coefficients α_{des} et η_{des} , et corrélativement la courbe de désorption principale 100-0%HR.

Modèle de Carmeliet :

$$\alpha_{des} = 0,0088$$

$$\eta_{des} = 1,51$$

Modèle de Huang :

$$\alpha_{des} = 0,0185$$

$$\eta_{des} = 1,647$$

Les figures 5-14 et 5-15 représentent les courbes d'adsorption et de désorption principales ainsi que la branche primaire de désorption 97-0%HR respectivement pour les modèles de Carmeliet et de Huang.

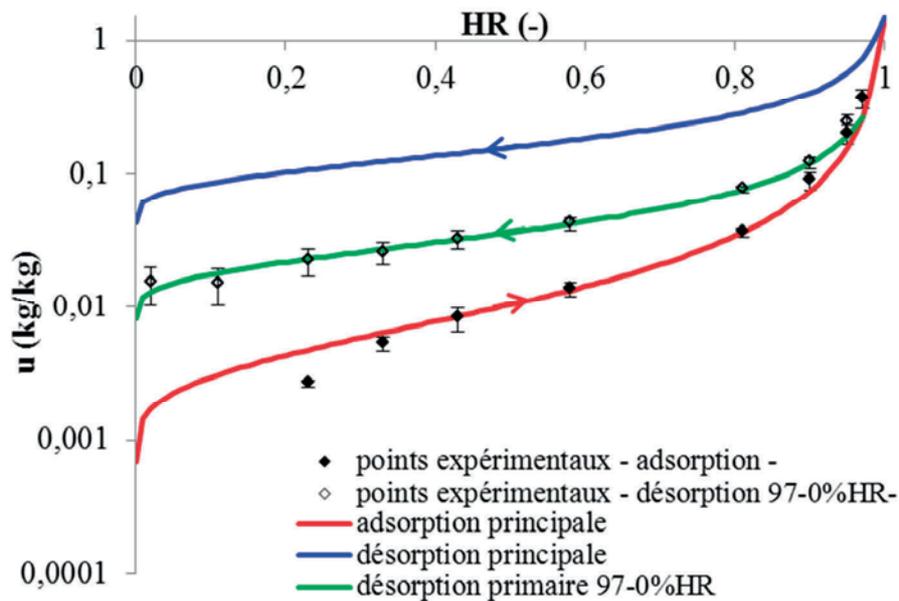


Figure 5-14 Courbes d'adsorption et de désorption principales et de désorption primaire 97-0%HR -modèle de Carmeliet-

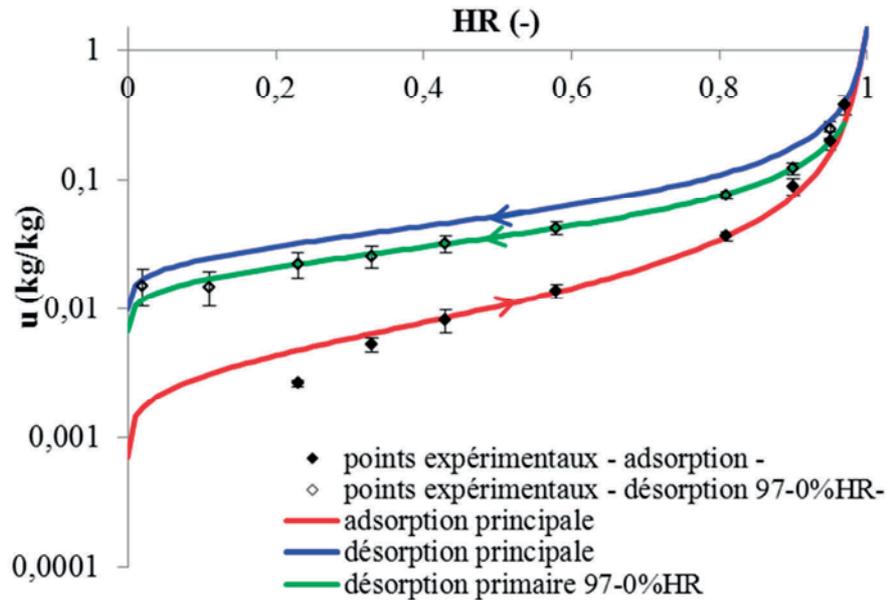


Figure 5-15 Courbes d'adsorption et de désorption principales et de désorption primaire 97-0%HR -modèle de Huang-

On peut noter que l'ouverture des courbes principales liées à l'hystérésis est plus importante avec le modèle de Carmeliet qu'avec le modèle de Huang.

5.4.1.2.2. Courbe de désorption principale Easy R-bis

On choisit de considérer uniquement la courbe de désorption primaire 53-23%HR afin d'obtenir les coefficients α_{des} et η_{des} , et corrélativement la courbe de désorption principale 100-0%HR.

Modèle de Carmeliet :

$$\alpha_{des} = 0,0265$$

$$\eta_{des} = 1,139$$

Modèle de Huang :

$$\alpha_{des} = 0,151$$

$$\eta_{des} = 1,406$$

Les figures 5-16 et 5-17 représentent les courbes d'adsorption et de désorption principales ainsi que la branche primaire de désorption 53-23%HR respectivement pour les modèles de Carmeliet et de Huang.

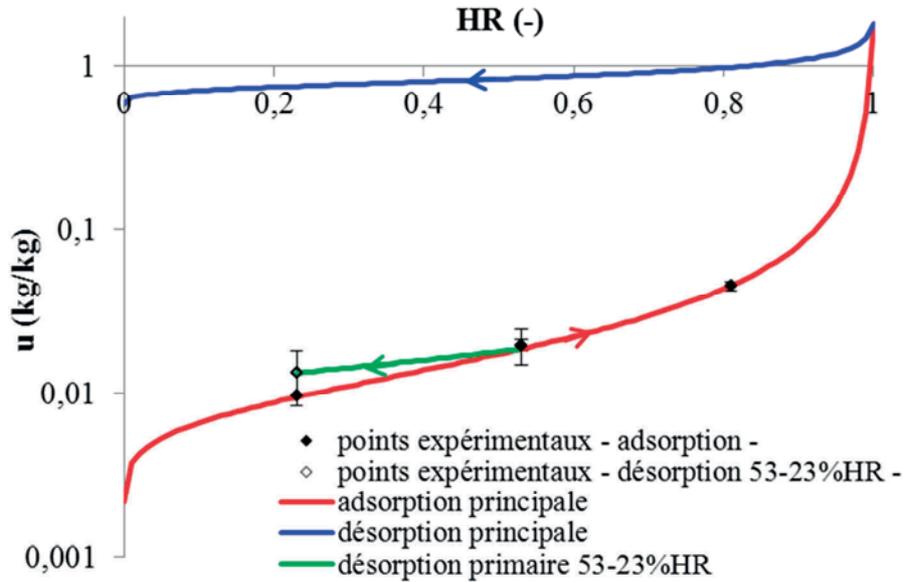


Figure 5-16 Courbes d'adsorption et de désorption principales et de désorption primaire 53-23%HR -modèle de Carmeliet-

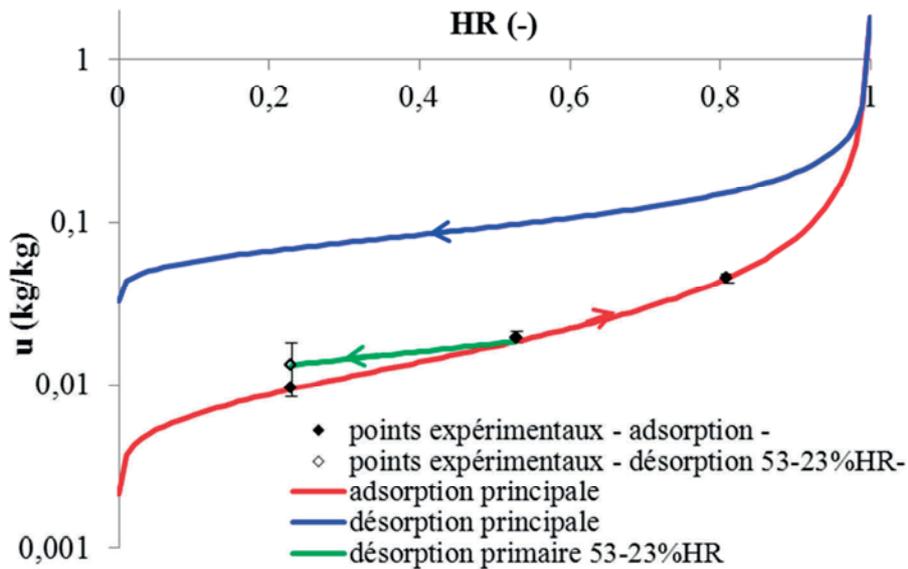


Figure 5-17 Courbes d'adsorption et de désorption principales et de désorption primaire 53-23%HR -modèle de Huang-

Comme pour le béton de chanvre Easy R, l'ouverture des principales est plus importante avec le modèle de Carmeliet.

5.4.1.3. Bilan et synthèse

Bien que les valeurs de teneur en eau à saturation des bétons de chanvre Easy R et Easy R-bis soient élevées (1,5 kg/kg et 1,805 kg/kg respectivement pour rappel), la courbe de désorption principale obtenue à partir du modèle de Huang semble mieux adaptée bien que l'étude réalisée ne puisse l'assurer.

Remarque importante

La méthode utilisée pour construire les courbes de désorption principales repose sur la performance des modèles d'hystérésis. Compte tenu du manque de données expérimentales nécessaires à la détermination exacte de la courbe de désorption principale, les courbes proposées demeurent théoriques. La nature du béton de chanvre le prédispose à une modification de sa composition physico-chimique (phénomène de carbonatation) et à la formation de moisissures qui rendent délicate sa caractérisation expérimentale aux très fortes humidités. Les résultats obtenus montrent toutefois que l'approche adoptée est physiquement cohérente et tout à fait acceptable dans le cadre d'une analyse numérique du comportement hydrique du béton de chanvre. Ainsi, aussi bien le modèle de Huang que le modèle de Carmeliet peuvent être utilisés dans le cas du béton de chanvre.

5.4.2. Analyse du phénomène d'hystérésis : étude du béton de chanvre Easy R-bis

Le paragraphe précédent a permis de construire la courbe de désorption principale du béton de chanvre Easy R-bis à partir des modèles d'hystérésis de Huang et de Carmeliet et de leur application à la branche de désorption primaire expérimentale 53-23%HR.

Dans la section suivante, les résultats obtenus à partir de cette modélisation sont analysés et comparés aux résultats expérimentaux en phase de désorption primaire 81-43-23%HR et d'adsorption secondaire 23-43-81%HR. La démarche d'étude permet de valider la modélisation retenue.

5.4.2.1. Etude du modèle de Pedersen

L'étude du modèle de Pedersen, en raison de sa nature empirique, nécessite une analyse particulière. Dans cette étude, la courbe de désorption principale choisie est celle issue du modèle de Huang.

En première approche, on peut choisir comme paramétrage les valeurs de coefficients proposées par Pedersen à savoir $A = C = 0,1$ et $B = 2$. Cependant, en s'appuyant sur les résultats expérimentaux, il est dorénavant possible de déterminer par calage le paramétrage du modèle empirique de Pedersen (cf. paragraphe 5.3.4.). Pour ce faire, on choisit de travailler avec les résultats expérimentaux obtenus d'une part en désorption primaire entre 81% et 23%HR et en adsorption secondaire d'autre part entre 23% et 81%HR. Puisque l'on dispose de branches de désorption primaire et d'adsorption secondaire, on utilise la méthode qui consiste à fixer le coefficient B à 2 et à déterminer les coefficients A et C à partir des résultats expérimentaux respectivement en adsorption secondaire et en désorption primaire.

En phase de désorption suivant le chemin hydrique 81-43-23%HR, le coefficient C calé sur les résultats expérimentaux est de $C = 0,673$.

En phase d'adsorption suivant le chemin hydrique 23-43-81%HR, le calage des coefficients est tout d'abord effectué entre 23% et 43%HR. Le coefficient ainsi obtenu vaut $A = -1,6$.

Avec ce paramétrage, contrairement aux autres types de modèles mathématique et physique, la condition de fermeture des courbes de désorption et d'adsorption n'est pas respectée, quelles que soient les valeurs des coefficients choisies. La nature même du modèle de Pedersen et son formalisme mathématique expliquent cette particularité. En effet, pour des variations cycliques d'humidité relative, le modèle de Pedersen conduit à une surestimation de la teneur en eau lors du bouclage. Ainsi, à partir d'une certaine humidité, la courbe d'adsorption passe au-dessus de la courbe de désorption complémentaire ce qui est particulièrement visible dans le cas du béton de chanvre étudié. Il s'agit d'un artefact mathématique communément appelé « effet de pompe » ([Muallem 2009], [Huang 2005]) qui va à l'encontre de la logique physique. Le non-respect de cette condition de fermeture soulève un problème de taille sur la justification de l'utilisation du modèle de Pedersen car il vient infirmer le principe même de bouteille d'encre et d'angle de contact adopté pour décrire le comportement hystérétique d'un milieu poreux.

Toutefois, il est possible de déterminer une valeur du paramètre A telle que la condition de fermeture soit respectée sur ce cycle 23-81%. Ainsi, on obtient $A = -60$. Le coefficient A est ainsi déterminé uniquement sous condition de fermeture et non plus par calage.

La figure 5-18 compare les résultats obtenus pour les trois types de paramétrage sur les branches de désorption primaire 81-43-23%HR et d'adsorption secondaire 23-43-81%HR.

Les résultats fournis par la figure 5-18 permettent de déduire un certain nombre d'informations sur le modèle de Pedersen. Tout d'abord, les coefficients proposés par Pedersen ne permettent pas de répondre au comportement réel du béton de chanvre car les résultats obtenus sont très éloignés des résultats expérimentaux. Par ailleurs, comme expliqué précédemment, les coefficients obtenus par calage soulèvent le problème de non-fermeture. Enfin, les coefficients obtenus sous condition de fermeture induisent une évolution de la courbe d'adsorption secondaire complètement aberrante puisque sa monotonie est rompue.

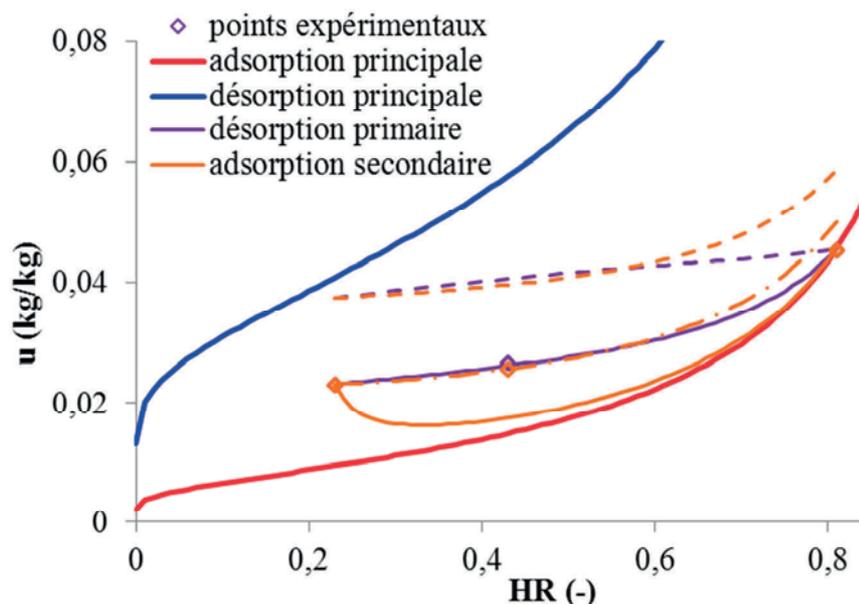


Figure 5-18 Branches de désorption primaire 81-43-23%HR et d'adsorption secondaire 23-43-81%HR -modèle de Pedersen- \diamond : points expérimentaux, traits pointillés (- - -) : coefficients de Pedersen, traits discontinus (— - —) : coefficients ajustés, traits pleins (—) : coefficients sous condition de fermeture

Le modèle de Pedersen est donc clairement inadapté à la description du comportement hystérique du béton de chanvre et est par conséquent écarté. Sa nature empirique en fait par ailleurs un frein à une utilisation sur tout le champ d'humidité relative.

Cependant, dans une certaine gamme d'humidité et pour certains types de matériaux, son utilisation peut être justifiée en première approximation.

5.4.2.2. Application du modèle de Carmeliet

Le modèle d'hystérésis de Carmeliet est étudié ici en désorption primaire 81-43-23%HR et adsorption secondaire 23-43-81%HR.

La figure 5-19 présente les résultats obtenus.

Les courbes intermédiaires de désorption primaire et d'adsorption secondaire générées par le modèle de Carmeliet sont très proches des valeurs de teneur en eau expérimentales.

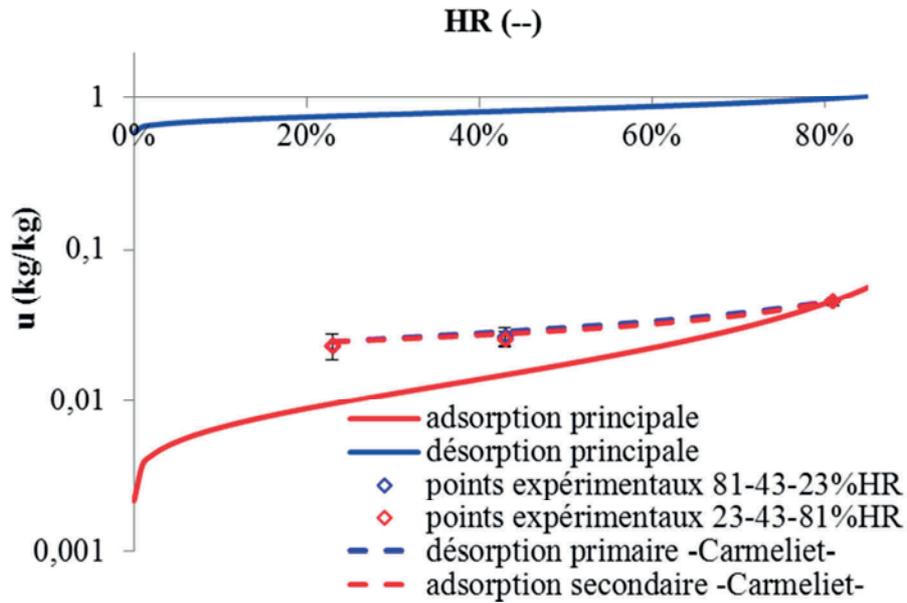


Figure 5-19 Branches de désorption primaire 81-43-23%HR et d'adsorption secondaire 23-43-81%HR - modèle de Carmeliet -

5.4.2.3. Application du modèle de Huang

Les mêmes chemins hydriques sont imposés au modèle de Huang à savoir désorption primaire 81-43-23%HR et adsorption secondaire 23-43-81%HR. La figure 5-20 présente les résultats obtenus.

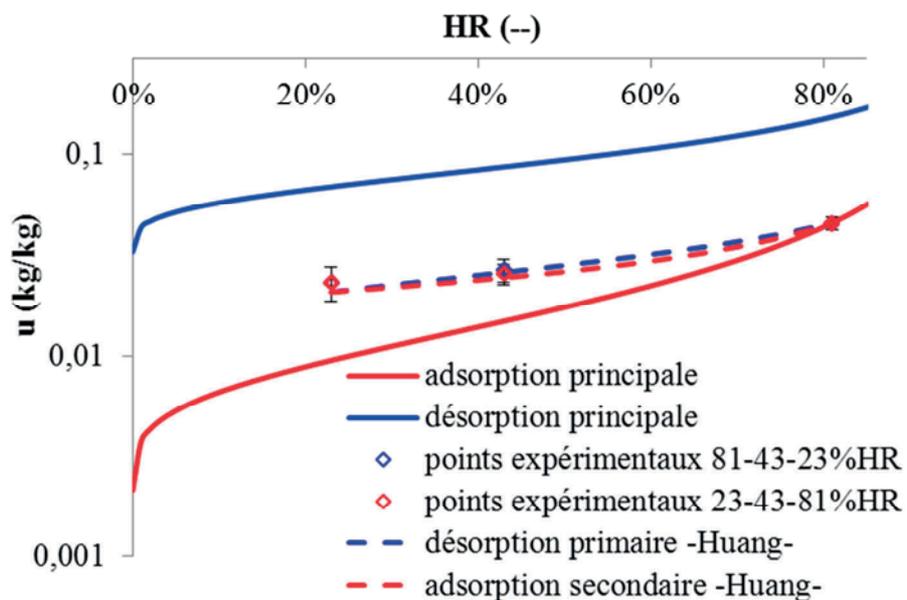


Figure 5-20 Branches de désorption primaire 81-43-23%HR et d'adsorption secondaire 23-43-81%HR - modèle de Huang -

Comme dans le cas de l'application du modèle de Carmeliet, les courbes intermédiaires de désorption primaire et d'adsorption secondaire générées par le modèle de Huang sont très proches des valeurs de teneur en eau expérimentales.

Les deux modèles sont donc à même de reproduire le comportement hystérétique du béton de chanvre.

5.4.2.4. Comparaison des modèles

Afin de comparer les modèles de Huang et de Carmeliet, il est intéressant d'analyser les pentes de ces courbes qui caractérisent la capacité hydrique. A ce titre, les figures 5-21 et 5-22 comparent les capacités hydriques d'une part en phase de désorption primaire et d'autre part en phase d'adsorption secondaire.

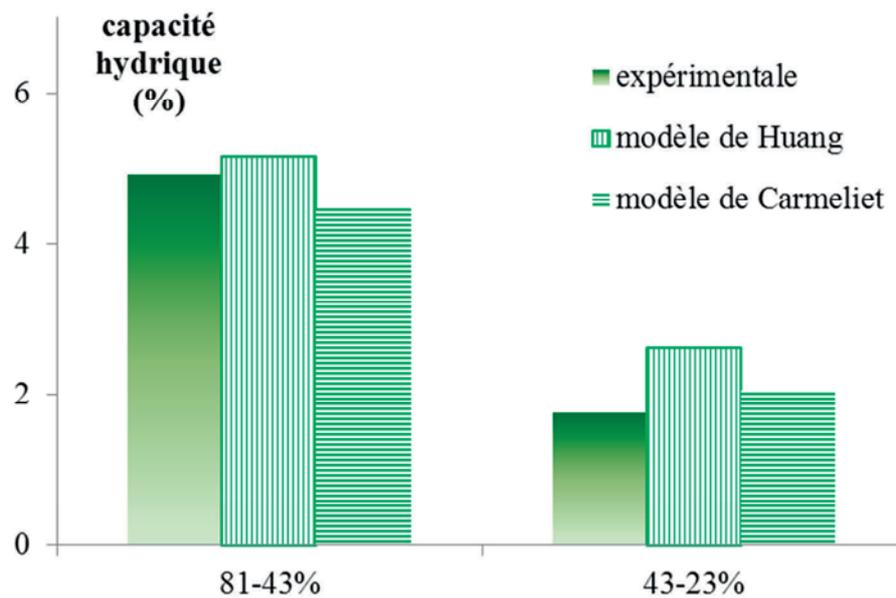


Figure 5-21 Comparaison des capacités hydriques expérimentales et théoriques en désorption primaire

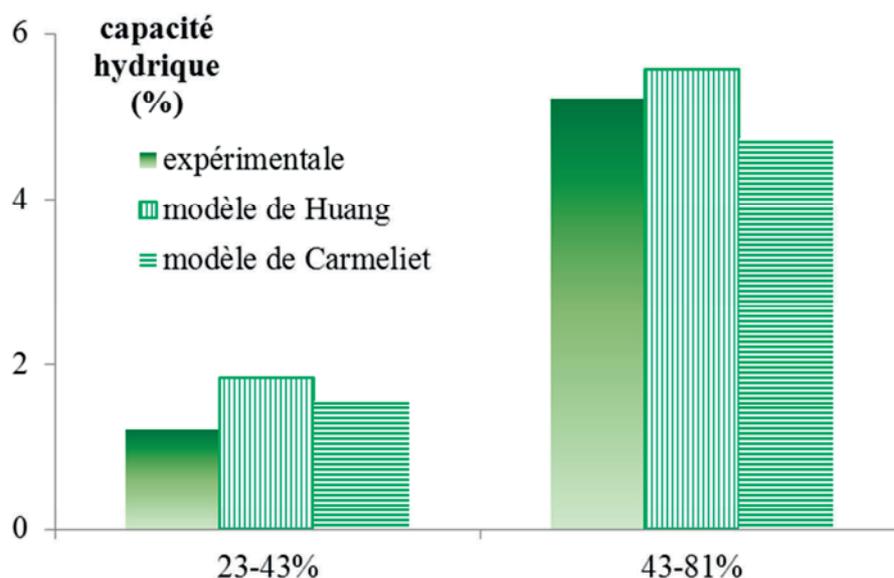


Figure 5-22 Comparaison des capacités hydriques expérimentales et théoriques en adsorption secondaire

Les capacités hydriques obtenus avec les deux modèles sont relativement proches des capacités hydriques expérimentales.

La modélisation adoptée pour déterminer les courbes principales fournit des résultats tout à fait satisfaisants puisque la modélisation de l'hystérésis basée sur ces courbes est à même de reproduire le comportement hydrique expérimental du béton de chanvre dans la gamme d'humidité relative usuelle [40, 80%].

5.4.3. Analyse et conclusion

On a montré jusqu'ici que le choix usuel de la courbe d'adsorption principale pour décrire l'évolution de la teneur en eau du matériau apparaît insuffisant pour décrire la cinétique hydrique du béton de chanvre. En effet, non seulement la teneur en eau est sous-estimée mais surtout la capacité hydrique est surestimée. Physiquement, cette conclusion se base sur le fait qu'à une humidité relative donnée, davantage de pores sont remplis d'eau lorsque la teneur en eau se rapproche de la courbe de désorption principale que lorsqu'elle est proche de la courbe d'adsorption principale. En conséquence, la capacité hydrique de stockage s'en trouve réduite.

L'hystérésis caractéristique de l'évolution de la teneur en eau est un aspect complexe mais fondamental de l'étude du comportement hydrique des milieux poreux. D'un point de vue numérique, il existe différentes manières d'appréhender la manière dont un matériau poreux libère ou accumule l'eau. Le travail mené jusqu'ici a privilégié l'étude de trois types de modèles sensiblement différents : modèles physique, mathématique et empirique.

Le modèle empirique de Pedersen a montré des résultats rédhitoires pour son application au béton de chanvre. En effet, tributaire d'un paramétrage ajusté, l'apparition d'un « effet de pompe » interdisant le respect de la condition de fermeture au cours d'un cycle de sorption/désorption ou une évolution de teneur en eau incohérente nous ont contraint à l'écartier. De manière plus générale, pour d'autres types de matériaux (comme le bois cf. [Carmeliet 2005]), le modèle de Pedersen peut apparaître efficace mais le fait qu'il soit calé pour une gamme d'humidité donnée ne permet pas de répondre au comportement du matériau à d'autres humidités.

Les modèles physiques de type Mualem et mathématique de type Huang qui permettent de reproduire le comportement hydrique hystérétique du béton de chanvre, constituent de bonnes alternatives aux modèles empiriques

. A ce titre, les deux modèles utilisés permettent de reproduire de manière satisfaisante les évolutions de teneur en eau en désorption primaire et adsorption secondaire ainsi que les capacités hydriques dans les gammes d'humidités usuelles.

Cependant, le modèle physique de Carmeliet génère une ouverture des courbes principales qui apparaît excessive. Pour cette raison, le modèle mathématique proposé par Huang est retenu dans la suite du travail bien qu'aucun argument physique ne puisse permettre de le privilégier au détriment du modèle de Carmeliet.

Le tableau 5-2 synthétise le paramétrage retenu pour construire les courbes d'adsorption et de désorption principales.

Courbes principales Easy R	
Modèle de Van Genuchten	
$u = u_{sat} \left(1 + \left \alpha \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right ^\eta \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)}$	
Adsorption	Désorption
$\alpha_{ads} = 0,0119, \eta_{ads} = 2,0462$ et $u_{sat} = 1,5 \text{ kg/kg}$	$\alpha_{des} = 0,0185, \eta_{des} = 1,647$ et $u_{sat} = 1,5 \text{ kg/kg}$
Courbes principales Easy R-bis	
Modèle de Van Genuchten	
$u = u_{sat} \left(1 + \left \alpha \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right ^\eta \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)}$	
Adsorption	Désorption
$\alpha_{ads} = 0,0319, \eta_{ads} = 1,8096$ et $u_{sat} = 1,805 \text{ kg/kg}$	$\alpha_{des} = 0,151, \eta_{des} = 1,406$ et $u_{sat} = 1,805 \text{ kg/kg}$

Tableau 5-2 Synthèse du paramétrage des courbes d'adsorption et désorption principales Easy R et Easy R-bis

5.5. Validation de la modélisation de l'hystérésis sur des essais de capacité hydrique

5.5.1. Définition et caractérisation de l'essai

L'humidité relative est un facteur important qui influe sur le confort ressenti par les occupants d'un bâtiment. La capacité de régulation de l'humidité des matériaux poreux comme le béton de chanvre est un moyen efficace pour améliorer le confort puisqu'ils participent à la stabilisation du niveau d'humidité intérieur ambiant sans consommation d'énergie. La capacité hydrique tampon (Moisture Buffering Value MBV en anglais) renseigne sur la quantité d'eau adsorbée ou désorbée lorsque le matériau est soumis à une variation de l'humidité relative extérieure pour un temps donné.

Le protocole Nordtest [Rode 2005] propose une méthodologie d'évaluation de cette capacité pour laquelle les conditions hydriques sont représentatives des variations typiques journalières susceptibles d'être connues par un bâtiment sous conditions isothermes.

La capacité hydrique tampon ou MBV est ainsi déterminée sous conditions climatiques dynamiques par la relation :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A(HR_{haute} - HR_{basse})} \quad (5-49)$$

avec MBV [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\%HR^{-1}$] la valeur de la capacité hydrique tampon, Δm [kg] la prise ou perte de masse d'eau pendant la période considérée, A [m^2] la surface exposée et $RH_{haute/basse}$ [%] le niveau d'humidité relative atteint, haut ou bas.



Figure 5-23 *Chambre climatique et échantillons*

Une expérience a été menée au laboratoire afin de déterminer la capacité hydrique du béton de chanvre Easy R [Collet 2012]. Des échantillons rectangulaires isolés avec une feuille d'aluminium sur toutes leurs surfaces sauf une sont placés dans une chambre climatique (cf. figure 5-23). Ces échantillons proviennent de blocs qui ont été entreposés en salle humide

à 23°C pendant 3 ans et dix mois. L'humidité relative de cette salle humide consignée à 50%HR est à considérer avec précaution car elle est susceptible de fortement varier.

Le protocole expérimental Nordtest recommande de soumettre les échantillons à des cycles de sorption/désorption après les avoir stabilisés à une ambiance de 50%HR. Ainsi, les échantillons sont soumis à une humidité de 75% pendant 8h en adsorption et de 33% pendant 16h en désorption à la température constante de 23°C.

En outre, le projet Nordtest établit une classification qui permet d'évaluer la qualité de régulation hydrique d'un matériau à partir de la valeur de sa capacité hydrique tampon (cf. figure 5-24).

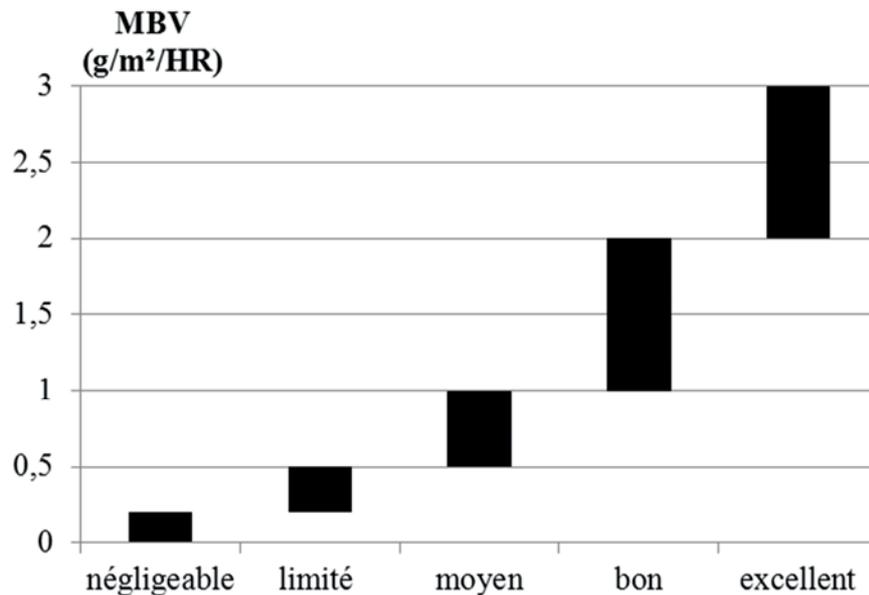


Figure 5-24 Classification de la qualité régulatrice d'un matériau en fonction de sa MBV

Les conditions réellement imposées sont présentées figure 5-25.

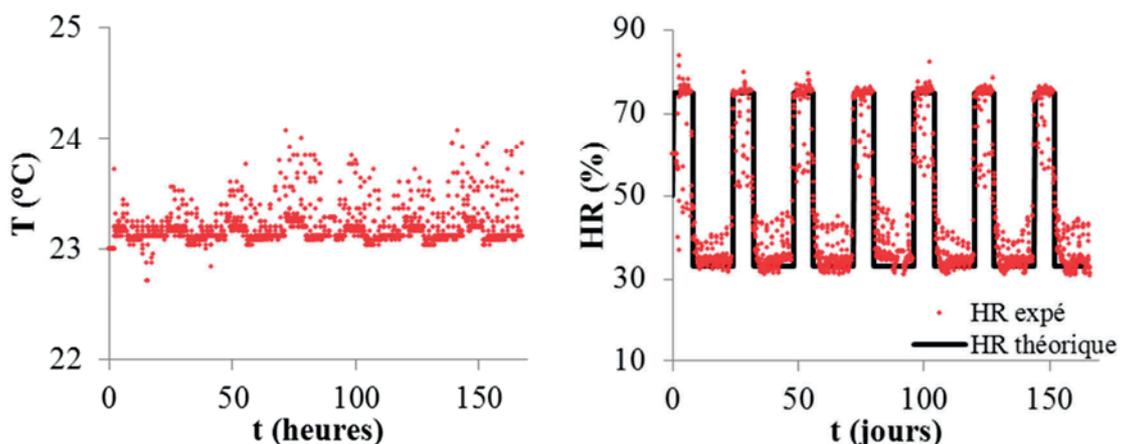


Figure 5-25 Température et humidité relative imposées aux échantillons

5.5.2. Application au béton de chanvre Easy R

5.5.2.1. Résultats expérimentaux

L'ensemble des échantillons étudiés expérimentalement sont caractéristiques du béton de chanvre Easy R que l'on étudie. Les résultats expérimentaux présentés figure 5-26, montrent que l'ensemble de l'échantillonnage fournit des prise et perte de masse d'eau similaires.

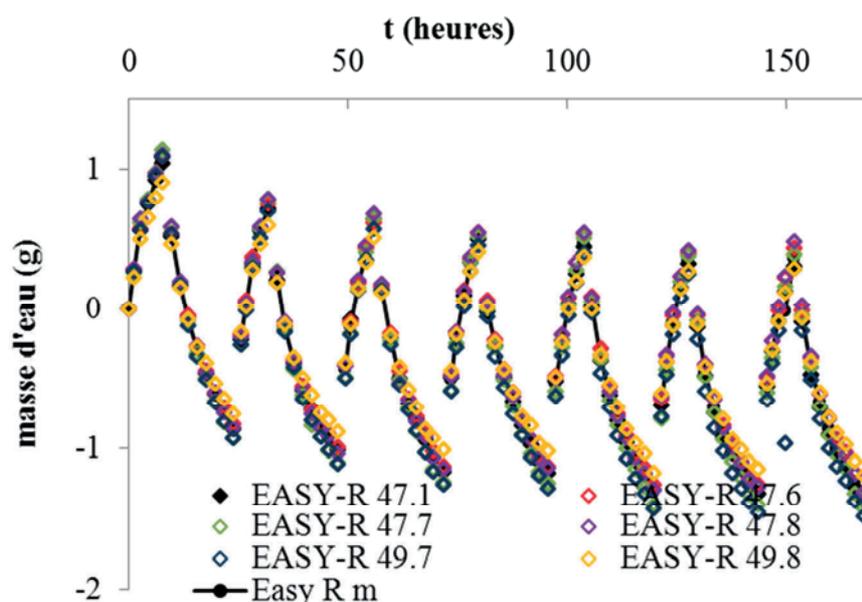


Figure 5-26 Résultats expérimentaux

Afin de mener l'étude numérique correspondante, on choisit de travailler avec les valeurs moyennes de l'échantillonnage (Easy R m). Ainsi, la surface exposée moyenne vaut $22,85 \text{ cm}^2$ et l'épaisseur moyenne $7,2 \text{ cm}$, dimensions mesurées à l'aide d'un pied à coulisse de précision $0,01 \text{ mm}$.

La masse volumique apparente à $50\%HR/23^\circ\text{C}$ moyenne de l'ensemble des échantillons est représentative du béton de chanvre Easy R que l'on étudie.

A titre de complément, le béton de chanvre Easy R peut être qualifié de très bon voire d'excellent régulateur hydrique avec une MBV expérimentale moyenne aux environs de $1,95 \text{ g/m}^2/\text{HR}$ ce qui lui confère un classement optimum par rapport à d'autres matériaux de construction usuels (cf. figure 5-27).

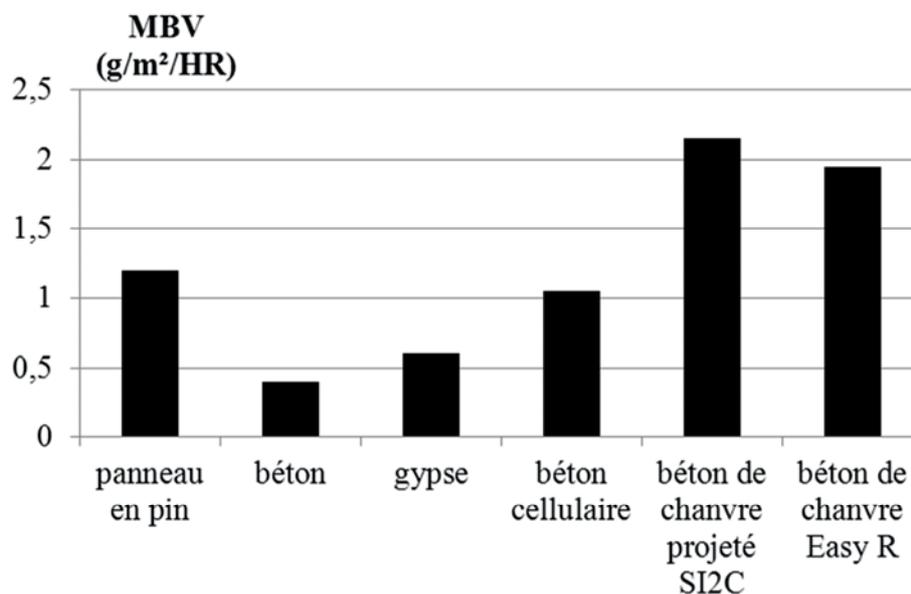


Figure 5-27 MBV de différents matériaux de construction [Collet 2012]

5.5.2.2. Etude numérique

Durant leur longue période de stockage, les échantillons ont pu être soumis à des fluctuations d'humidité relative. L'étude numérique de l'évolution de la teneur en eau du matériau au cours de cette étude est ainsi rendue complexe par la méconnaissance de la quantité d'eau initialement présente dans le matériau.

Un objectif complémentaire est d'estimer l'impact de l'évaluation de la teneur en eau initiale. Le traitement numérique et l'intégration du phénomène d'hystérésis au modèle de transport hygrothermique autorise et permet cette étude.

En utilisant la courbe d'adsorption principale, la teneur en eau initiale du béton de chanvre Easy R est directement fonction de l'humidité relative initiale mais ne correspond pas à la valeur réelle. En effet, la teneur en eau initiale réelle n'est pas induite par la courbe d'adsorption principale mais se situe entre cette courbe et la courbe de désorption principale. Cette hypothèse aurait été justifiée si les échantillons avaient été préalablement séchés.

Dans un premier temps, la teneur en eau initiale est choisie respectivement sur la courbe d'adsorption principale (u_i basse) et sur la courbe de désorption principale (u_i haute). Les résultats obtenus à partir de ces deux hypothèses extrêmes fournissent ainsi un encadrement large de valeurs dans lequel évolue la masse d'eau réelle.

Par ailleurs, une teneur en eau initiale intermédiaire (u_i inter) plus réaliste est déterminée de manière à prendre en compte l'influence de l'histoire hydrique réellement vécue par le matériau au cours des cycles successifs de sorption/désorption.

Elle est obtenue en imposant une désorption primaire suivant le chemin hydrique 85-50%HR (cf. figure 5-28).

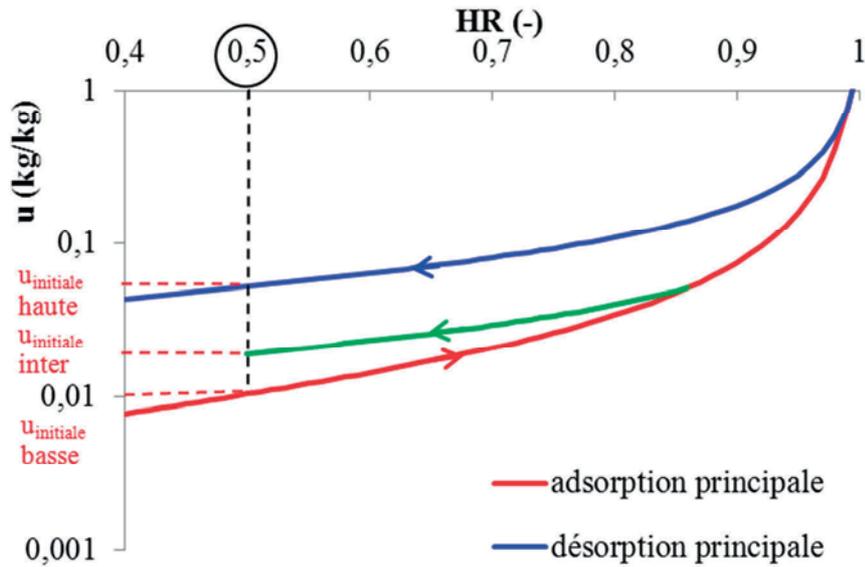


Figure 5-28 Teneurs en eau initiales retenues pour la simulation

La figure 5-29 représente l'influence de la prise en compte du phénomène d'hystérésis et de la teneur en eau initiale sur les prises et perte de masse d'eau :

- u_i basse
- u_i haute
- u_i intermédiaire

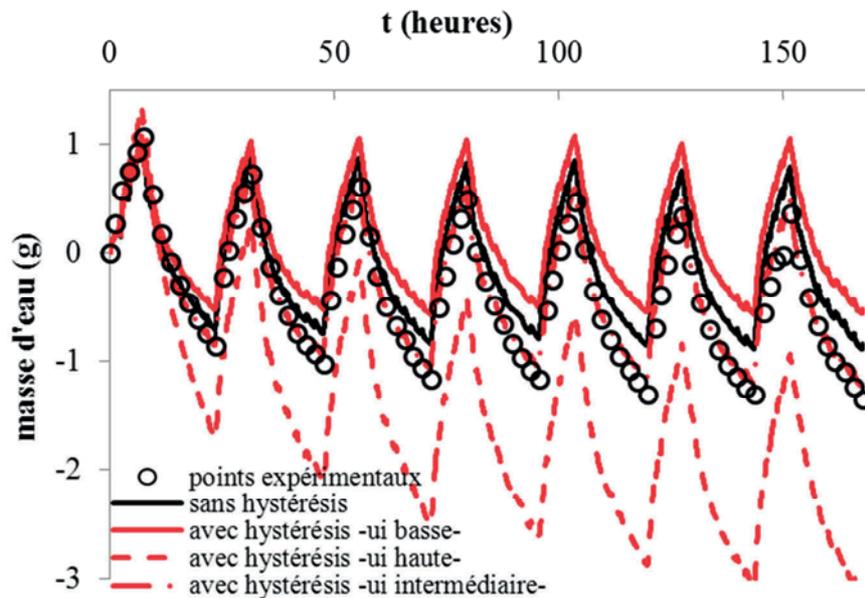


Figure 5-29 Evolution de la masse d'eau -influence couplée du phénomène d'hystérésis et de la teneur en eau initiale-

Comme le montre la figure 5-29, aussi bien d'un point de vue numérique qu'expérimental, la masse d'eau décroît globalement par rapport à la masse d'eau initiale. En outre, la prise en compte du phénomène d'hystérésis dans la simulation a une influence évidente sur l'évolution

de la masse d'eau. Le choix d'une teneur en eau initiale réaliste permet en outre d'obtenir des résultats très satisfaisants.

5.5.3. Application au béton de chanvre Easy P

5.5.3.1. Courbe de désorption principale du béton de chanvre Easy P

La caractérisation de la courbe de désorption principale du béton de chanvre Easy P constitutif de la paroi ne peut être réalisée de manière analogue à celle des bétons de chanvre Easy R et Easy R-bis car on ne dispose pas de résultats expérimentaux.

5.5.3.1.1. Analyse de l'influence de la masse volumique

Afin d'évaluer l'influence de la masse volumique sur la courbe de désorption principale du béton de chanvre, on raisonne dans un premier temps de manière analogue au chapitre 3 où il était supposé que l'écart de volume d'eau normalisé entre la courbe d'adsorption principale du béton de chanvre Easy R (450 kg.m^{-3}) et celle du béton de chanvre Easy R-bis (396 kg.m^{-3}) se conservait. L'écart de volume d'eau par mètre cube de matériau entre courbes de désorption principale Easy R et Easy R-bis était de 2,65 L (cf. chapitre 3). La construction de la courbe de désorption principale du béton de chanvre Easy R-bis, construite à partir de cette hypothèse respecte par ailleurs la valeur de teneur en eau à saturation $u_{\text{sat}} = 1,805 \text{ kg/kg}$.

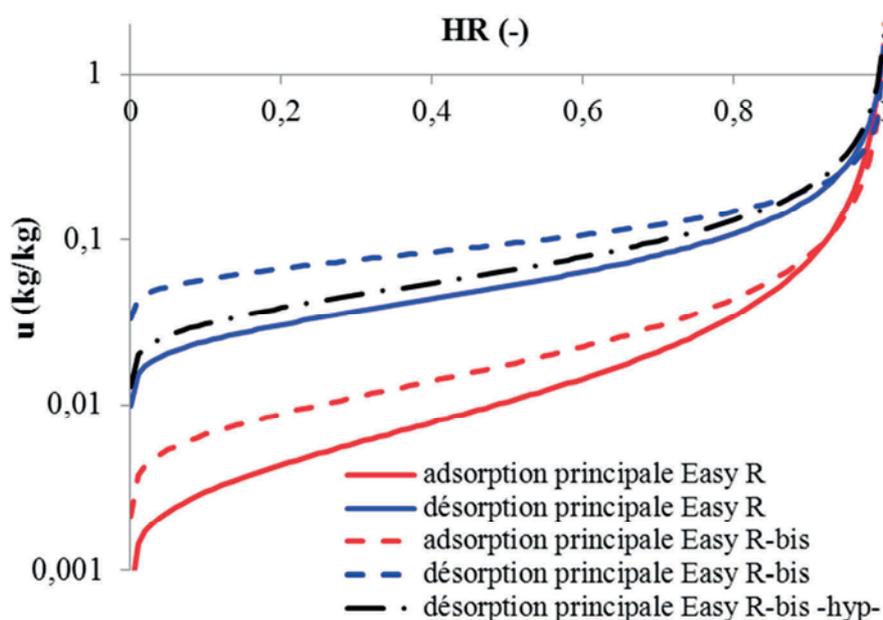


Figure 5-30 Courbes d'adsorption et de désorption principales des bétons de chanvre Easy R et Easy R-bis

La figure 5-30 représente les courbes d'adsorption et de désorption principales des bétons de chanvre Easy R et Easy R-bis déterminés précédemment à partir du modèle de Huang (courbes rouges et bleues). Dans le cas du béton de chanvre Easy R-bis, la courbe de désorption principale construite à partir de l'hypothèse de conservation de l'écart de volume

d'eau normalisé (représentée en trait discontinu noir) est ainsi comparée à la courbe générée par le modèle de Huang.

La figure 5-30 nous montre que le comportement du béton de chanvre en phase de désorption se différencie assez nettement du comportement en adsorption. En effet, l'écart qu'il existe entre les courbes d'adsorption principales construites à partir des deux approches présentées (à partir du modèle d'hystérésis et de Huang d'une part et de la conservation de volume d'eau normalisé d'autre part) apparaît assez important. L'influence de la masse volumique du béton de chanvre sur le processus de désorption est ainsi difficilement exploitable.

Le lien que l'on a pu établir au chapitre 3 pour relier teneur en eau et masse volumique en phase d'adsorption ne semble plus valable en phase de désorption. En effet, le comportement hydrique du béton de chanvre en phase de désorption régi par le phénomène d'hystérésis rend difficile son analyse physique.

Par ailleurs, il est à noter que la modélisation adoptée n'est valable physiquement que jusqu'à 90%HR à cause du croisement des courbes principales. Comme en adsorption principale (cf. chapitre 3), la méconnaissance du comportement hydrique du béton de chanvre aux très fortes humidités ne permet pas de proposer une modélisation physiquement justifiée.

5.5.3.1.2. Analyse des capacités hydriques

A l'inverse de la phase d'adsorption principale, il a été montré au paragraphe précédent qu'il était difficile de prédire physiquement le comportement du béton de chanvre en phase de désorption principale sans la connaissance de points expérimentaux.

Pour lever ce problème, on choisit de se focaliser sur l'analyse des capacités hydriques. Il a été montré au chapitre 3 qu'en phase d'adsorption principale, les capacités hydriques, aussi bien expérimentales que théoriques, des différents bétons de chanvre Easy R, Easy R-bis et Easy P étaient relativement similaires. En outre, les capacités hydriques en désorption principale des bétons de chanvre Easy R et Easy R-bis sont également relativement proches comme le montre la figure 5-31. Il est ainsi légitime de supposer qu'il en est de même pour le béton de chanvre Easy P.

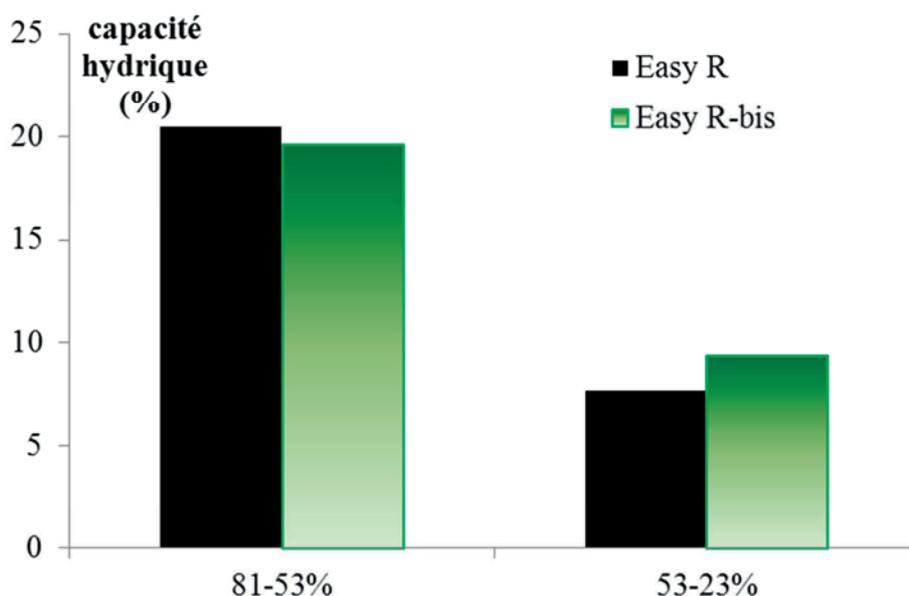


Figure 5-31 Capacités hydriques théoriques en désorption principale

Cependant, cette hypothèse de similarité des pentes est insuffisante pour prédire la courbe de désorption principale du béton de chanvre Easy P. En effet, quel décalage existe-t-il entre les courbes de désorption principale de béton de chanvre de masse volumique différente ?

5.5.3.1.3. Confrontation expérimentale

La réflexion proposée repose sur une analogie. La courbe de désorption principale du béton de chanvre Easy R-bis sert de référence à cette étude. On se propose d'évaluer l'impact du décalage des courbes de désorption principale du béton de chanvre Easy P par rapport à la courbe de référence.

Trois valeurs sont étudiées :

- $u_{\text{Easy P -1}} = u_{\text{Easy R-bis}}$
- $u_{\text{Easy P -2}} = u_{\text{Easy R-bis}} + 0,05 \text{ kg/kg}$
Ce décalage est assimilable à celui observé entre les courbes de désorption principale Easy R et Easy R-bis.
- $u_{\text{Easy P -3}} = u_{\text{Easy R-bis}} + 0,1 \text{ kg/kg}$

Par ailleurs, la construction de ces courbes respecte la valeur à saturation du béton de chanvre Easy P à savoir 2,4 kg/kg.

La figure 5-32 représente les courbes de désorption principale étudiées.

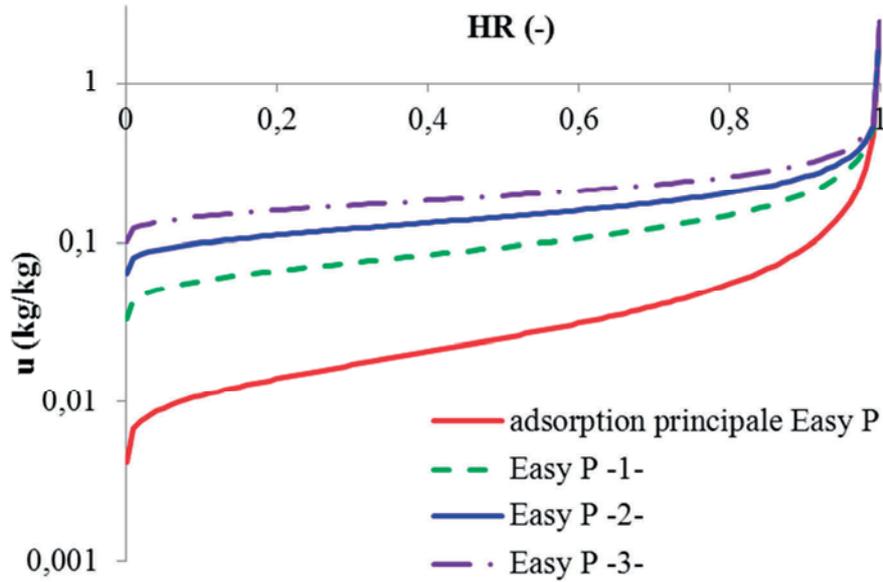


Figure 5-32 Courbes de désorption principale du béton de chanvre Easy P étudiées

Pour analyser l'influence de la modélisation de la courbe de désorption principale, on s'appuie sur les essais MBV menés au laboratoire sur des échantillons représentatifs du béton de chanvre Easy P. Le processus expérimental et les conditions climatiques sont les mêmes que ceux présentés au paragraphe 5.5.1..

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés figure 5-33.

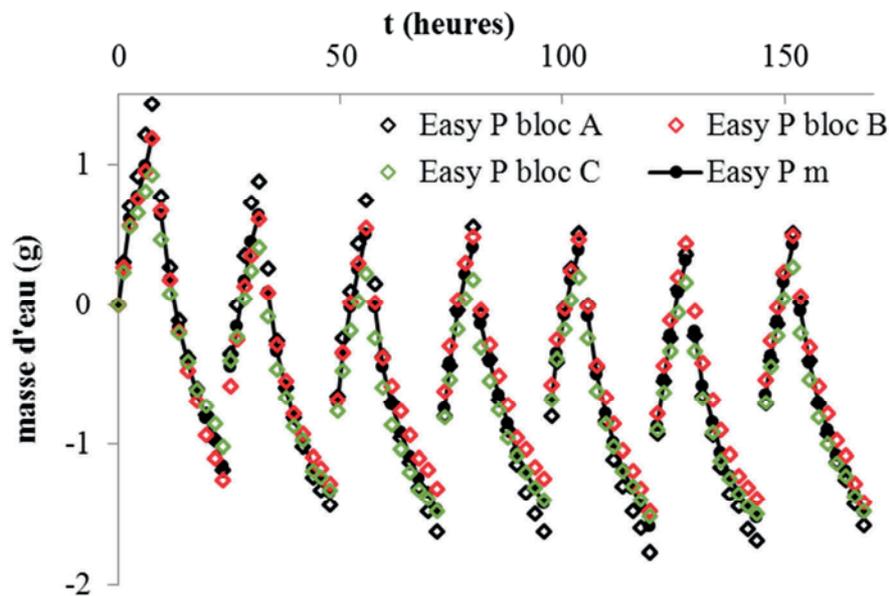


Figure 5-33 Résultats expérimentaux -Easy P-

La surface exposée moyenne vaut pour ces échantillons $22,5 \text{ cm}^2$ et l'épaisseur moyenne $10,2 \text{ cm}$.

La teneur en eau initiale, à $50\%HR$, est déterminée de la même manière que pour l'essai mené sur le béton de chanvre Easy R en imposant une désorption primaire $85-50\%HR$. Ce choix

sous-entend que l'histoire hydrique vécue par les échantillons Easy P est la même que celle vécue par les échantillons Easy R.

La figure 5-34 présente les résultats obtenus à partir de cette modélisation pour les trois courbes de désorption principales analysées.

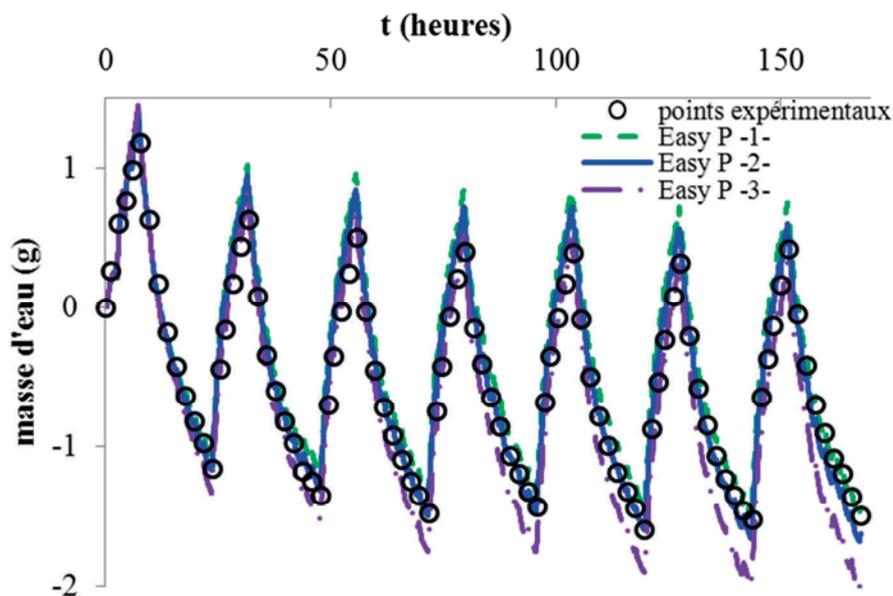


Figure 5-34 Evolution de la masse d'eau -influence de la courbe de désorption principale-

Quelle que soit la courbe de désorption principale étudiée, les résultats numériques sont assez proches des résultats expérimentaux.

Globalement, l'évolution de la masse d'eau est similaire pour les trois configurations analysées ce qui montre que l'amplitude de la courbe de désorption principale a peu d'impact au contraire de la capacité hydrique, caractérisée par sa dérivée. Toutefois, la modélisation Easy P -3- a tendance à légèrement sur-estimer la masse d'eau réellement perdue. La courbe de désorption principale du béton de chanvre Easy P est donc vraisemblablement comprise entre les courbes Easy P -1- et Easy P -2-. En se limitant à cette approche simplifiée, on choisit d'opter pour la configuration -2- bien qu'il soit difficile d'être catégorique sur la pertinence de ce choix à défaut de données expérimentales supplémentaires.

Le tableau 5-3 synthétise finalement le paramétrage retenu pour construire les courbes d'adsorption et de désorption principales du béton de chanvre Easy P.

Construction des courbes principales Easy P

Modèle de Van Genuchten

$$u = u_{sat} \left(1 + \left| \alpha \frac{RT}{M_l g} \ln(\varphi) \right|^\eta \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)}$$

Adsorption

$$\alpha_{ads} = 0,0747, \eta_{ads} = 1,692$$

$$\text{et } u_{sat} = 2,4 \text{ kg/kg}$$

Désorption

$$\alpha_{des} = 0,879, \eta_{des} = 1,31$$

$$\text{et } u_{sat} = 2,4 \text{ kg/kg}$$

Tableau 5-3 Synthèse du paramétrage des courbes d'adsorption et désorption principales Easy P

5.5.4. Bilan

La prise en compte en compte du phénomène d'hystérésis traduit le comportement réel du béton de chanvre et permet de mieux reproduire l'évolution de la masse d'eau. Elle autorise par ailleurs la prise en compte d'une teneur en eau initiale réaliste. Les courbes principales d'adsorption et de désorption, limites physiques à l'évolution de la teneur en eau permettent d'encadrer de manière satisfaisante l'évolution de la masse d'eau au sein du matériau. Les résultats obtenus montrent ainsi que le matériau possède une histoire hydrique qu'il est important de ne pas négliger. A un instant t de la vie du matériau, cette histoire hydrique se traduit par une teneur en eau initiale, située entre adsorption et désorption principale, qu'il est en pratique impossible de déterminer sans suivre la vie complète du matériau.

5.6. Application à la paroi

Dans cette étude, on reprend la première séquence climatique isotherme sous gradient d'humidité relative détaillée au chapitre 4.

Les essais MBV ont montré l'influence de la teneur en eau initiale, tributaire de l'histoire hydrique vécue par le matériau et conséquence du phénomène d'hystérésis.

5.6.1. Influence de la prise en compte de l'hystérésis

Dans un premier temps, afin d'évaluer l'impact de la modélisation de l'hystérésis, la teneur en eau initiale est choisie basse, sur la courbe d'adsorption principale.

Les figures 5-35 et 5-36 comparent les distributions d'humidité relative et de température obtenues avec et sans prise en compte de l'hystérésis.

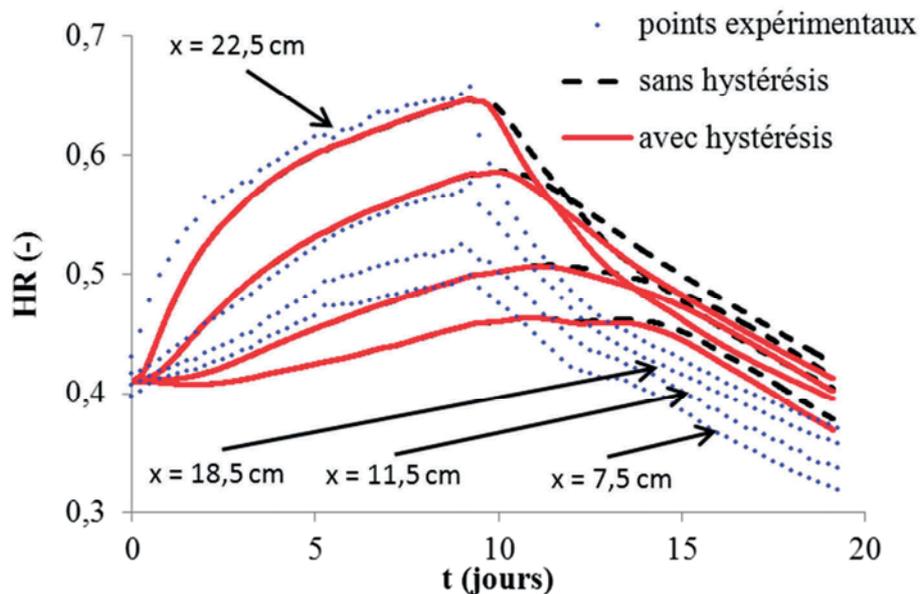


Figure 5-35 Distributions d'humidité relative -influence de la prise en compte de l'hystérésis-

Pour plus de lisibilité, les distributions de température sont uniquement représentées à $x = 22,5$ cm et $x = 7,5$ cm.

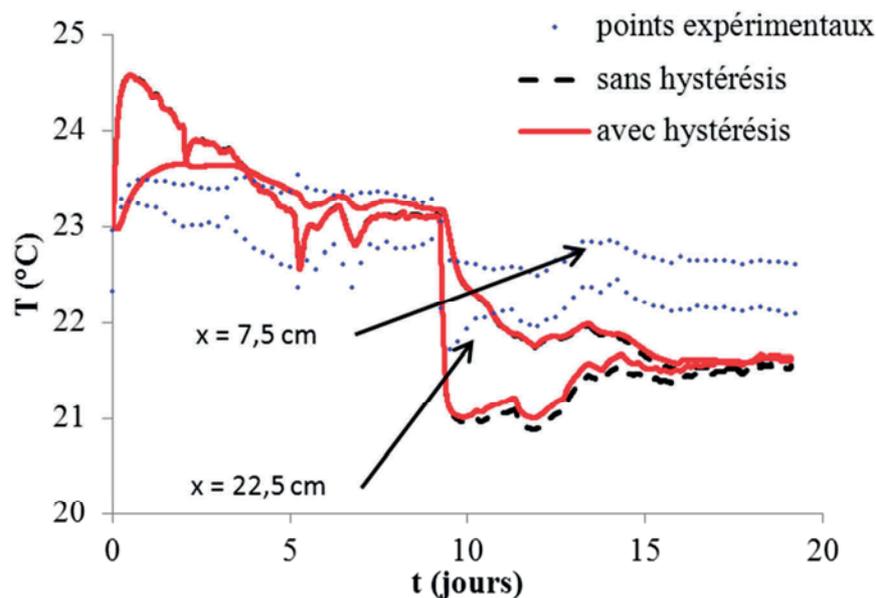


Figure 5-36 Distributions de température -influence de la prise en compte de l'hystérésis-

En phase d'adsorption, jusqu'au pic d'humidité autour du 10^{ème} jour, la prise en compte du phénomène d'hystérésis n'a ici clairement aucun effet. En effet, durant cette période, l'évolution de la teneur en eau au sein du matériau est gouvernée dans chaque cas par la courbe d'adsorption principale. En revanche, en phase de désorption, le modèle d'hystérésis permet de mieux prendre en compte les variations d'humidité grâce à une meilleure modélisation de la cinétique de stockage.

5.6.2. Histoire hydrique et teneur en eau initiale

La teneur en eau du béton de chanvre conditionne les distributions d'humidité relative et de température à travers le matériau. En effet, comme il a été développé précédemment, elle détermine non seulement les valeurs des propriétés hygrothermiques et par corrélation le transport d'humidité mais joue également un rôle sur les cinétiques de stockage. Cependant, la connaissance pratique de la teneur en eau réelle dans la paroi est difficile à évaluer.

A un instant t donné, au début d'une séquence climatique, la teneur en eau initiale, dépendante de l'histoire hydrique du matériau est susceptible de connaître des distributions variées :

- Elle peut être constante, à une valeur intermédiaire située entre les courbes d'adsorption et de désorption principale. Cette configuration est susceptible d'être réaliste si les surfaces intérieure et extérieure sont soumises à des conditions climatiques identiques pendant un temps de stabilisation suffisamment long.
- Puisque la surface extérieure est soumise à d'importantes fluctuations d'humidité relative et de température quand les températures et humidités relatives intérieures sont maintenues constantes (autour de 23°C et 40%HR), la distribution de teneur en eau à travers la paroi n'est vraisemblablement pas constante. Au début de la simulation d'une séquence d'étude, cette hypothèse peut être introduite par

l'intermédiaire d'un gradient de teneur en eau initiale entre les surfaces extérieure et intérieure du mur.

5.6.2.1. Teneurs en eau initiale extrêmes

Dans un premier temps, on admet que la teneur en eau initiale est constante :

- teneur en eau initiale basse (u_i basse) située sur la courbe d'adsorption principale
- teneur en eau initiale haute (u_i haute) située sur la courbe de désorption principale

Les figures 5-37 et 5-38 comparent les distributions d'humidité relative et de température obtenues à partir des teneurs en eau initiales étudiées.

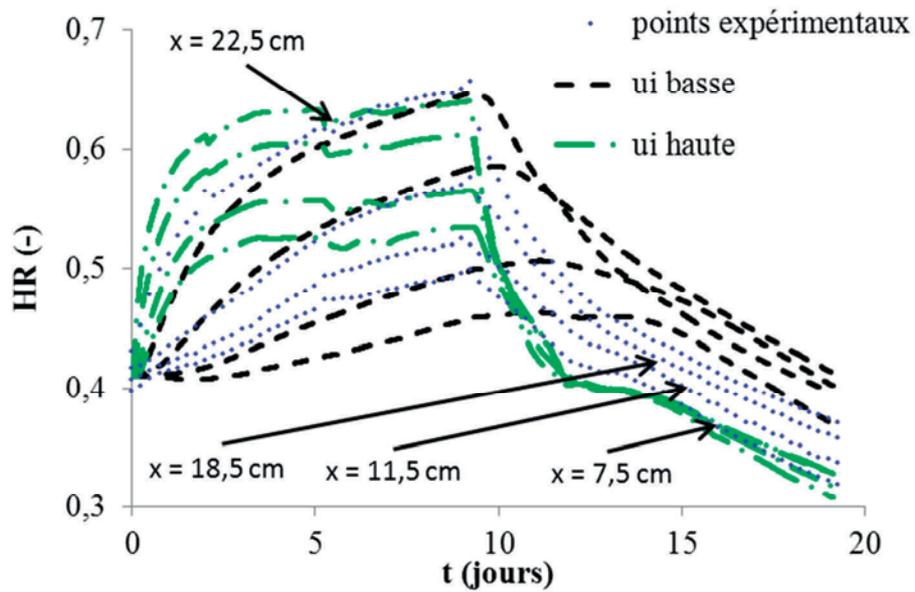


Figure 5-37 Distributions d'humidité relative - influence de la teneur en eau initiale -

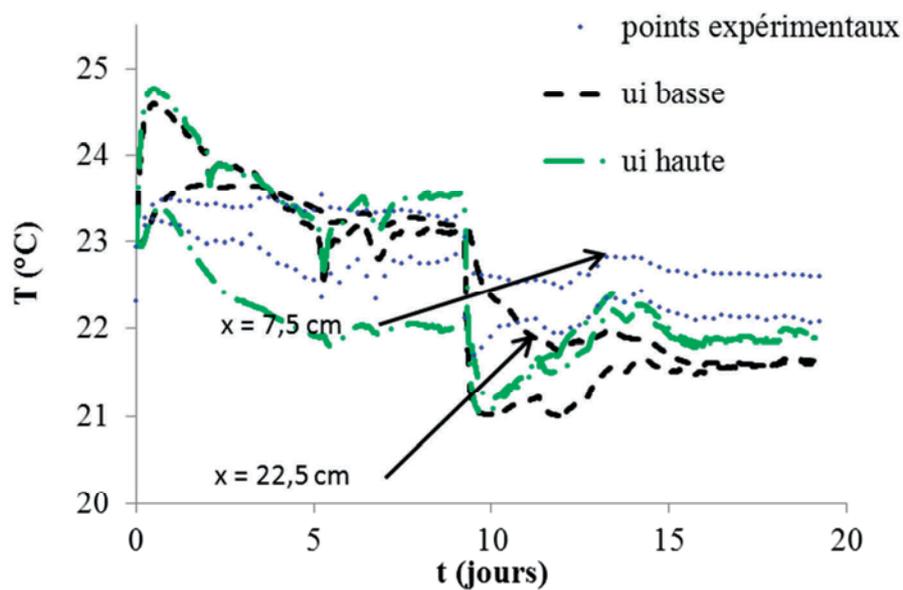


Figure 5-38 Distributions de température - influence de la teneur en eau initiale -

Il est tout d'abord à noter que des teneurs élevées favorisent le transport conductif de chaleur ce qui explique la distribution de température proche de la paroi intérieure figure 5-38 en phase d'adsorption.

On constate par ailleurs qu'en phase d'adsorption, une teneur en eau initiale basse conduit à une légère sous-estimation de l'humidité relative réelle dans le matériau alors qu'une teneur en eau initiale élevée la surestime, quelle que soit la position dans le mur. Réciproquement, en phase de désorption, ces conclusions sont inversées. Plus que l'amplitude, la cinétique de distribution de l'humidité relative apparaît davantage affectée par le choix de la teneur en eau initiale. Il est alors intéressant d'analyser l'évolution de la teneur en eau à travers la paroi durant la simulation. La figure 5-39 représente ainsi les profils de teneur en eau obtenus en phase d'adsorption à 5 jours et en phase de désorption à 10 et 15 jours.

Il est à noter que l'évolution de la teneur en eau reste proche de la teneur en eau initiale. Les profils de teneur en eau sont avant tout tributaires des fluctuations de l'humidité relative extérieure. Il se dégage également de cette analyse que ces profils sont alternativement convexes en phase d'adsorption puis concaves en phase de désorption.

Cette première approche montre donc que l'histoire hydrique joue un rôle déterminant dans le comportement hydrique du béton de chanvre. Si la teneur en eau au début de la simulation demeure fondamentalement inconnue, on peut affirmer que le fait de la déterminer ou de la choisir de manière adéquate permettrait d'obtenir des résultats très satisfaisants.

L'étude menée par la suite a pour but de discuter de l'influence de la distribution de teneur en eau initiale à travers la paroi sur les réponses numériques.

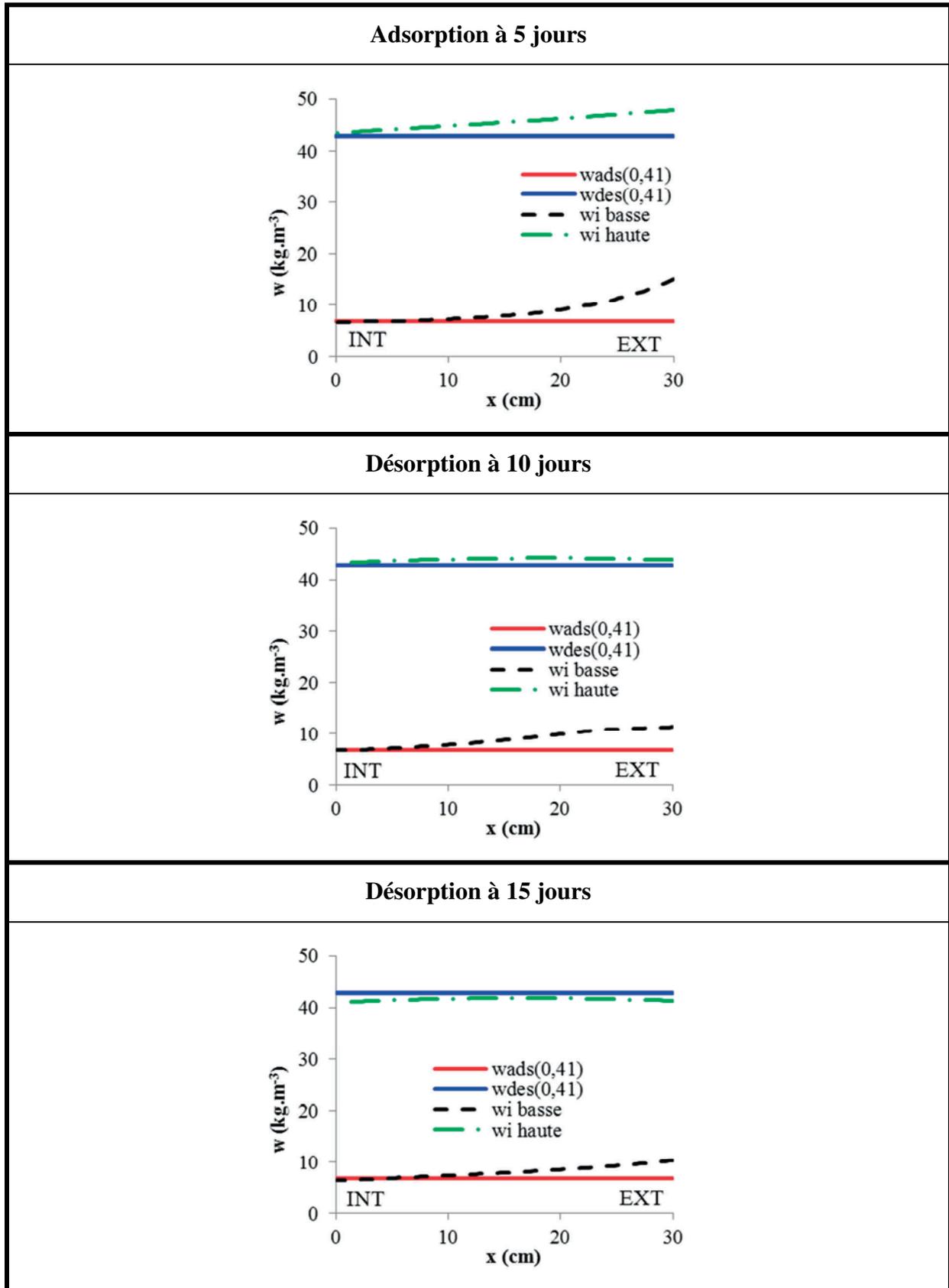


Figure 5-39 Profils de teneur en eau en phase d'adsorption et de désorption

5.6.2.2. Teneurs en eau initiales intermédiaires

Dans un premier temps, l'étude de la valeur de teneur en eau initiale est complétée en utilisant des teneurs en eau initiales intermédiaires comprises entre les courbes d'adsorption et de désorption principale (cf. figure 5-40).

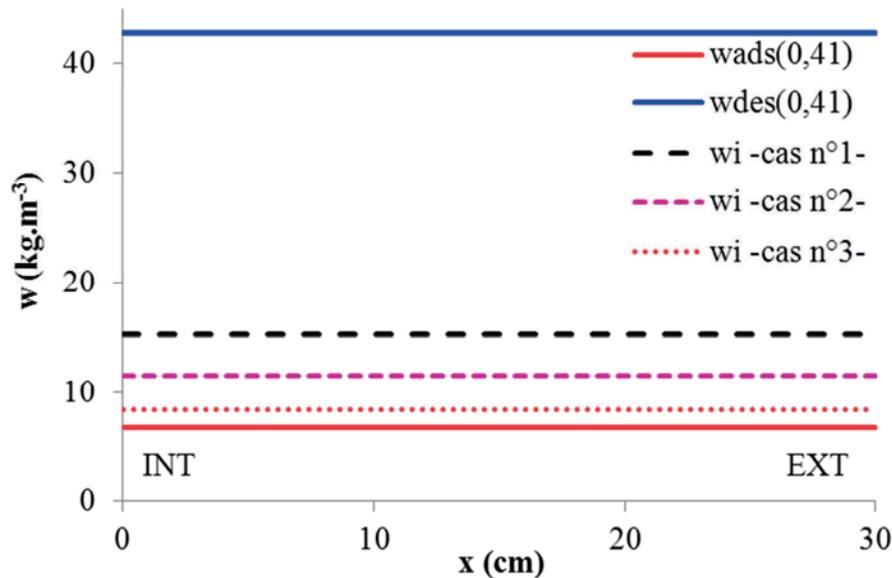


Figure 5-40 Teneurs en eau initiales étudiées

Pour obtenir ces teneurs en eau initiales, on fait subir une désorption primaire à la paroi d'une valeur d'humidité HR_f à la valeur initiale HR_{init} . Trois valeurs HR_f sont étudiées ici :

- $HR_f = 90\%$ - cas n°1 -
- $HR_f = 80\%$ - cas n°2 -
- $HR_f = 60\%$ - cas n°3 -

Les figures 5-41 et 5-42 comparent les distributions d'humidité relative et de température obtenues à partir des teneurs en eau initiales étudiées.

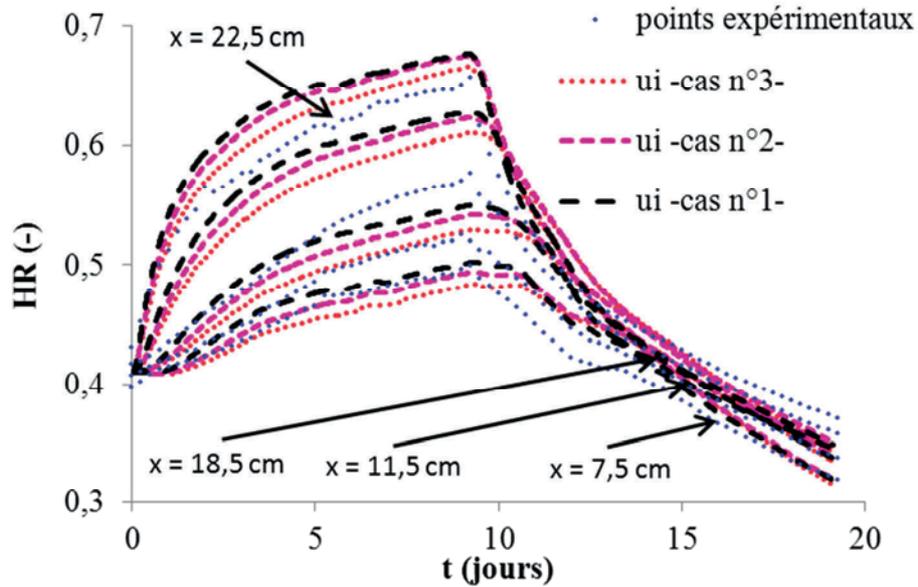


Figure 5-41 Distributions d'humidité relative - influence de la teneur en eau initiale -

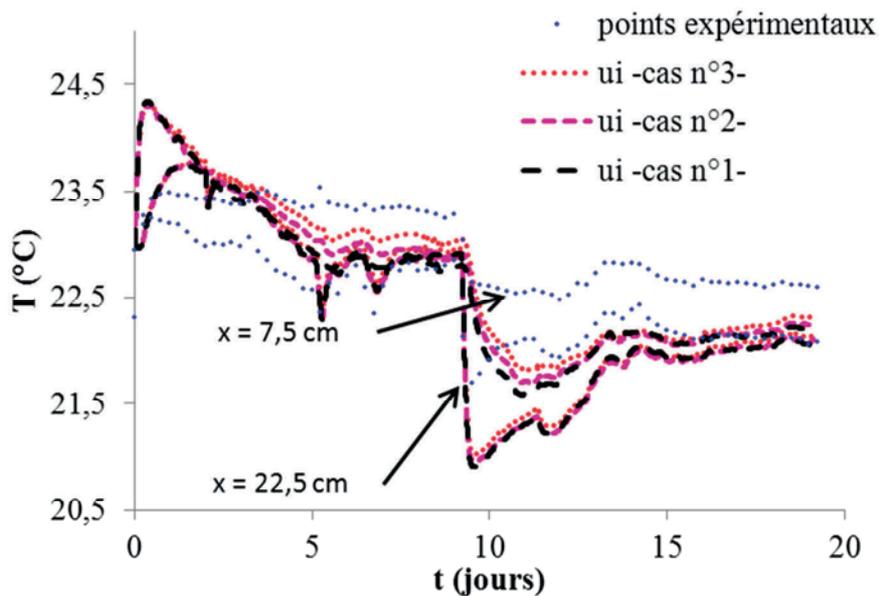


Figure 5-42 Distributions de température - influence de la teneur en eau initiale -

Comme attendu suite aux résultats obtenus au paragraphe précédent, on constate tout d'abord que la prise en compte d'une teneur en eau initiale intermédiaire conduit à des résultats plus satisfaisants à la fois en humidité relative et en température. La cinétique de distribution de l'humidité relative est ainsi bien mieux reproduite puisque l'instant du pic d'humidité obtenu numériquement correspond relativement bien à celui obtenu expérimentalement et l'évolution de l'humidité en phase d'adsorption et en phase de désorption est plutôt satisfaisante. Toutefois, l'humidité relative semble légèrement surestimée en phase d'adsorption particulièrement à $x = 18,5\text{cm}$.

5.6.2.3. Gradients de teneur en eau initiale

D'un point de vue simulation numérique, l'inhomogénéité supposée de la distribution de teneur en eau à travers la paroi peut se traduire par l'introduction d'un gradient de teneur en eau initiale.

La discussion menée dans cette section porte sur l'allure du gradient de teneur en eau initiale et sur son influence sur les réponses numériques de la paroi. Ainsi, sont comparés figure 5-43 trois gradients de teneur en eau initiale dont les allures traduisent différentes histoires susceptibles d'avoir été vécues par la paroi (cf. paragraphe 5.6.2.1.) :

- convexe (adsorption privilégiée)
- concave (désorption privilégiée)
- constante (pas de tendance générale)

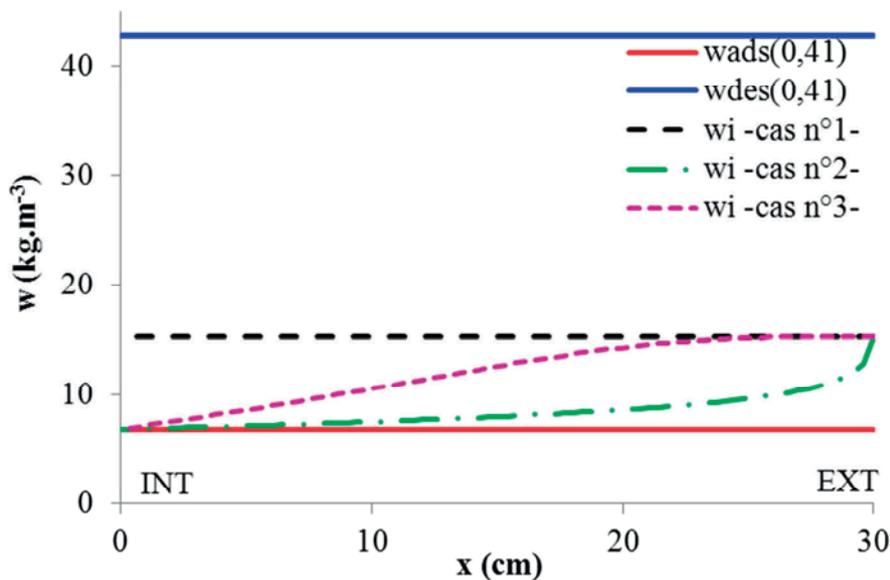


Figure 5-43 Profils de teneur en eau initiale étudiés

Durant la totalité de la campagne expérimentale, il est rappelé que l'ambiance intérieure est maintenue à 40%HR alors que l'ambiance extérieure de la paroi est soumise à des fluctuations importantes d'humidité.

Numériquement, les gradients de teneur en eau initiale représentés figure 5-43 sont construits en faisant subir une désorption primaire à la paroi d'une valeur d'humidité HR_f à la valeur initiale HR_{init} . Les trois cas étudiés sont obtenus en faisant varier la valeur de HR_f :

- $HR_f = HR_{max} = 90\%$ - cas n°1 -
- $HR_f = HR_{max} + (HR_{init} - HR_{max}) \left(\frac{e^{-x}}{e}\right)^{0,5}$ - cas n°2 -
- $HR_f = HR_{max} + (HR_{init} - HR_{max}) \left(\frac{e^{-x}}{e}\right)^3$ - cas n°3 -

Ces expressions purement numériques permettent d'obtenir simplement des gradients d'allures différentes. e désigne l'épaisseur de la paroi et x la distance à la surface intérieure. Dans la séquence d'étude considérée, on rappelle que $HR_{init} = 41\%$. Le choix de ces expressions permet d'obtenir des gradients de teneur en eau initiale d'allures différentes respectivement constant, convexe et concave. En outre, le choix d'une valeur HR_{max} volontairement élevée de $90\%HR$, humidité relative maximale d'ambiance extérieure, est retenu pour mener cette discussion afin de mettre en évidence l'influence de ces gradients.

Les résultats obtenus à partir de ces gradients de teneur en eau initiale en terme de distribution d'humidité relative et de température sont présentés figure 5-44 et 5-45.

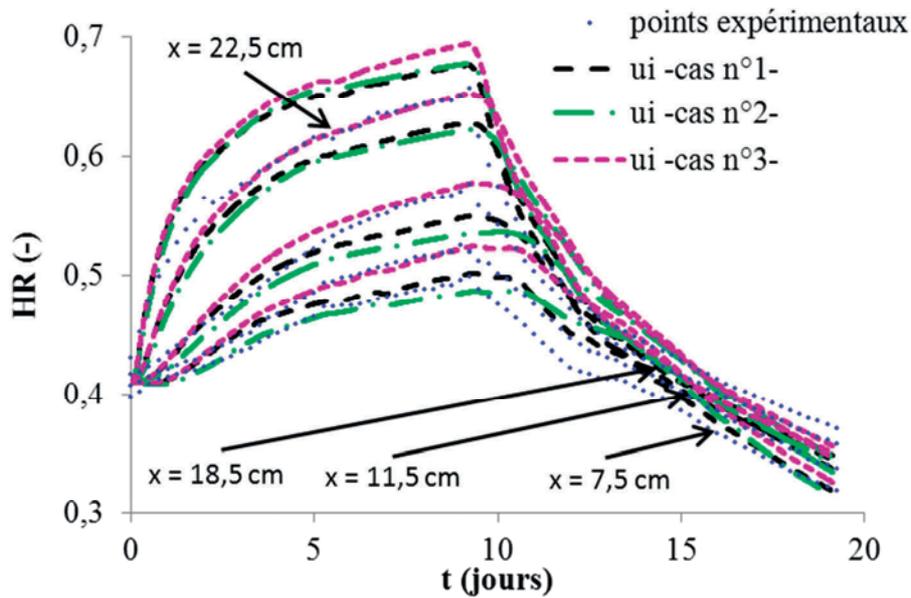


Figure 5-44 Distributions d'humidité relative -influence du gradient de teneur en eau initiale-

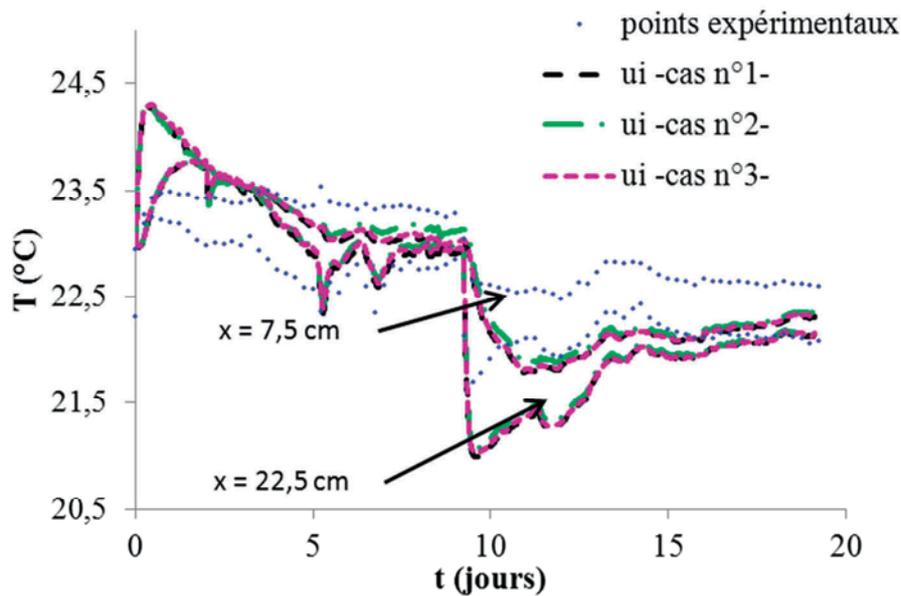


Figure 5-45 Distributions de température -influence du gradient de teneur en eau initiale-

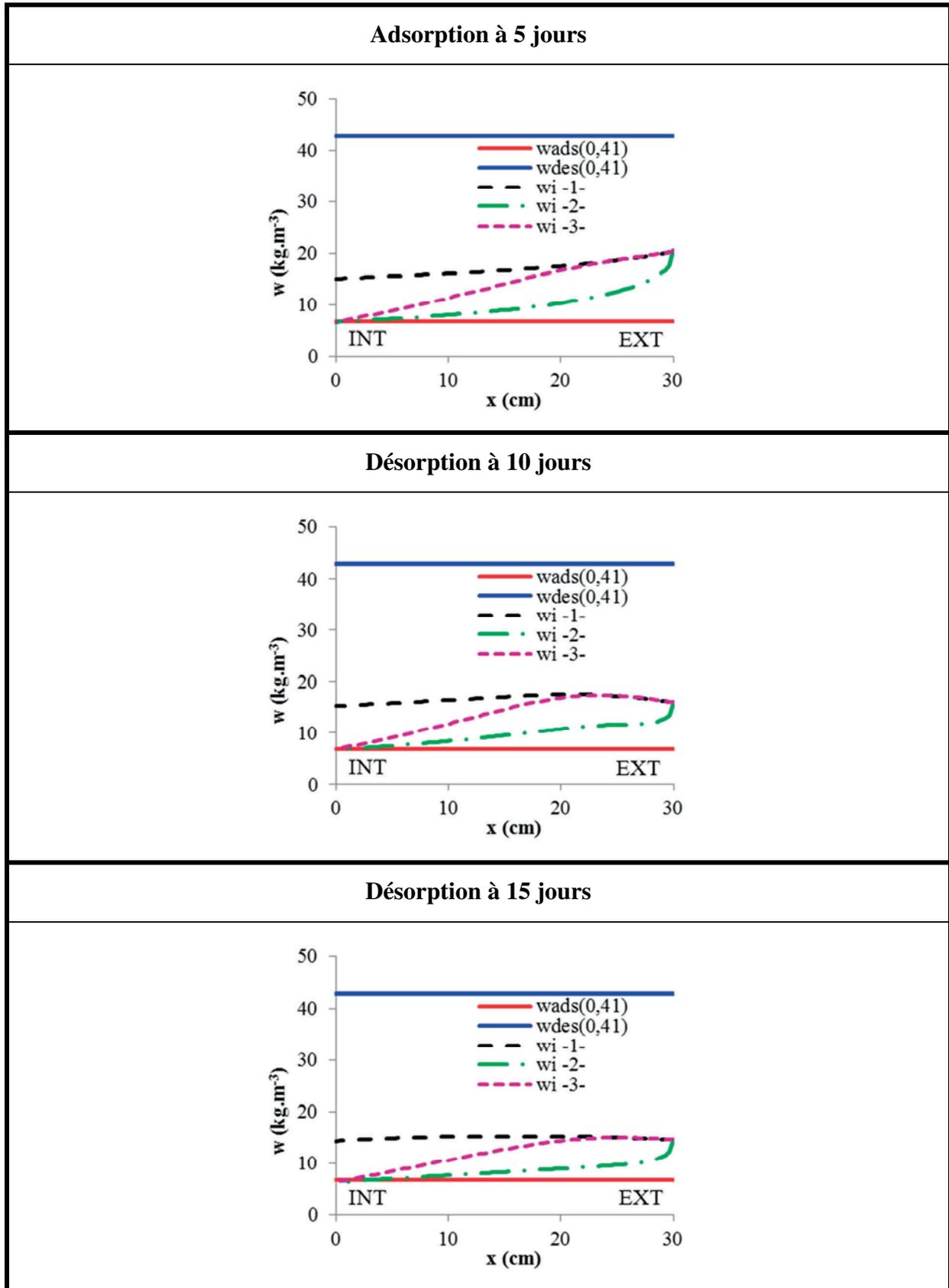


Figure 5-46 Profils de teneur en eau en phase d'adsorption et de désorption

Sur les figures 5-44 et 5-45, le cas n°1 où le gradient de teneur en eau initiale est nul sert de référence à la discussion. Un gradient de teneur en eau initiale convexe (cas n°2) conduit à températures plus hautes et des humidités relatives plus faibles à travers la paroi par rapport au cas référence n°1. A l'inverse, un gradient de teneur en eau concave (cas n°3) génère des températures plus faibles et des humidités relatives plus hautes.

Le profil de teneur en eau initiale semble donc avoir une certaine influence sur les réponses numériques du modèle. Afin de poursuivre l'analyse, l'évolution des profils de teneur en eau en phase d'adsorption et de désorption est représentée figure 5-46.

L'information qui ressort de cette étude est la conservation de l'allure du profil de teneur en eau quel que soit le régime de sollicitation imposé à la paroi, adsorption ou désorption. Le gradient de teneur en eau initiale conditionne à la fois, par son allure, la capacité hydrique (dérivée de la teneur en eau par rapport à l'humidité relative) et, par une initiation plus ou moins retardée en fonction de la valeur de teneur en eau dans la paroi, le transport liquide. Cette double influence participe à l'évolution des réponses numériques (figures 5-44 et 5-45).

Cependant, rien ne permet de privilégier une approche par rapport à l'autre en raison de la méconnaissance du niveau de teneur en eau réel dans la paroi.

5.6.2.4. Optimisation de la réponse numérique

La recherche d'une solution optimale qui rapproche réponses expérimentales et numériques à travers la paroi est difficile. Elle est le fruit d'un compromis entre niveau et allure du gradient de teneur en eau initiale. Une solution qui peut être proposée est celle d'un gradient de teneur en eau initiale convexe qui est obtenue à partir de la relation précédemment introduite :

$$HR_f = HR_{max} + (HR_{init} - HR_{max}) \left(\frac{e - x}{e} \right)^{0,5} \quad (5-50)$$

avec $HR_{max} = 75\%HR$.

Il s'agit d'une représentation purement numérique qui vise à prendre compte de manière simple l'histoire hydrique vécue par la paroi.

Les distributions d'humidité relative et de température obtenues à partir de cette modélisation sont comparés aux réponses numériques obtenues sans prise en compte de l'hystérésis afin d'évaluer l'influence de la prise en compte complète de ce phénomène (figures 5-47 et 5-48).

La prise en compte du phénomène d'hystérésis améliore sensiblement les résultats obtenus à la fois sur les distributions d'humidité relative par une meilleure évaluation du stockage d'humidité dans la paroi. La meilleure évaluation des distributions d'humidité relative permet ainsi de mieux reproduire les gradients de pression de vapeur à l'origine du transport de chaleur par évapo-condensation pour, au final, conduire à une meilleure évaluation des distributions de température.

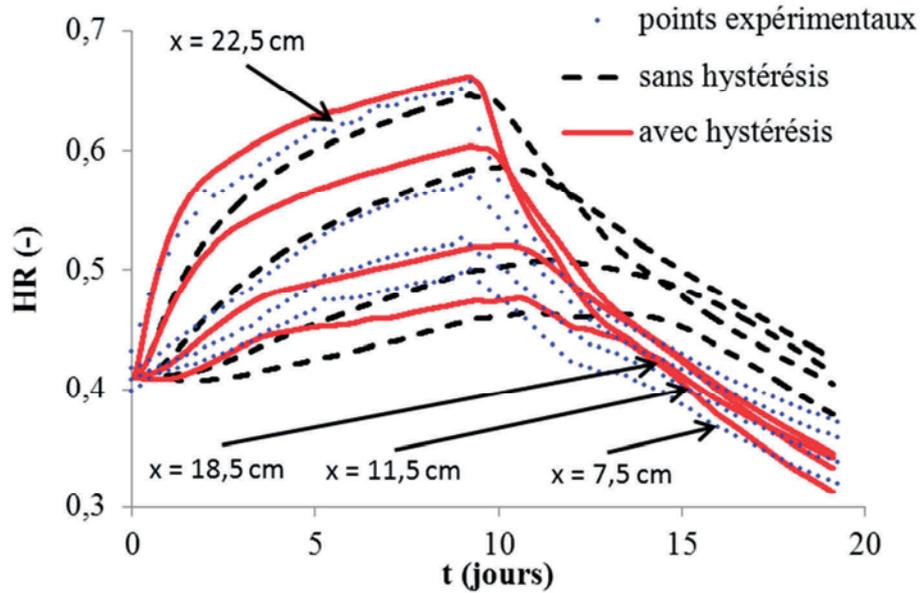


Figure 5-47 Distributions d'humidité relative - influence de l'hystérésis -

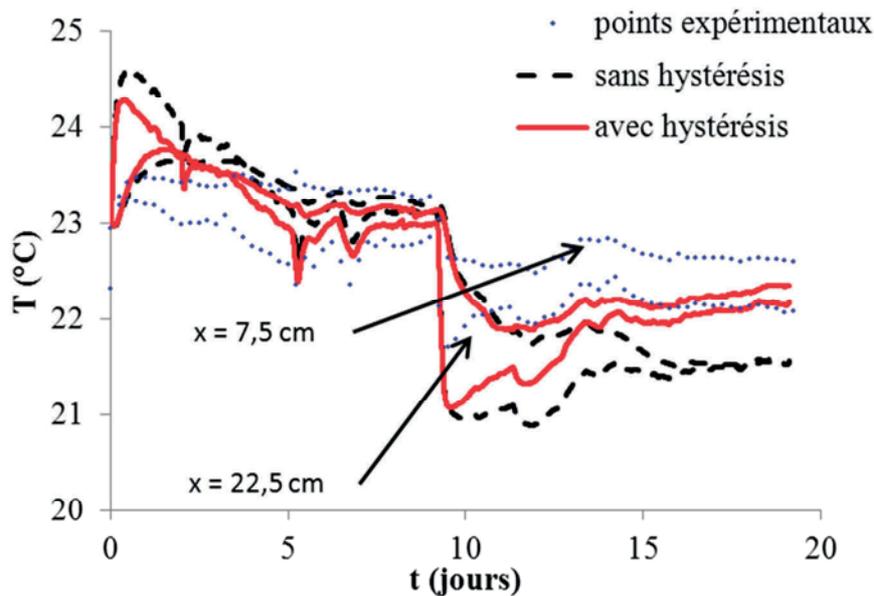


Figure 5-48 Distributions de température - influence de l'hystérésis -

5.6.3. Application à une autre séquence isotherme

La modélisation adoptée précédemment est reprise et appliquée à la seconde séquence isotherme présentée au chapitre 4. La teneur en eau initiale est celle utilisée au paragraphe précédent et obéit à la relation (5-50).

Les résultats obtenus sont présentés figures 5-49 et 5-50.

Les observations de ces résultats viennent conforter celles effectuées pour la première séquence d'étude. Globalement, la prise en compte du phénomène d'hystérésis permet de mieux reproduire les réponses de la paroi en humidité relative et en température. Par ailleurs,

l'évolution de l'humidité relative à la position $x = 18,5$ cm est, à l'instar du cas précédent, surestimée.

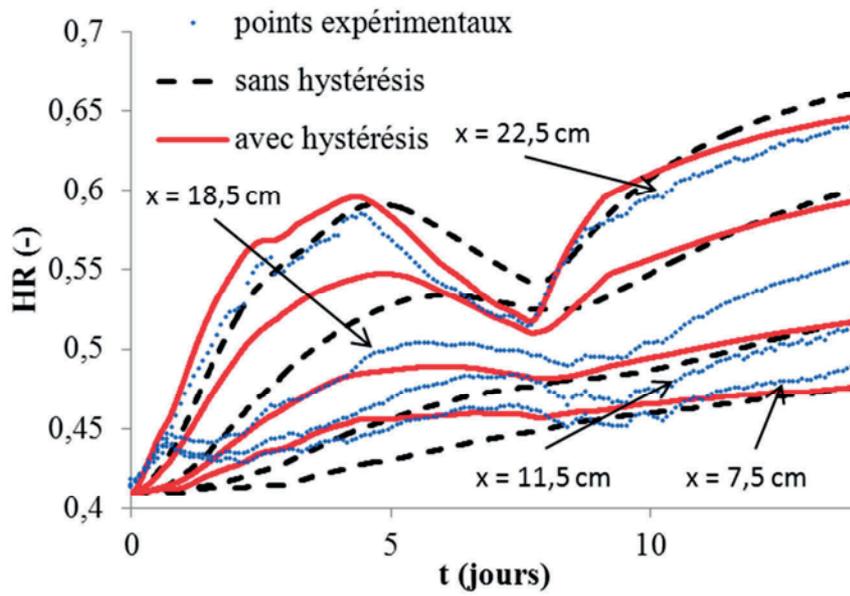


Figure 5-49 Distributions d'humidité relative - influence de l'hystérésis -

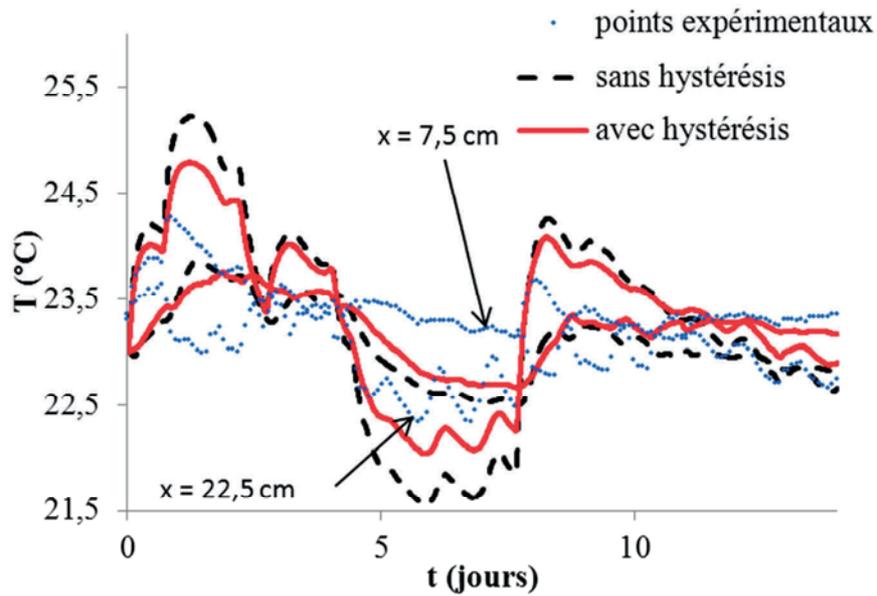


Figure 5-50 Distributions de température - influence de l'hystérésis -

5.7. Conclusion

Ce chapitre a tout d'abord permis de caractériser expérimentalement le comportement hystérétique du béton de chanvre. La recherche de la courbe de désorption principale, tributaire du modèle d'hystérésis utilisé pour la construire, est à interpréter avec précaution en l'absence d'une confrontation expérimentale adaptée. Parmi les modèles d'hystérésis étudiés, le modèle mathématique de Huang, de principe simple, est celui qui permet de reproduire de manière la plus réaliste l'évolution de la teneur en eau du béton de chanvre à la fois en adsorption et en désorption, principales ou intermédiaires.

Dans le cadre d'une utilisation en conditions réalistes, la modélisation et l'évaluation de la teneur en eau se révèle prépondérante dans la mesure où elle contrôle les transferts hygrothermiques et gouverne les processus cinétiques de distribution d'humidité et de chaleur. En effet, l'étude réalisée a montré que la prise en compte du phénomène d'hystérésis au sein du béton de chanvre est indispensable pour reproduire son comportement hydrique réel en conditions isothermes. Le choix usuel de la courbe d'adsorption principale pour décrire l'évolution de la teneur en eau du matériau apparaît donc non seulement insuffisant pour décrire la cinétique hydrique mais ne tient également pas compte du comportement physique réel du matériau.

La teneur en eau initiale conditionnée par l'histoire hydrique vécue par le matériau et étudiée à travers les essais MBV et l'étude de la paroi en conditions isothermes, a une influence très significative sur la réponse simulée de la paroi en béton de chanvre.

L'intégration d'un modèle d'hystérésis adapté au béton de chanvre au modèle global de transferts hygrothermiques permet donc d'estimer correctement et physiquement les distributions de température et d'humidité relative au sein de la paroi bien que la maîtrise de la répartition initiale de teneur en eau soit difficile.

L'étude ciblée en conditions isothermes a délaissé jusqu'ici l'influence de la température. En effet, la teneur en eau est soumise à l'influence simultanée de l'humidité relative et de la température. Quel rôle peut avoir la température sur le comportement hydrique hystérétique du béton de chanvre ?

6

Effet de la température sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre

En conditions isothermes, la modélisation adoptée s'est montrée adaptée et performante pour caractériser le comportement hygrothermique à l'échelle du matériau et l'évaluer à l'échelle de la paroi.

Qu'en est-il en conditions non isothermes ? Quelle influence a la température sur le comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre ?

SOMMAIRE

6.1. Introduction	267
6.2. Approche théorique et modélisation de la contribution de la température au comportement hydrique	268
6.2.1. Température et isothermes de sorption	268
6.2.1.1. Synthèse bibliographique	268
6.2.1.2. Hypothèse de modification de la structure porale	270
6.2.1.3. Approche de Milly	271
6.2.1.4. Approche de Poyet	272
6.2.2. Température et transport d'humidité.....	276
6.3. Modélisation du comportement hydrique en température du béton de chanvre Easy R-bis	278
6.3.1. Comportement hydrique expérimental du béton de chanvre en température.....	278
6.3.2. Température et teneur en eau	280
6.3.2.1. Influence de la température sur la teneur en eau à saturation	280
6.3.2.2. Application de l'approche de Poyet	281
6.3.2.3. Prédiction des isothermes.....	284
6.3.3. Température et hystérésis.....	285
6.3.4. Température et propriétés hygrothermiques	287
6.3.5. Conclusion.....	288
6.4. Application à la paroi	290
6.4.1. Isothermes de sorption et température du béton de chanvre Easy P	290
6.4.2. Comportement hygrothermique de la paroi en conditions non isothermes.....	291
6.4.2.1. Conditions climatiques imposées	291
6.4.2.2. Analyse des résultats expérimentaux	292
6.4.3. Simulation et analyse du comportement hygrothermique de la paroi	294
6.4.3.1. Cadre de la simulation.....	294
6.4.3.2. Résultats de la simulation sur la paroi.....	294
6.4.3.2.1. Influence de la température.....	294
6.4.3.2.2. Analyse des conditions aux limites.....	296
6.4.4. Etude d'autres séquences non isothermes	298
6.4.4.1. Séquence non isotherme n°2	298
6.4.4.1.1. Conditions de l'étude	298
6.4.4.1.2. Résultats et analyse	298
6.4.4.2. Séquence non isotherme n°3	299
6.4.4.2.1. Conditions de l'étude	299
6.4.4.2.2. Résultats et analyse	300
6.5. Conclusion	302

6.1. Introduction

Les chapitres précédents ont permis d'obtenir une vision réaliste du comportement hygrothermique du béton de chanvre étudié sous conditions isothermes.

Toutefois, de nombreuses études sur des matériaux poreux [Merouani 1987, Dwi Argo 1994] montrent qu'à une humidité relative donnée, une diminution de la température entraîne une augmentation de la teneur en eau. Les mécanismes de thermodépendance du comportement hydrique du béton de chanvre doivent ainsi être identifiés et modélisés.

Dans un premier temps, une approche expérimentale est mise en place pour évaluer l'influence de la température sur le comportement du béton de chanvre. Une campagne expérimentale de sorption est ainsi menée à une température différente de la température de référence. Un travail de synthèse bibliographique complète cette approche expérimentale en proposant une modélisation de la thermo dépendance de la teneur en eau.

La prise en compte de l'influence de la température est ensuite intégrée au modèle global de transferts HAM. Les réponses des simulations en conditions non isothermes sont ainsi comparées aux enregistrements réalisés sur la paroi.

6.2. Approche théorique et modélisation de la contribution de la température au comportement hydrique

6.2.1. Température et isothermes de sorption

6.2.1.1. Synthèse bibliographique

L'étude de l'effet de la température sur le comportement hydrique d'un matériau poreux de construction est récente. Initialement expérimentales ([Hundt & Kantelberg 1978], [Daian 1988]), ces études sont le plus souvent menées sur des matériaux cimentaires à faible porosité ([Poyet 2009], [Brue 2009], [Drouet 2010]). Elles montrent notamment que la température modifie la forme de l'isotherme de sorption.

Les figures 6-1 et 6-2 représentent les isothermes de sorption respectivement en adsorption d'un mortier à base de ciment et en désorption d'une pâte de ciment en fonction de la température.

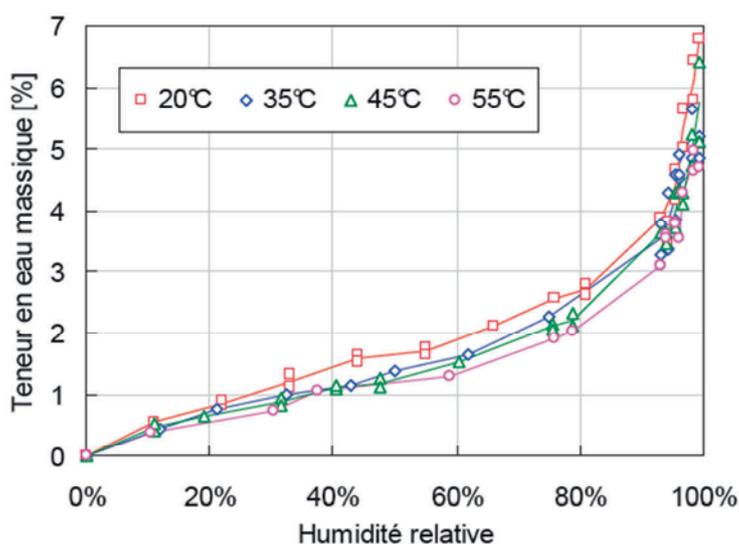


Figure 6-1 Isothermes d'adsorption d'un mortier cimentaire à différentes températures³²

³² Extrait de [Daian 1988]

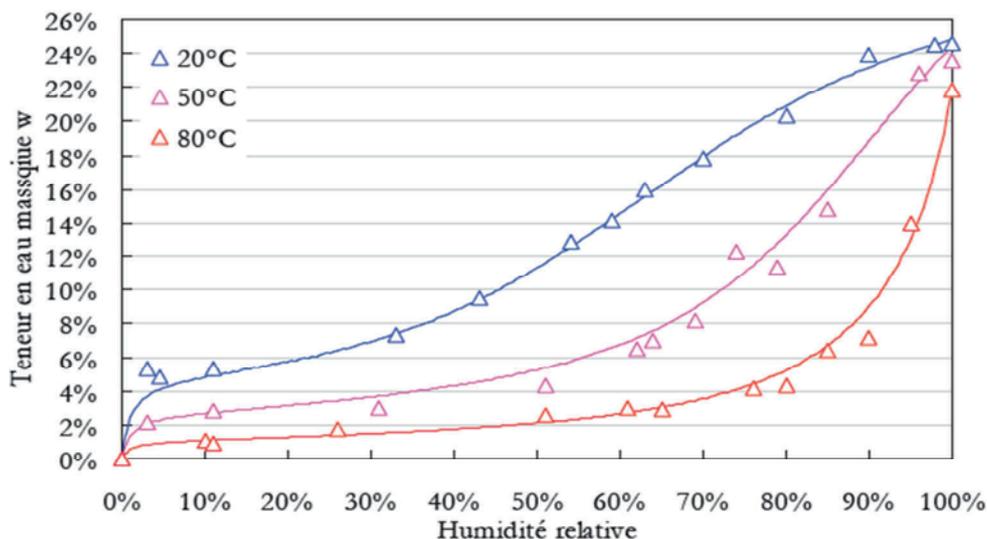


Figure 6-2 Isothermes de désorption d'une pâte de ciment³³

L'effet de la température apparaît moins marqué en adsorption qu'en désorption ce qui tend à montrer que l'augmentation de la température diminue l'hystérésis [Ishida 2007].

Les travaux sur les matériaux d'origine organique sont plus rares mis à part dans le cas du bois ([Stamm 1964], [Navi & Heger 2005], [Merakeb 2008]) mais montrent également une influence de la température (cf. figure 6-3).

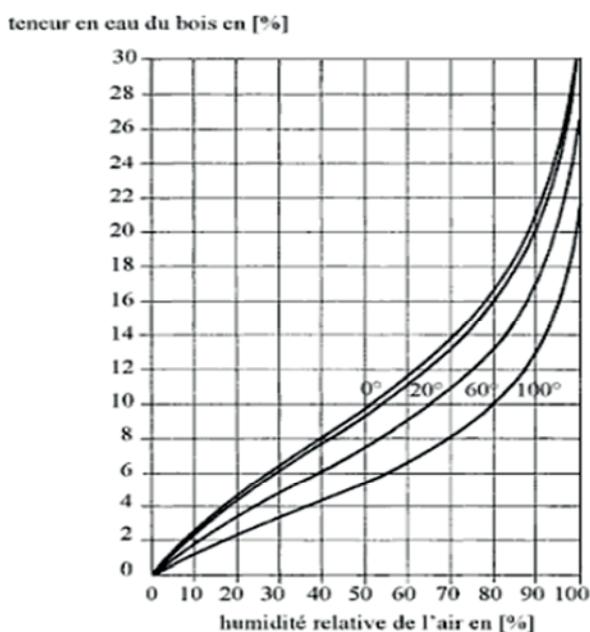


Figure 6-3 Isothermes de sorption du bois (épicéa) à différentes températures³⁴

³³ Extrait de [Drouet 2010]

³⁴ Extrait de [Stamm 1964]

[Drouet 2010] rappelle qu'il existe dans la littérature différentes approches qui tentent d'expliquer les principaux phénomènes pouvant être à l'origine de l'effet de la température sur les isothermes de sorption :

- une modification de la structure porale essentiellement par l'élargissement des micropores
- une évolution des propriétés thermophysiques de l'eau
- un déplacement de l'équilibre thermodynamique

Ces phénomènes sont en outre susceptibles de se produire simultanément.

6.2.1.2. Hypothèse de modification de la structure porale

[Rady 2003], à partir d'essais au porosimètre à mercure et de détermination de la surface spécifique, attribue l'effet de la température sur le comportement hydrique du matériau à une modification de la microstructure porale et à la distribution des pores : l'augmentation de la température entraînant un élargissement des pores. Cette hypothèse fournit une explication possible à l'allure des isothermes de sorption sous l'effet de la température notamment aux fortes humidités. Une déviation de l'isotherme (augmentation de la pente) avec la température est en effet couramment observée lorsque l'humidité devient élevée.

Cependant, les travaux issus de la littérature montrent que la teneur en eau à saturation peut se révéler très sensible à la température comme le montre la figure 6-4 sur un béton [Hundt & Kantelberg 1978] : plus la température est élevée, plus la teneur en eau à saturation est faible.

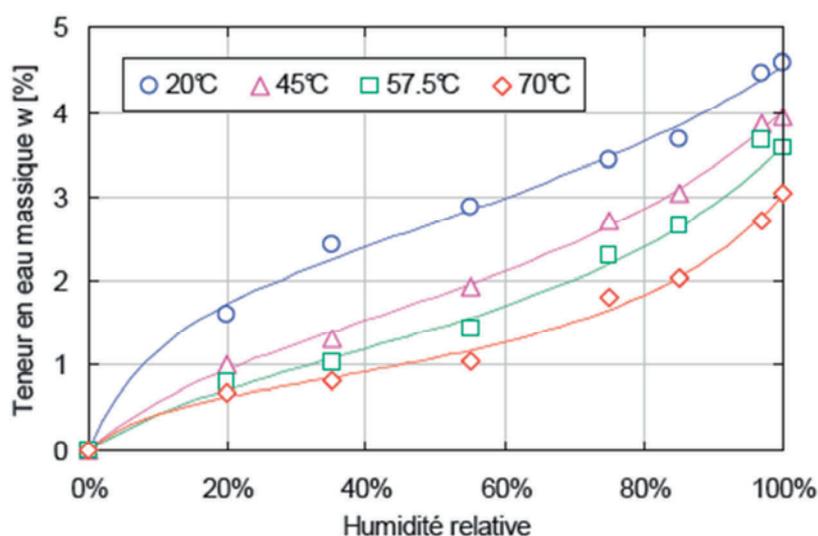


Figure 6-4 Isothermes de désorption principale d'un béton à différentes températures³⁵

L'hypothèse de l'augmentation de la porosité du matériau avec la température se heurte donc à la diminution de la teneur en eau à saturation et se révèle donc pour le moins négligeable devant d'autres phénomènes.

³⁵ Extrait de [Drouet 2010]

6.2.1.3. Approche de Milly

La modification des propriétés intrinsèques de l'eau peut ainsi contrebalancer l'effet de la température sur la structure poreuse et ainsi répondre au comportement hydrique à saturation.

Le modèle développé par [Milly 1982] propose de justifier l'influence de la température sur les isothermes de sorption par une modification des propriétés intrinsèques de l'eau.

Le prérequis à la construction du modèle est la connaissance d'une isotherme de sorption à une température de référence. L'objectif est ainsi de pouvoir prédire l'isotherme de sorption à une température quelconque à partir de cette isotherme de sorption.

Milly construit ainsi son raisonnement à partir de la relation thermodynamique différentielle cyclique qui relie teneur en eau et température (6-1) :

$$\left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_{\varphi} = \left. \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right|_T \left. \frac{\partial \varphi}{\partial T} \right|_u \quad (6-1)$$

La dérivée partielle de la teneur en eau par rapport à l'humidité relative peut être déterminée par la pente de l'isotherme de sorption à la température de référence.

Dans le second membre, le terme $\left. \frac{\partial \varphi}{\partial T} \right|_u$ est établi à teneur en eau u constante. Ainsi, si à la température de référence T_1 la teneur en eau u est atteinte pour une humidité relative φ_1 , à une température $T_2 \neq T_1$, cette même teneur en eau u est atteinte pour une humidité relative φ_2 . Milly introduit alors une expression de forme exponentielle (6-2) qui satisfait à la relation différentielle (6-1) :

$$\varphi_2(u, T_2) = \varphi_1(u, T_1) e^{C_{\varphi}(T_2 - T_1)} \quad (6-2)$$

Le coefficient C_{φ} [K^{-1}] se définit alors par :

$$C_{\varphi} = \frac{1}{\varphi} \left. \frac{\partial \varphi}{\partial T} \right|_u \quad (6-3)$$

Par ailleurs, la combinaison des lois de Young-Laplace et de Kelvin permettent d'exprimer l'humidité relative φ en fonction des caractéristiques thermophysiques de l'eau, tension superficielle σ et masse volumique ρ_l , et des caractéristiques structurelles du matériau, rayon de pore r et angle de contact θ :

$$\varphi = e^{-\frac{2\sigma \cos\theta}{\rho_l \frac{RT_{ref}}{M_l} r}} \quad (6-4)$$

L'effet de la température sur la structure porale du matériau est supposé négligeable. La relation humidité relative/température à une teneur en eau donnée est liée selon Milly uniquement à la dépendance des propriétés physiques de l'eau à la température. Ainsi, on obtient :

$$C_{\varphi} = - \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial T} - \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial \rho_l}{\partial T} \right) \quad (6-5)$$

Les expressions des caractéristiques physiques de l'eau en fonction de la température sont rappelées dans [Dwi Argo 1994]. Selon [Perrin 1985], la masse volumique de l'eau a ainsi pour expression :

$$\rho_l(T) = 999,99 + A(T - 278,15) + B(T - 278,15)^2 + C(T - 278,15)^3 + D(T - 278,15)^4 \quad (6-6)$$

Avec $A = 0,0147$, $B = -7,8102 \cdot 10^{-3}$, $C = 7,2047 \cdot 10^{-5}$ et $D = -5,0476 \cdot 10^{-7}$ et T en [K]

D'après [Couasnet 1997], la tension superficielle s'exprime en fonction de T [K]:

$$\sigma(T) = 10^{-3}(128 - 0,185 \cdot T) \quad (6-7)$$

Aux températures de 23°C et 10°C, C_{φ} a pour valeur :

$$\begin{aligned} C_{\varphi}(23^{\circ}C) &= -2,37 \cdot 10^{-3} K^{-1} \\ C_{\varphi}(10^{\circ}C) &= -2,41 \cdot 10^{-3} K^{-1} \end{aligned} \quad (6-8)$$

La validation expérimentale de cette approche est cependant loin d'être établie. Dans [Milly 1984], l'auteur mesure des valeurs de coefficient de température comprises entre $-10^{-3} K^{-1}$ et $-10^{-2} K^{-1}$. D'autres valeurs expérimentales plus élevées ont par ailleurs été mesurées ([Philip & De Vries 1957], [Miller & Jury 1974]).

L'approche de Milly semble donc se révéler insuffisante pour expliquer expérimentalement l'influence de la température sur les isothermes de sorption.

6.2.1.4. Approche de Poyet

Poyet estime et montre que la modification des propriétés physiques de l'eau pas plus que la modification de la structure porale avec la température ne permettent de comprendre et encore moins de reproduire le comportement hydrique en température sur le béton [Poyet 2009]. Il propose une approche basée sur la prépondérance de l'évolution thermodynamique des mécanismes de physisorption.

Le principe de la méthode de Poyet est expliquée et validée dans [Poyet 2009] et [Poyet & Charles 2009] sur de la pâte cimentaire. Merakeb, pour le bois, utilise une approche analogue à celle de Poyet [Merakeb 2008].

Poyet fait ainsi appel à la chaleur mise en jeu lors du processus d'adsorption. Il est montré depuis longtemps que l'adsorption est en effet un processus exothermique [Brunauer 1945]. Selon le principe de Le Chatelier et la loi expérimentale de Van't Hoff, si l'on tend à modifier les conditions d'un système en équilibre, il réagit de façon à s'opposer aux changements qu'on lui impose, jusqu'à l'établissement d'un nouvel équilibre. Ainsi, le caractère exothermique du

mécanisme d'adsorption implique qu'une augmentation de la température entrave son processus physique en provoquant une diminution du nombre de molécules adsorbées et donc de la teneur en eau. Réciproquement, la désorption, processus inverse à l'adsorption, est favorisée par une augmentation de température.

Ce phénomène bien connu dans la physique de sorption peut être décrit par l'équation de Clausius-Clapeyron qui permet d'évaluer la chaleur mise en jeu lors d'un changement de phase pour un système à l'équilibre. Dans le cas de l'adsorption, la chaleur échangée par le système eau vapeur/eau adsorbée, régie par l'équation de Clausius-Clapeyron, peut s'exprimer par la relation :

$$Q_{st}(u) = -R \left[\frac{\partial \ln(p_v)}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right]_u \quad (6-9)$$

Q_{st} [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$] désigne la chaleur isostérique molaire, R ($8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) la constante de gaz parfaits et p_v [Pa] la pression partielle de vapeur. On peut noter que cette relation est établie à teneur en eau u constante.

La chaleur isostérique d'adsorption correspond à la variation d'énergie pour un recouvrement constant de la surface de l'adsorbant :

$$q_{st} = \frac{Q_{st}}{M_l} = -\Delta h_{ads} = -(h_{ads} - h_g) \quad (6-10)$$

On privilégie dans cette relation l'écriture massique qui sera conservée par la suite. Ainsi, h_{ads} [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] désigne l'enthalpie massique de l'adsorbat, h_g [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] celle de la phase gazeuse, Δh_{ads} [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] l'enthalpie d'adsorption, q_{st} [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] la chaleur isostérique massique et M_l ($0,018 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$) la masse molaire de l'eau.

La détermination de la chaleur isostérique nécessite la connaissance de deux isothermes de sorption établies à des températures T_1 et T_2 différentes.

Ainsi, on obtient :

$$q_{st}(u) = \frac{R}{M_l} \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \left[\frac{p_v(T_2, u)}{p_v(T_1, u)} \right] \quad (6-11)$$

A titre indicatif, il est à noter qu'il est également possible de déterminer expérimentalement la chaleur isostérique par l'intermédiaire de la chaleur différentielle d'adsorption Q_d [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$] par des essais calorimétriques. Cette dernière se définit comme l'énergie ramenée à l'unité de masse libérée par l'adsorption d'une quantité infiniment petite de soluté. Cette chaleur varie avec la quantité de soluté adsorbée. La relation de Huckel permet de relier les deux grandeurs par la relation :

$$Q_{st} = Q_d + RT \quad (6-12)$$

Afin de valider sa méthode, Poyet a comparé les résultats obtenus par son approche aux résultats expérimentaux menés par [Powers & Brownyard 1948] sur une pâte de ciment. La comparaison des courbes isostériques est présentée figure 6-5.

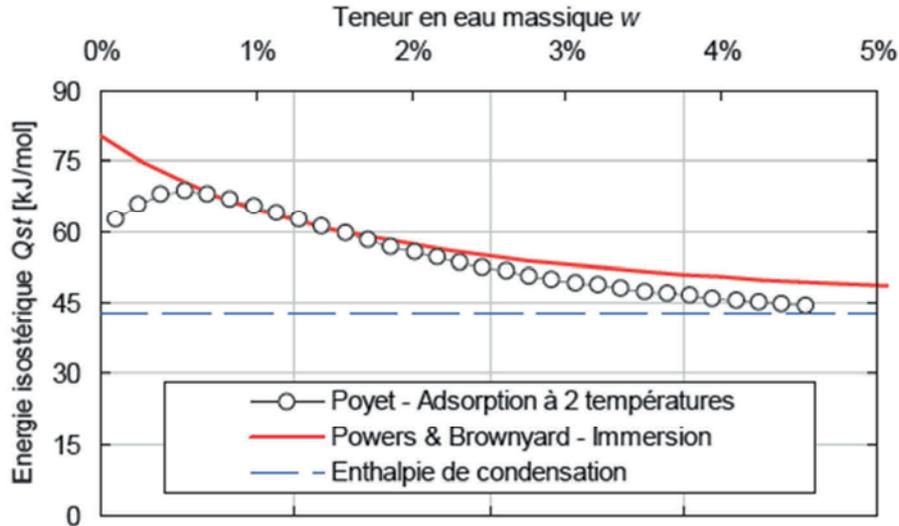


Figure 6-5 Allure des courbes isostériques³⁶

Il est à noter que l'énergie isostérique tend vers la chaleur latente de condensation lorsque la teneur en eau tend vers la saturation.

D'après [Drouet 2010], le maximum de l'énergie isostérique obtenu pour une faible teneur en eau fournit l'ordre de grandeur de la physisorption, c'est-à-dire l'énergie de liaison entre les molécules d'eau adsorbées et l'adsorbat. La décroissance met en évidence la diminution de l'influence de l'adsorbat aux humidités plus élevées en raison de la distance eau adsorbée/adsorbat croissante.

Selon [Poyet & Charles 2009], l'évolution de la courbe isostérique est une donnée propre au matériau et dépend de sa nature.

Pour exprimer la chaleur isostérique en fonction de la teneur en eau, Poyet propose d'utiliser un modèle de sorption pour représenter l'isotherme de sorption à la température d'étude T_2 (différente de la température de référence T_1). En particulier, dans [Poyet 2009] est utilisé le modèle GAB qui permet de relier la teneur en eau à l'humidité relative $u = f(HR)$ à une température donnée. La relation inverse du modèle GAB $HR = f^{-1}(u)$ permet ainsi d'exprimer les humidités relatives, pour une teneur en eau donnée, aux températures d'étude T_1 et T_2 :

$$\begin{aligned} A T_1, HR_1 &= f_1^{-1}(u) \\ A T_2, HR_2 &= f_2^{-1}(u) \end{aligned} \quad (6-13)$$

³⁶ Extrait de [Drouet 2010]

La substitution des expressions de HR_1 et HR_2 dans l'expression de la chaleur isostérique (6-11) permet directement d'obtenir son évolution en fonction de la teneur en eau.

Cette approche permet de représenter l'évolution de la chaleur isostérique de l'état sec à l'état saturé en marquant un maximum à faible humidité.

Drouet a étendu l'analyse en évaluant l'impact du modèle de sorption sur l'évolution de la chaleur isostérique. Elle utilise également l'approche par relation inverse de Poyet. Trois modèles sont comparés (cf. figure 6-6) :

- Le modèle de Van Genuchten (utilisé dans ce travail)
- Le modèle GAB (présenté au chapitre 3)
- Le modèle de Pickett qui est une version affinée du modèle GAB

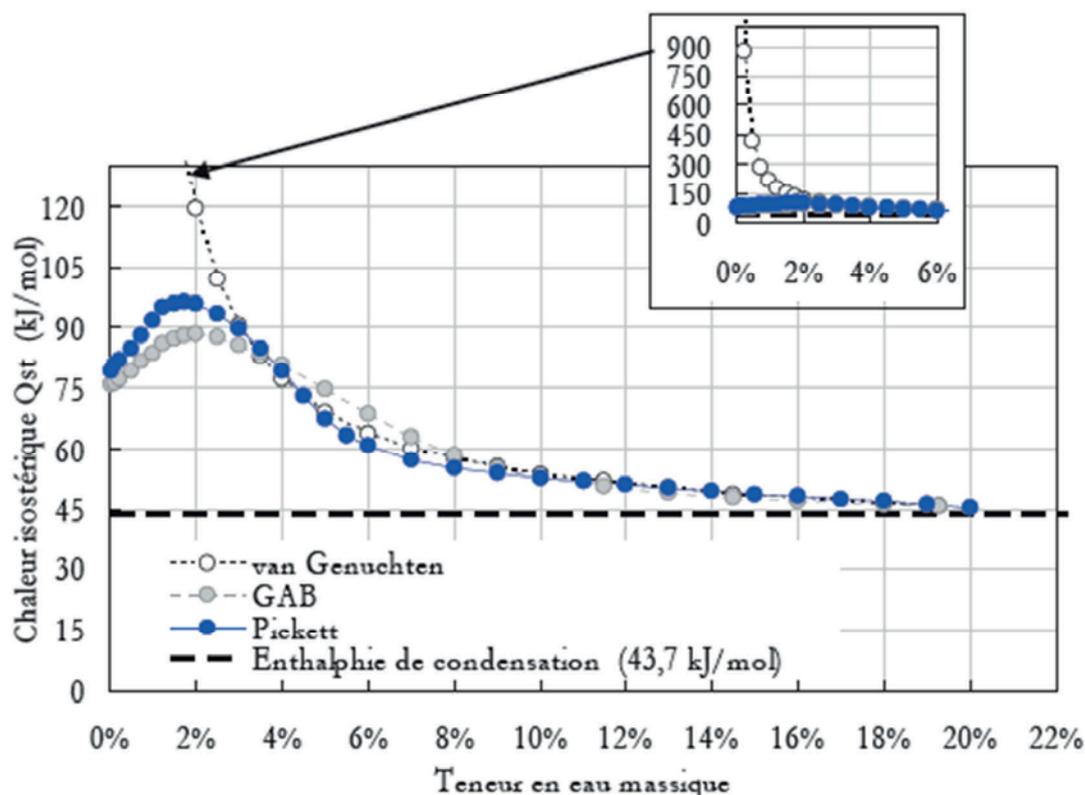


Figure 6-6 Evolution de la chaleur isostérique en fonction du modèle de représentation de l'isotherme de sorption³⁷

Dans ses travaux de thèse sur les matériaux cimentaires, il apparaît que le modèle de Van Genuchten ne permet pas de représenter le maximum de chaleur isostérique, à l'instar de l'approche de Powers et Brownyard. Elle attribue cette lacune à la mauvaise description du premier « S » aux très basses humidités relatives de la courbe de sorption par le modèle de Van Genuchten.

Il existe par ailleurs d'autres manières de modéliser la chaleur isostérique par l'utilisation de fonctions en loi puissance ou exponentielle [Powers et Brownyard 1948, Chen 2006].

³⁷ Extrait de [Drouet 2010]

La connaissance de la chaleur isostérique permet ainsi d'évaluer l'effet de la température et de prédire l'évolution d'une isotherme de sorption à une température donnée. L'intégration de la relation de Clausius-Clapeyron entre (T_1, p_{v1}) et (T_2, p_{v2}) à l'équilibre à une teneur en eau constante u nous permet en effet d'écrire :

$$\varphi(T_2, u) = \varphi(T_1, u) \frac{p_{sat}(T_1)}{p_{sat}(T_2)} e^{q_{st}(u) \frac{M_l(T_2 - T_1)}{RT_1 T_2}} \quad (6-14)$$

Ainsi, la connaissance d'une isotherme de sorption à la température T_1 nous permet de prédire l'isotherme de sorption à la température T_2 .

6.2.2. Température et transport d'humidité

En préambule à ce paragraphe, il convient de préciser à quel niveau intervient la température dans le cadre du transport d'humidité.

D'une part, l'humidité est susceptible de se déplacer par thermo diffusion sous l'effet d'un gradient de température. Il a été montré au chapitre 2 que dans le cadre de la physique du bâtiment, ce processus pouvait être négligé [Janssen 2011].

D'autre part, le transport d'humidité est susceptible d'être thermoactivé : une augmentation de température entraîne une accélération des phénomènes de transport. De nombreux travaux ont fait état de cette observation ([Hancox 1968], [Wong 2001], [Brue 2009]) dans des gammes de température élevées. Ainsi, Brue s'est intéressé aux cinétiques de perte de masse d'eau en fonction de la température pour de essais de séchage d'un béton de base (cf. figure 6-7). On peut noter que plus la température est élevée, plus la phase de stabilisation de la masse d'eau à une humidité donnée est rapide. Cette observation est d'autant plus marquée que l'humidité décroît. L'augmentation de la température favorise en effet l'évacuation de l'eau par évaporation.

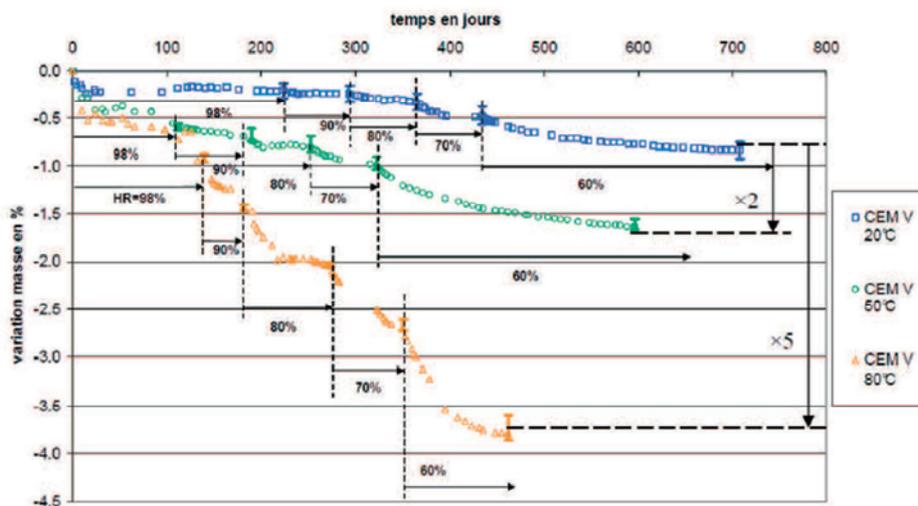


Figure 6-7 Cinétiques de désaturation d'un béton à différentes températures³⁸

³⁸ Extrait de [Brue 2009]

Pour expliquer ces résultats, Brue met en avant les effets possibles de la température sur les transferts hydriques : diminution du rayon de pore vidangé pour une même valeur d'humidité relative, diminution de la viscosité de l'eau favorisant la perméation liquide aux fortes humidités, amplification des transports en phase gazeuse engendrée par des gradients de pression plus importants et par l'activation de l'agitation thermique des molécules gazeuses.

L'autodiffusion de l'humidité provoquée par l'agitation thermique obéit à la loi d'Arrhenius. Le coefficient de diffusion D [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] prend ainsi la forme :

$$D(u) = D_0(u)e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (6-15)$$

D_0 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] est une constante au sens thermique, E_a [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$] est l'énergie d'activation de la diffusion de l'humidité dans le matériau.

Il est possible de déterminer expérimentalement cette énergie d'activation. Les données expérimentales nécessaires à cette détermination sont nombreuses :

- Au moins deux isothermes de sorption à des températures différentes
- Au moins deux coefficients de diffusion obtenus à des températures différentes

Ainsi, en modifiant l'écriture de l'équation (6-15), on obtient :

$$\ln(D(u)) = \ln(D_0(u)) - \frac{E_a}{RT} \quad (6-16)$$

A une teneur en eau donnée u , l'énergie d'activation est alors la pente de la droite $\ln(D) = f(1/RT)$.

6.3. Modélisation du comportement hydrique en température du béton de chanvre Easy R-bis

6.3.1. Comportement hydrique expérimental du béton de chanvre en température

Le paragraphe suivant est axé sur l'étude expérimentale du comportement hydrique en température du béton de chanvre Easychanvre.

Une campagne expérimentale a été menée en ce sens pour déterminer la courbe d'adsorption principale du béton de chanvre Easy R-bis à la température de 10°C. Initialement, les échantillons sont séchés sous vide dans un tube étanche dans lequel se trouve du gel de silice. Les masses des échantillons après séchage sont sensiblement identiques à celles obtenues lors des essais à 23°C (variation de masse moyenne de 0,03 %). Ainsi, cette vérification assure une comparaison légitime entre les essais de sorption à 23°C et 10°C. Le processus expérimental utilisé est en tout point similaire à celui décrit au chapitre 3. La méthode utilisée est celle du dessiccateur.

Les échantillons sont ainsi soumis à des humidités relatives croissantes à l'aide de solutions salines. Les sels utilisés pour réaliser les solutions saturées qui imposent l'humidité relative peuvent se révéler plus ou moins sensibles à la température. Le tableau 6-1 donne les valeurs d'ambiance imposée à 10°C et 23°C d'après la norme NF EN ISO 12571.

Température	Humidité relative (%)			
	Acétate de potassium	Carbonate de potassium	Nitrate de magnésium	Bromure de potassium
10°C	23	43	57	85
23°C	23	43	53	81

Tableau 6-1 Humidité relative des solutions saturées à l'équilibre en fonction de la température

La température de 10°C est assurée à l'aide d'un réfrigérateur. Cependant, l'appareil subit des fluctuations de températures de quelques degrés inhérentes à son système régulateur. Afin de s'affranchir de ces perturbations et de garder une température stable autour de 10°C, les dessiccateurs contenant les échantillons sont placés dans une boîte en styrodur® de 3 cm d'épaisseur qui, grâce à sa faible conductivité thermique, permet de conserver une température interne constante à $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (cf. figure 6-8). Les températures à l'intérieur et à l'extérieur de la boîte sont contrôlées à l'aide de thermocouples reliés à un système d'acquisition.



Figure 6-8 Dessiccateur dans la boîte en Styrodur

La figure 6-9 présente les résultats expérimentaux bruts obtenus à 10°C en adsorption principale et les compare aux résultats présentés au chapitre 3 à 23°C.

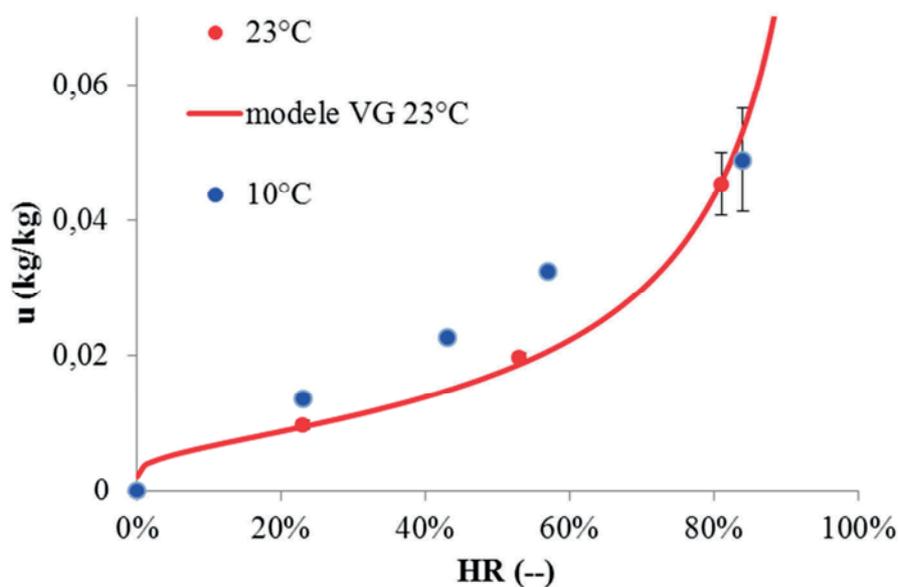


Figure 6-9 Résultats expérimentaux en adsorption principale à 10°C et 23°C

Globalement, on retrouve un comportement similaire à celui observé sur d'autres matériaux.

Aux basses et moyennes humidités, la teneur en eau à l'équilibre diminue lorsque la température augmente pour une humidité relative donnée. Aux environs de 80-85%HR, les teneurs en eau obtenues à 10°C et 23°C sont sensiblement proches.

L'absence de données expérimentales après 85%HR ne nous permet pas d'évaluer le comportement en adsorption principale du béton de chanvre Easy R-bis à 10°C aux très fortes humidités.

Dès lors la question se pose : est-il possible de reproduire numériquement ce comportement ? La section suivante a pour objectif de répondre à cette problématique.

6.3.2. Température et teneur en eau

Dans le cadre de l'application des modèles de comportement hydrique en température, on utilise l'approche de Poyet de déplacement de l'équilibre thermodynamique.

Les données expérimentales recueillies sur le béton de chanvre Easy R-bis présentées au paragraphe 6.3.1. servent de référence à cette étude.

L'isotherme de sorption établi à 23°C fait office de référence.

On note :

- $T_1 = T_{ref} = 23^\circ\text{C}$
- $T_2 = 10^\circ\text{C}$

6.3.2.1. Influence de la température sur la teneur en eau à saturation

On adopte ici une démarche simple afin d'évaluer l'impact de la température sur la teneur en eau à saturation. Dans les chapitres précédents, la masse volumique de l'eau était supposée constante à $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ce qui nous donnait une teneur en eau à saturation u_{sat} de $1,805 \text{ kg/kg}$ pour le béton de chanvre Easy R-bis. Aux pressions normales, cette masse volumique usuelle de $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ est en réalité valable à 5°C .

Il est rappelé que la teneur en eau à saturation a pour expression :

$$u_{sat} = n_o \frac{\rho_l}{\rho_0} \quad (6-17)$$

Avec n_o et ρ_0 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] respectivement la porosité ouverte et la masse volumique apparente à l'état sec.

Il a été admis précédemment que l'influence de la température sur les caractéristiques structurelles du matériau était négligeable donc porosité ouverte et masse volumique sèche restent constantes.

Par ailleurs, dans la gamme usuelle de températures considérées [0^+ , 35°C] en usage courant, la teneur en eau à saturation est susceptible de prendre des valeurs allant de $1,805 \text{ kg/kg}$ aux basses températures à $1,800 \text{ kg/kg}$ à 35°C soit une diminution de moins de $0,5\%$.

On constate donc que l'augmentation de la température qui diminue la masse volumique de l'eau conduit à une légère diminution de la teneur en eau à saturation.

Compte tenu de la gamme d'étude de température relativement restreinte, il est raisonnable d'admettre que la teneur en eau à saturation est constante, indépendante de la température à savoir $1,805 \text{ kg/kg}$ dans le cas du béton de chanvre Easy R-bis.

6.3.2.2. Application de l'approche de Poyet

Compte-tenu des résultats issus de la littérature, il est particulièrement intéressant de s'intéresser à l'approche de Poyet de déplacement de l'équilibre thermodynamique. Dans le cadre de son formalisme, la modification des caractéristiques structurelles et des propriétés thermophysiques de l'eau sous l'effet de la température sont négligées.

L'objectif premier est de déterminer l'évolution de la chaleur isostérique. Cette chaleur isostérique est évaluée à teneur en eau constante. Les valeurs de teneur en eau peuvent être choisies arbitrairement sur toute la gamme d'humidité relative [Poyet 2009]. On choisit ainsi les teneurs en eau obtenues par les essais de sorption menées à 10°C.

La figure 6-10 représente les isostères de sorption du béton de chanvre Easy R-bis pour différentes teneurs en eau. L'isotherme de sorption est obtenue à température constante, l'isostère à teneur en eau constante.

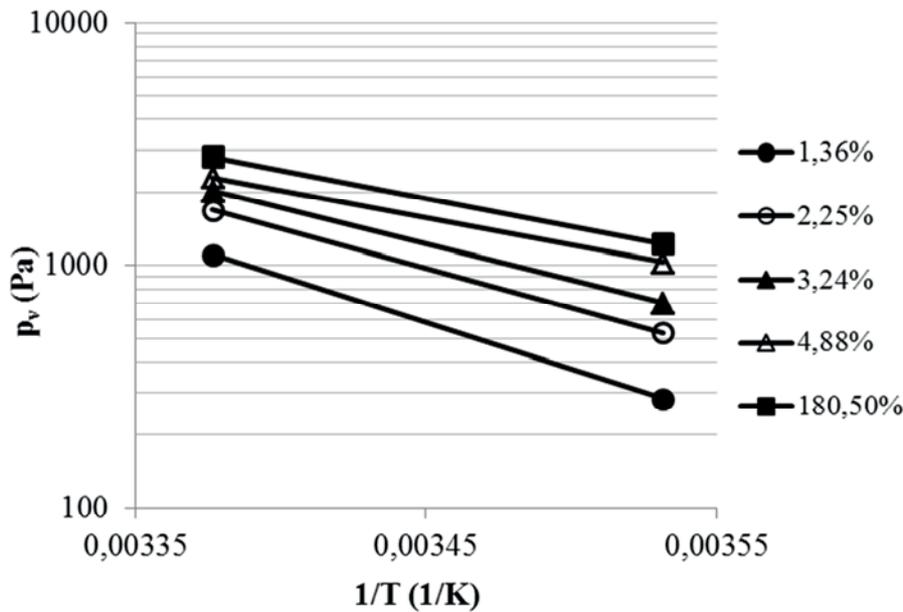


Figure 6-10 Isostères de sorption du béton de chanvre en fonction de la teneur en eau massique

Il est à noter que l'hypothèse d'indépendance à la température de la teneur en eau à saturation permet de représenter l'isostère à saturation.

La figure 6-11 représente l'énergie isostérique des points expérimentaux (pente des isostères représentées figure 6-10).

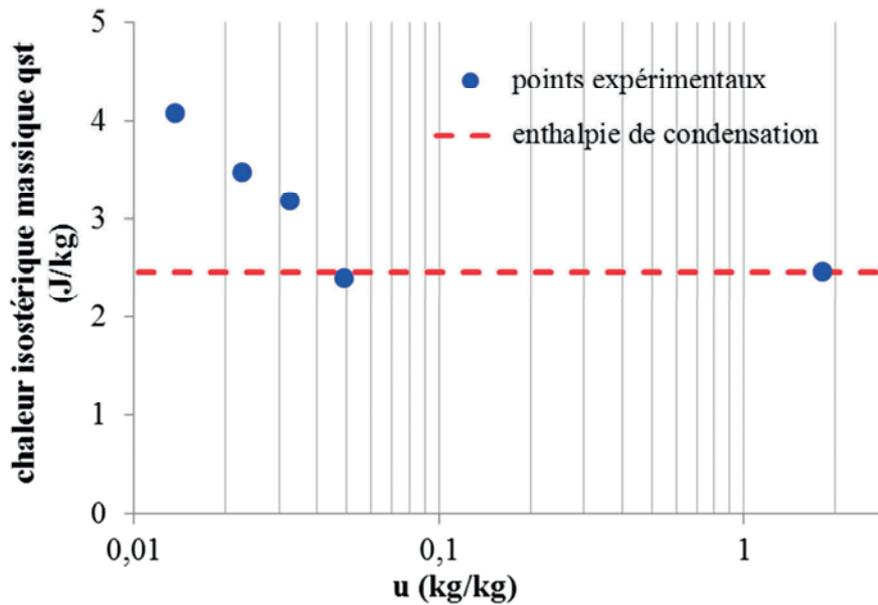


Figure 6-11 Chaleur isostérique massique : points expérimentaux

L'évolution de l'énergie isostérique est difficile à interpréter car on dispose d'un nombre trop limité de points expérimentaux. Toutefois, comme le prévoit Poyet, la chaleur isostérique décroît avec la teneur en eau. En outre, il semble bien que la chaleur isostérique tende vers l'enthalpie de condensation lorsque la teneur en eau s'élève. La particularité notable du béton de chanvre est que cette enthalpie de condensation est atteinte pour des faibles teneurs en eau (par rapport à la valeur à la valeur à saturation) de l'ordre 4 à 4,5%.

L'application de la méthodologie proposée par Poyet (cf. paragraphe 6.2.1.4.) a été envisagée dans le cas du béton de chanvre Easy R-bis. Cependant, aucun modèle n'a permis d'ajuster de manière satisfaisante l'isotherme de sorption à 10°C. Le faible nombre de points expérimentaux et l'évolution particulière de la teneur en eau à cette température qui tend vers celle à 23°C aux très fortes humidités sont autant de freins et de contraintes à l'application de cette méthode.

Il est ainsi difficile de proposer une modélisation complète de la chaleur isostérique sur toute la gamme de teneur en eau.

On utilise alors la relation proposée par Powers et Brownard (modèle PB) de forme :

$$q_{st}(u) = L_v + 10^6 \frac{a}{(b + u)^c} \quad (6-18)$$

L'application de la méthode des moindres carrés nous fournit les valeurs des coefficients a, b et c : a = 0,697 b = 0,0814 et c = 6,02.

Les résultats issus de cette modélisation sont présentés figure 6-12.

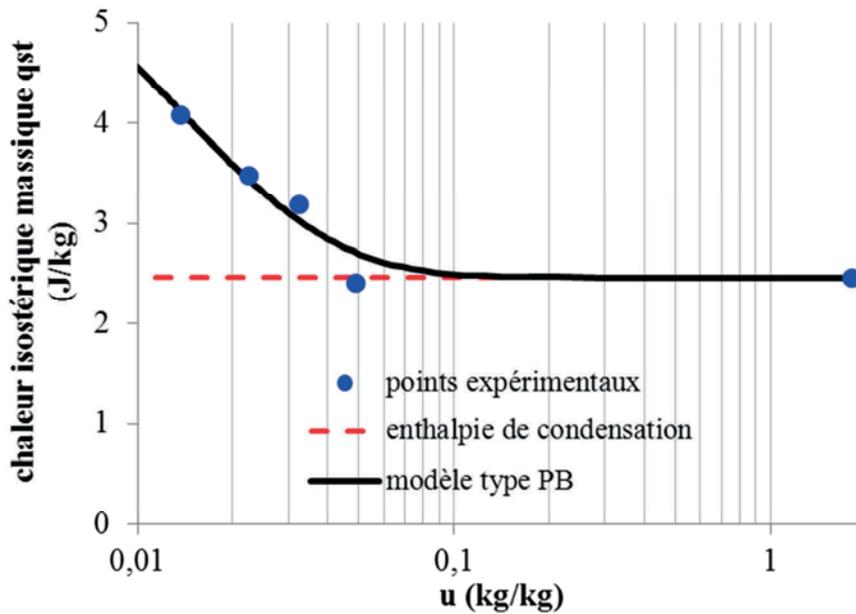


Figure 6-12 Chaleur isostérique massique : modèle PB

Le modèle est clairement loin d’être adapté à très faible teneur en eau (inférieure 0,015 kg/kg) puisque la chaleur isostérique n’atteint pas de maximum. Déjà évoqué précédemment, ce maximum de chaleur isostérique établi à faible teneur en eau correspond à l’énergie de liaison entre les molécules et la surface de l’adsorbat liées par des forces de Van Der Waals. Toutefois, le formalisme PB fournit des résultats plutôt satisfaisant dès que la teneur en eau s’élève. A défaut de meilleure approximation de la chaleur isostérique, le formalisme de Powers et Brownyard est adopté dans la construction de l’isotherme d’adsorption principale à 10°C. L’isotherme obtenue est comparée à celle établie à 23°C (cf. figure 6-13).

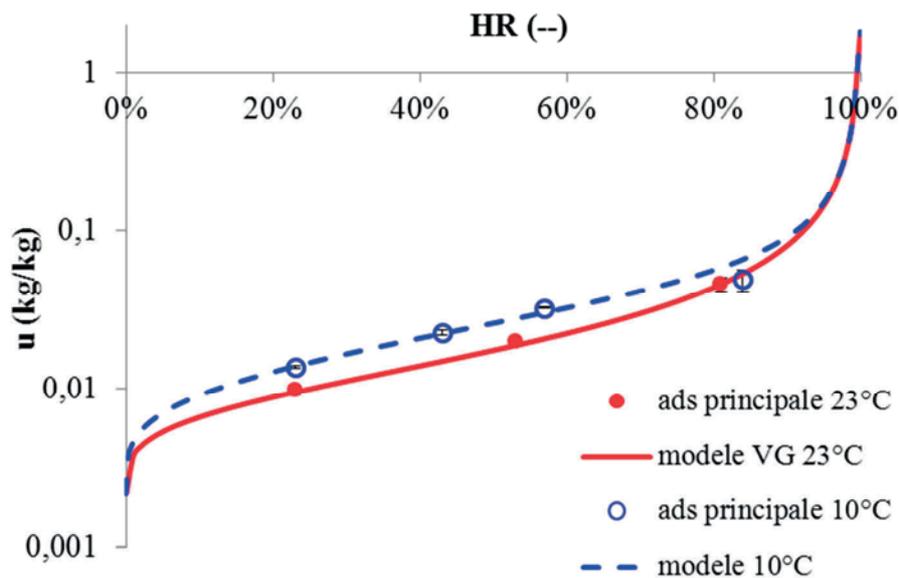


Figure 6-13 Isothermes de sorption à 10°C et 23°C : points expérimentaux et modèles

L'utilisation de l'écriture PB semble fournir des résultats à 10°C plutôt satisfaisants aux basses et moyennes humidités mais ne tend pas assez vite vers l'isotherme à 23°C lorsque l'humidité relative augmente (autour de 80-85%HR).

6.3.2.3. Prédiction des isothermes

La détermination de la chaleur isostérique permet de prédire l'évolution des isothermes d'adsorption du béton de chanvre Easy R-bis en fonction de la température. D'autre part, la désorption, réaction inverse de l'adsorption, est régie également par la chaleur isostérique. On se propose ainsi de construire les isothermes de sorption du béton de chanvre Easy R-bis à différentes températures par application de l'approche de Poyet.

La figure 6-14 représente ainsi les isothermes de sorption/désorption du béton de chanvre Easy R-bis pour des températures de 0°C, 10°C, 23°C (référence), 30°C et 35°C.

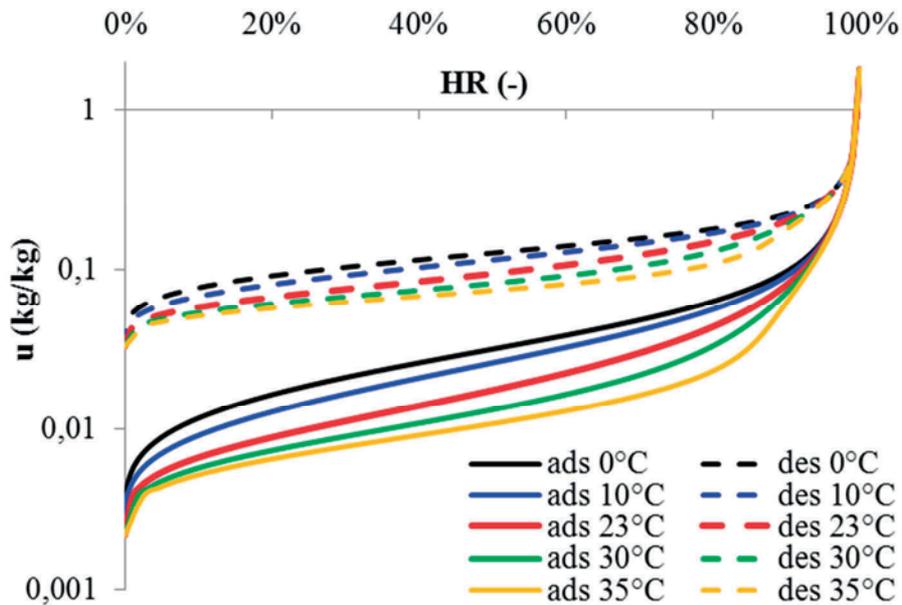


Figure 6-14 Isothermes d'adsorption/désorption du béton de chanvre Easy R-bis à différentes températures

L'augmentation de la température entraîne une diminution de la teneur en eau nettement plus importante en phase de désorption principale, qu'en phase d'adsorption principale. Une représentation non logarithmique classique centrée sur la zone hygroscopique permet de mieux s'en rendre compte (cf. figure 6-15).

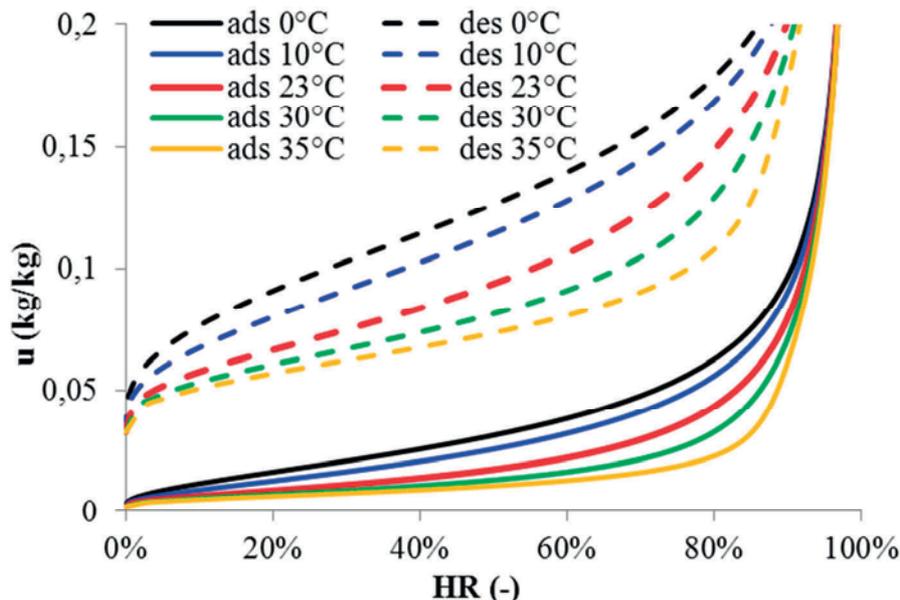


Figure 6-15 Isothermes de sorption/désorption du béton de chanvre Easy R-bis à différentes températures - représentation classique -

L'effet de la température moins marqué en adsorption qu'en désorption observé sur le béton de chanvre vient confirmer l'hypothèse d'Ishida qui stipule que l'augmentation de la température diminue l'hystérésis [Ishida 2007].

Par ailleurs, il est préconisé de ne pas recourir à la modélisation utilisée au-delà des températures usuelles (supérieures à 35°C). Une élévation importante de la température est en effet susceptible de modifier sensiblement la teneur en eau à saturation ne rendant ainsi plus valable l'hypothèse d'indépendance à la température de la teneur en eau à saturation sur laquelle repose notre modélisation.

6.3.3. Température et hystérésis

A partir des données expérimentales présentées au paragraphe 6.3.1., une branche de désorption primaire est construite. Le chemin hydrique suivi est 85-57-23%HR.

La modélisation adoptée pour représenter le comportement hydrique en température du béton de chanvre autorise l'utilisation d'un modèle d'hystérésis. Afin de modéliser le comportement hystérétique du béton de chanvre Easy R-bis en température, le modèle de Huang présenté au chapitre 5 est utilisé en lui appliquant l'hypothèse de déplacement de l'équilibre thermodynamique de Poyet.

L'approche PB est ainsi confrontée aux résultats expérimentaux menés en désorption primaire (cf. figure 6-16).

Comme à 23°C, à la température de 10°C, le phénomène d'hystérésis diminue la pente de l'isotherme ce qui a pour conséquence de diminuer la valeur de capacité hydrique (cf. figure 6-17).

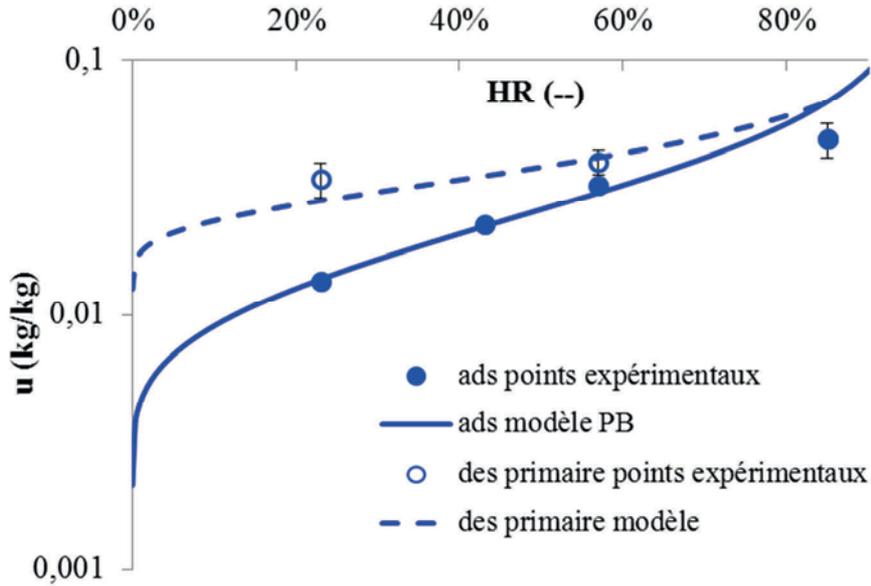


Figure 6-16 Courbe d'adsorption principale et de désorption primaire à 10°C : points expérimentaux et modèles

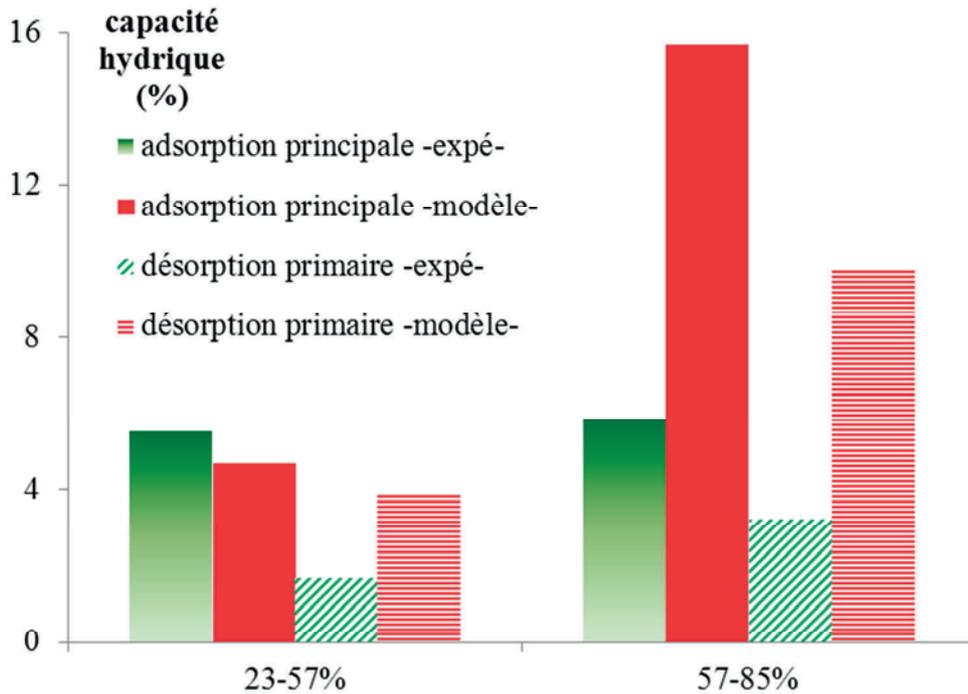


Figure 6-17 Capacités hydriques expérimentales à 10°C

En revanche, en terme de capacité hydrique, la modélisation adoptée peine à reproduire les résultats expérimentaux notamment aux humidités les plus élevées. Cette lacune est directement attribuable à l'application du modèle PB qui conduit à une surestimation de la teneur en eau à 85%HR. La simulation à l'échelle de la paroi doit nous permettre d'apprécier la réalité de son impact sur les réponses thermohydriques.

6.3.4. Température et propriétés hygrothermiques

Au paragraphe 6.2.2, il a été montré que l'étude de l'influence de la température sur le transport d'humidité était théoriquement possible. Cependant, aucune démarche expérimentale n'a été menée en ce sens. Par ailleurs, compte tenu de la gamme restreinte de températures étudiée, il est légitime de penser que la température affecte peu l'intensité du transport diffusif d'humidité. Dans le formalisme développé au chapitre 3, la sensibilité à la température des coefficients de diffusion vapeur et liquide intervient uniquement par l'intermédiaire de la perméabilité à la vapeur de l'air dont l'expression est rappelée :

$$\delta_{p,a} = 2,31 \cdot 10^{-5} \frac{M_l}{RT} \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,81} \quad (6-19)$$

Pour le béton de chanvre Easy R, l'évolution des coefficients de diffusion pour des températures de 10°C et 23°C, est représentée figure 6-18.

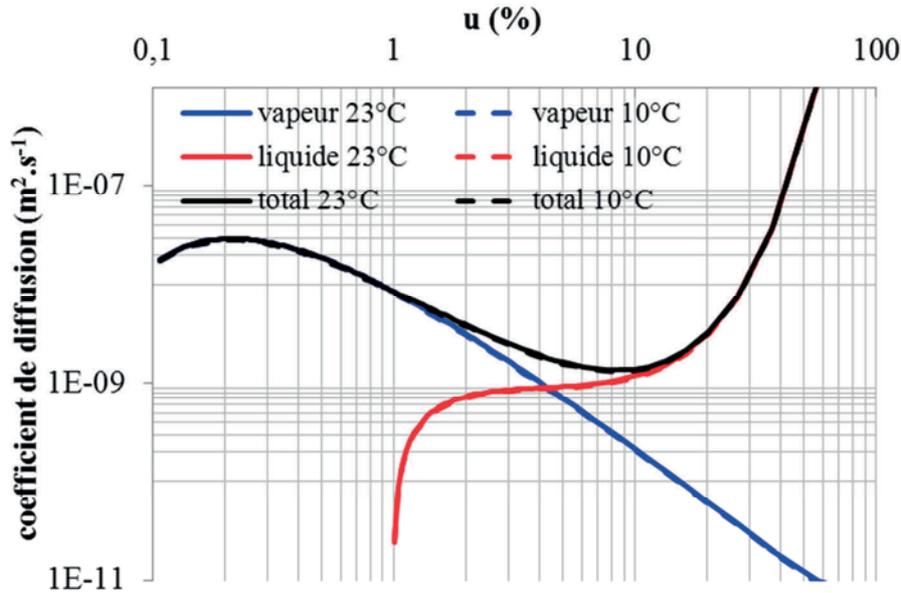


Figure 6-18 Evolution des coefficients de diffusion isotherme à 23°C et 10°C

L'influence de la température introduite par la perméabilité à la vapeur de l'air n'engendre pas de différence significative des coefficients de diffusion liquide et vapeur. Toutefois, à un très faible niveau, on constate que plus la température est élevée, plus les coefficients de diffusion sont grands. Cette observation est cohérente avec l'hypothèse de thermoactivation des phénomènes diffusifs. Cependant, une étude plus approfondie de l'influence de la température sur le transport d'humidité est à envisager pour compléter

6.3.5. Conclusion

Observations expérimentales

Au terme de l'étude réalisée, la température semble avoir un effet non négligeable sur le comportement hydrique du béton de chanvre.

- Aux faibles teneurs en eau (correspondant à des humidités relatives basses et moyennes), la diminution de température conduit à une augmentation de la teneur en eau.
- Aux teneurs en eau plus élevées (fortes humidités), il semble que la température ait une influence moindre.

Hypothèses de justification du comportement physique

On peut émettre un certain nombre d'hypothèses pour tenter d'expliquer physiquement ce comportement général.

- Aux très faibles humidités, l'évolution de la teneur en eau est essentiellement régie par l'adsorption monomoléculaire. Lorsqu'une seule couche de molécules d'eau se trouve sur la surface des pores, la chaleur isostérique est directement conditionnée par l'énergie de liaison entre ces molécules d'eau et l'adsorbat. Elle atteint par ailleurs son maximum pendant cette phase d'adsorption monomoléculaire.
- En revanche lorsque l'humidité s'élève, adsorption polymoléculaire et condensation capillaire gouvernent le stockage d'humidité. Les liaisons des molécules d'eau se font davantage entre elles qu'avec l'adsorbat.

Approche théorique

L'étude réalisée a permis de montrer que :

- l'effet de la température sur les caractéristiques structurelles et les propriétés intrinsèques de l'eau est négligeable dans nos conditions d'étude.
- de manière générale, la théorie de déplacement de l'équilibre thermodynamique de Poyet s'est révélée être une approche performante.
- le formalisme mathématique de Powers et Brownyard permet de représenter de manière satisfaisante l'évolution de la chaleur isostérique aux humidités usuelles.

Limites de la modélisation

- La modélisation utilisée ne permet pas d'évaluer la chaleur isostérique maximale $q_{st,max}$.
- A saturation, l'augmentation de température entraîne une diminution de la teneur en eau à saturation. Or, dans le cadre de cette modélisation et de cette étude, la teneur en eau à saturation est choisie constante. Elle se restreint ainsi à un domaine de validité en température [0,35°C].
- La capacité hydrique de stockage théorique semble surestimée.

Perspectives et pistes d'amélioration

Une étude expérimentale plus complète est à envisager pour caractériser l'effet de la température sur les différents paramètres hygrothermiques :

- compléter les résultats expérimentaux en adsorption principale en affinant le processus aux très fortes humidités (>80%HR) et aux très faibles humidités (<23%HR) afin de déterminer avec précision la chaleur isostérique maximale.
- croiser les résultats sur la chaleur isostérique avec des essais calorimétriques.
- rechercher des isothermes de sorption à d'autres températures.
- mesurer l'impact de la température sur la teneur en eau à saturation.

Par ailleurs, il serait ainsi particulièrement intéressant d'effectuer des essais expérimentaux sur la détermination des coefficients de diffusion d'humidité à différentes températures.

Ce qu'il faut retenir

- L'augmentation de la température entraîne une diminution de la teneur en eau à une humidité relative donnée.
- L'augmentation de la température réduit l'hystérésis.

6.4. Application à la paroi

6.4.1. Isothermes de sorption et température du béton de chanvre Easy P

Selon [Poyet & Charles 2009], la chaleur isostérique maximale $q_{st,max}$ et l'évolution de la chaleur isostérique sont des caractéristiques propres au matériau. Bien que la chaleur isostérique maximale n'ait été identifiée clairement pour le béton de chanvre Easy R-bis au paragraphe précédent, il est légitime de penser qu'elle est la même pour le béton de chanvre Easy P de même composition. De même, l'hypothèse de Poyet et Charles nous permet de supposer que l'évolution des chaleurs isostériques des bétons de chanvre Easy R et Easy P est relativement similaire. La figure 6-19 représente schématiquement l'évolution probable de ces dernières.

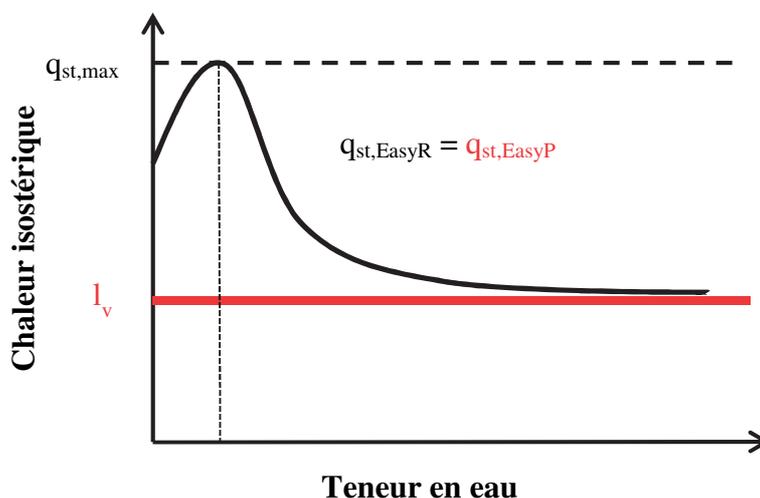


Figure 6-19 Chaleur isostérique du béton de chanvre

L'évolution de la chaleur isostérique est donc considérée indépendante de la masse volumique.

La figure 6-20 montre ainsi l'influence de la température sur les isothermes d'adsorption/désorption du béton de chanvre Easy P sous ces hypothèses.

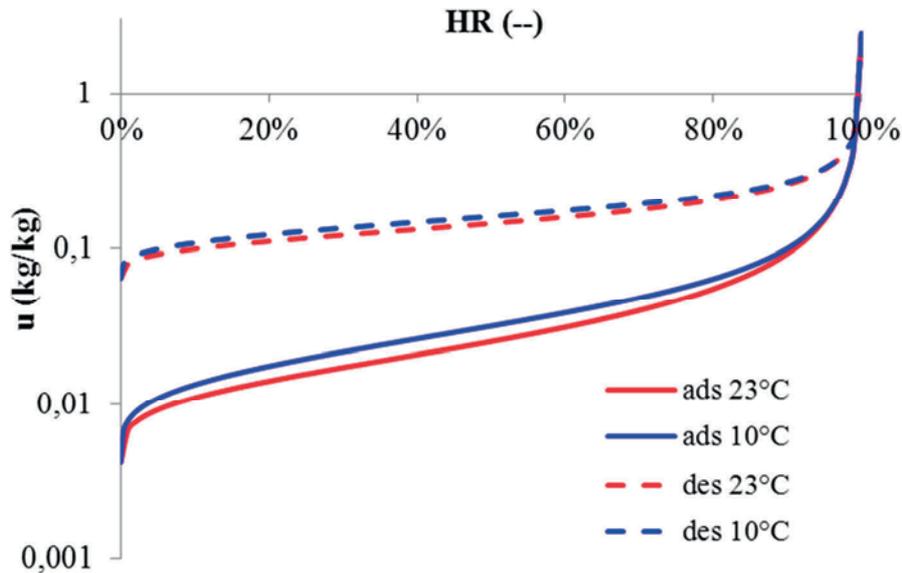


Figure 6-20 Isothermes de sorption à 10°C et 23° du béton de chanvre Easy P

La construction de ces courbes demeure fondamentalement prédictive et nécessiterait une confrontation expérimentale afin de s'assurer de leur validité.

6.4.2. Comportement hygrothermique de la paroi en conditions non isothermes

6.4.2.1. Conditions climatiques imposées

Une séquence d'étude non isotherme avec gradient d'humidité est choisie. La durée de la séquence est de 13 jours. Au temps $t=0$, la consigne pour l'humidité relative de la chambre extérieure est portée à 75%HR. Durant la période d'essai, l'humidité relative varie entre 40% et 75%HR. La température intérieure est fixée à 23°C alors que la consigne de la température extérieure est de 15°C.

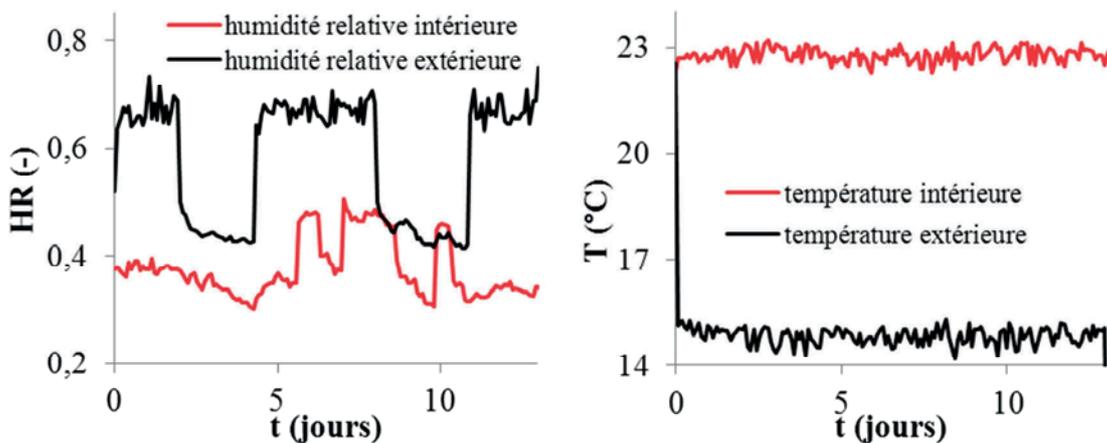


Figure 6-21 Humidités relatives (à gauche) et températures (à droite) intérieure et extérieure

L'intérêt de cette séquence d'étude est de permettre l'analyse du comportement du béton de chanvre successivement en phase d'adsorption et en phase de désorption alors que la paroi est simultanément soumise à un gradient de température.

6.4.2.2. Analyse des résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux recueillis à travers la paroi sont présentés figure 6-22 en terme de distributions d'humidité relative et figure 6-23 en terme de distributions de température.

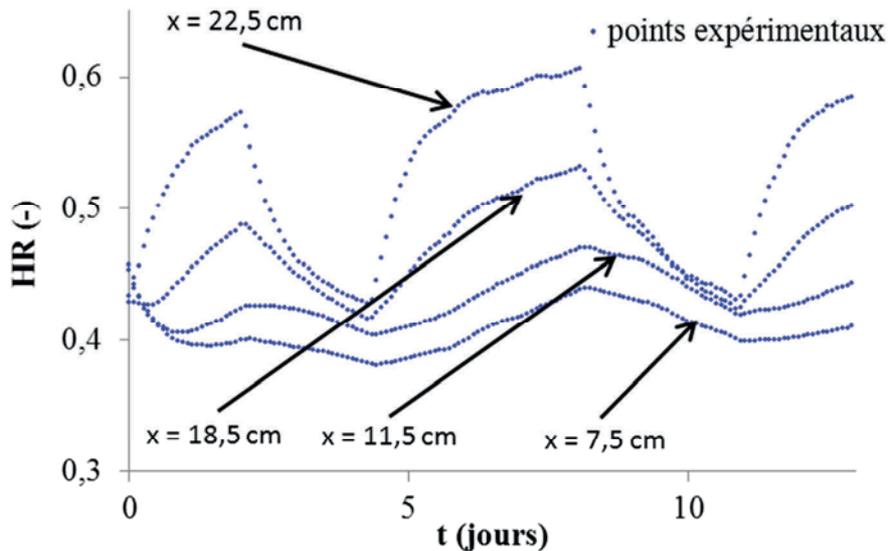


Figure 6-22 Distributions expérimentales d'humidité relative

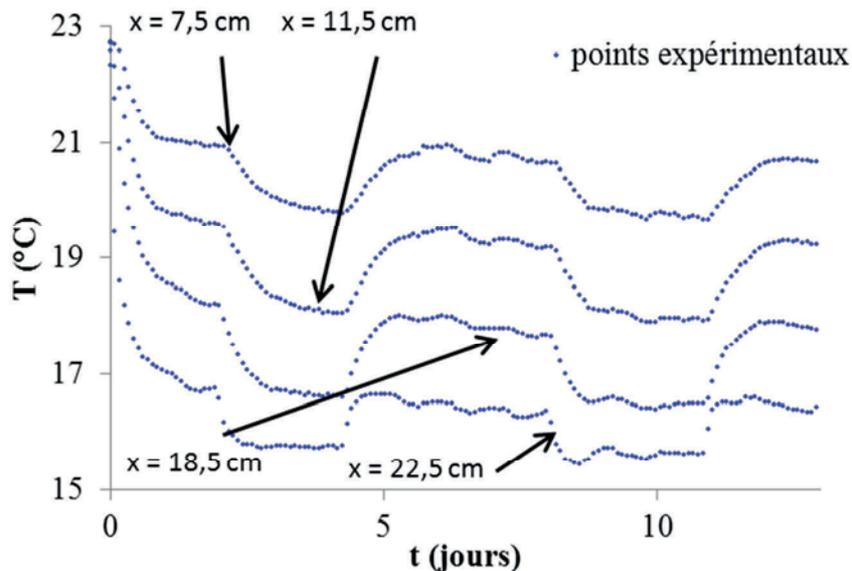


Figure 6-23 Distributions expérimentales de température

Sous ces conditions, la distribution d'humidité relative semble gouvernée par l'humidité relative extérieure et le gradient qu'elle crée avec celle de l'ambiance intérieure. Par ailleurs,

la température apparaît sensible aux variations d'humidité relative. En phase de désorption, la diminution de l'humidité relative entraîne une diminution de la température.

Dans ces conditions, quels sont les moteurs des transferts de chaleur et d'humidité ?

De manière analogue au chapitre 4, afin de mieux comprendre ce qui gouverne les transports d'humidité et de chaleur sous ces conditions climatiques, la figure 6-24 présente les différents gradients qui sont imposés à la paroi.

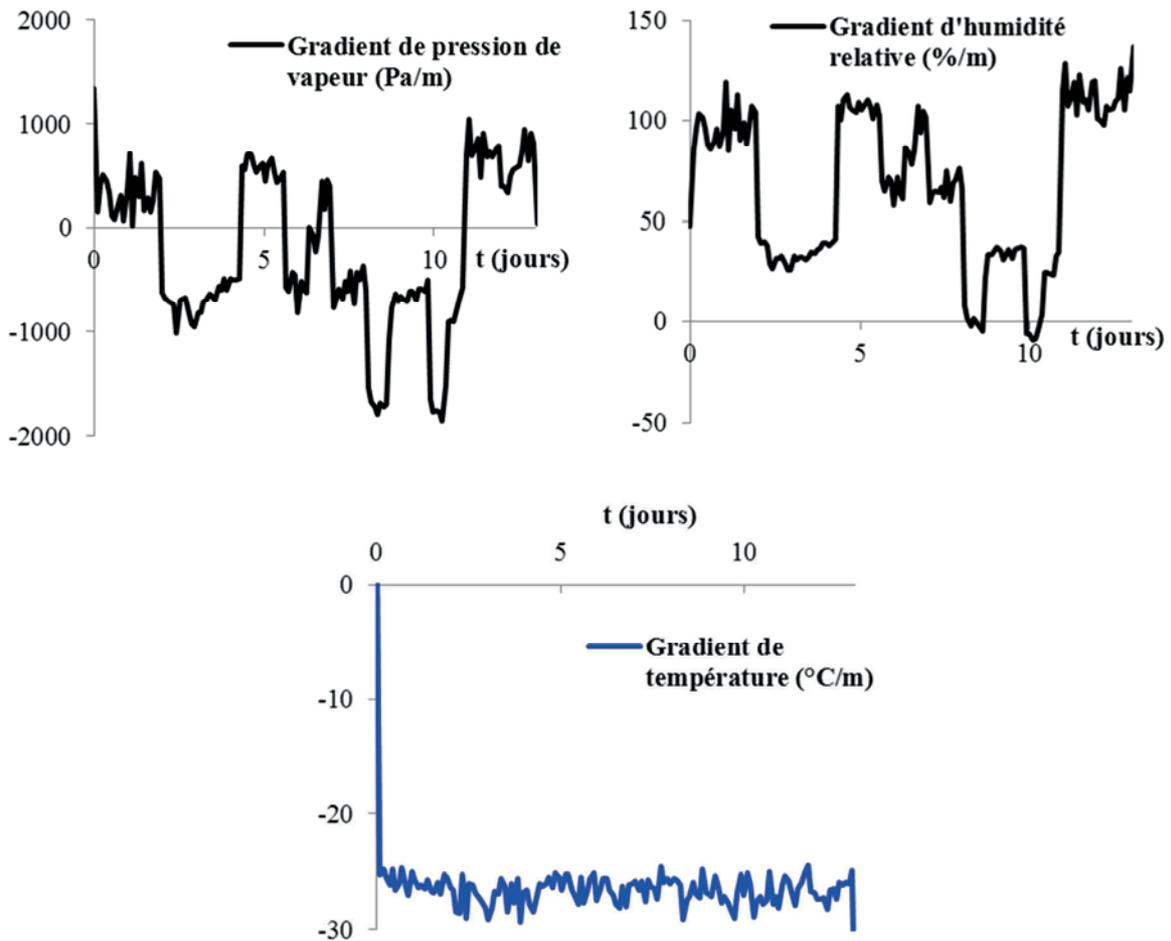


Figure 6-24 Gradients de transport de masse et de chaleur

Le gradient de pression de vapeur est majoritairement négatif et relativement faible. En conséquence, le transport de vapeur a tendance à s'opposer au gradient d'humidité. Il n'est donc pas responsable de l'évolution de l'humidité au sein de la paroi. A l'inverse, le gradient d'humidité relative très majoritairement positif est sous ces conditions le moteur du transport d'humidité et explique l'évolution de l'humidité relative au sein de la paroi. Par ailleurs, l'humidité relative n'atteignant pas de valeurs très hautes, il est a priori raisonnable de penser que la condensation capillaire participe peu au transport. On en conclut donc que la diffusion liquide surfacique générée par les gradients de teneurs en eau est le moteur principal de ce transport. En ce sens, le comportement en température de la paroi décrit ici est différent de celui décrit en conditions isothermes.

En outre, le sens du gradient de température nous permet de déduire que le transport de chaleur est essentiellement gouverné par la conduction thermique. Par ailleurs, les fluctuations de température observées au sein de la paroi peuvent s'expliquer par les phénomènes d'évapo-condensation compte tenu de l'évolution du gradient de pression de vapeur.

6.4.3. Simulation et analyse du comportement hygrothermique de la paroi

6.4.3.1. Cadre de la simulation

Les températures et humidités d'ambiance sont admises uniformes dans leurs chambres respectives.

Les propriétés hygrothermiques de référence utilisées pour alimenter le modèle de transferts sont celles du béton de chanvre Easy P présentées au chapitre 3. L'influence de la température sur les caractéristiques physiques et thermiques du béton de chanvre Easy P à l'état sec est négligée.

Le phénomène d'hystérésis est pris en compte à l'aide du modèle de Huang présenté au chapitre 5.

En outre, la teneur en eau initiale est distribuée de la même manière qu'au chapitre 5 à savoir par un gradient de teneur en eau convexe de forme :

$$HR_f = HR_{max} + (HR_{init} - HR_{max}) \left(\frac{x}{e}\right)^{0,5} \quad (6-20)$$

avec $HR_{max} = 75\%HR$.

Les conditions initiales choisies sont les suivantes :

- Température : 23°C
- Humidité relative : 44%

6.4.3.2. Résultats de la simulation sur la paroi

6.4.3.2.1. Influence de la température

Il a été montré au chapitre 4 que, si les corrélations retenues pour décrire les échanges surfaciques à la fois massique et thermique étaient satisfaisantes en conditions isothermes, il est difficile de présager qu'il en est de même en conditions non isothermes. Dans un premier temps, afin de s'affranchir de cette incertitude et d'analyser indépendamment l'effet de la température sur les réponses numériques, le choix de travailler en conditions de Dirichlet est privilégié.

On se propose ici d'étudier l'influence de la teneur en eau, avec et sans prise en compte de l'effet de la température, sur les distributions d'humidité relative et de température.

Les résultats issus de la simulation numérique sont présentés figure 6-25 et 6-26.

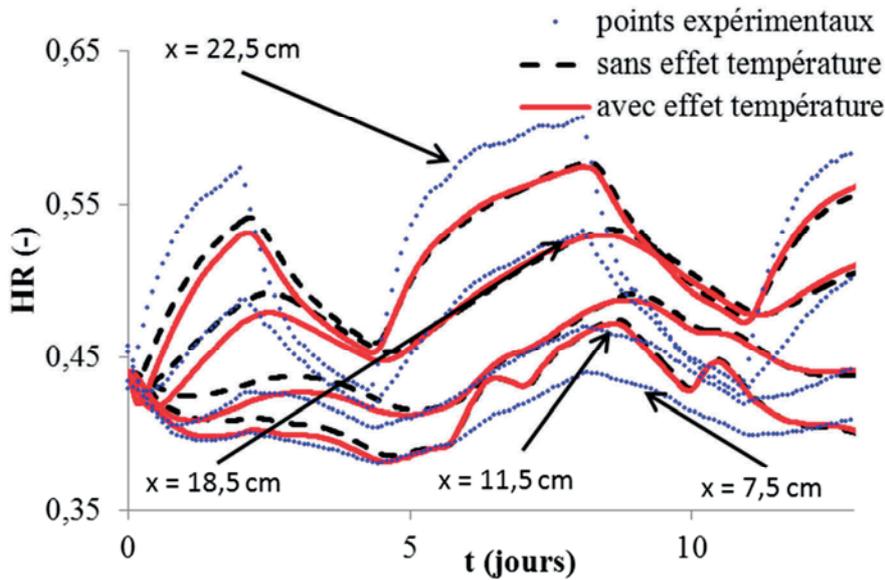


Figure 6-25 Distributions d'humidité relative - influence de la température -

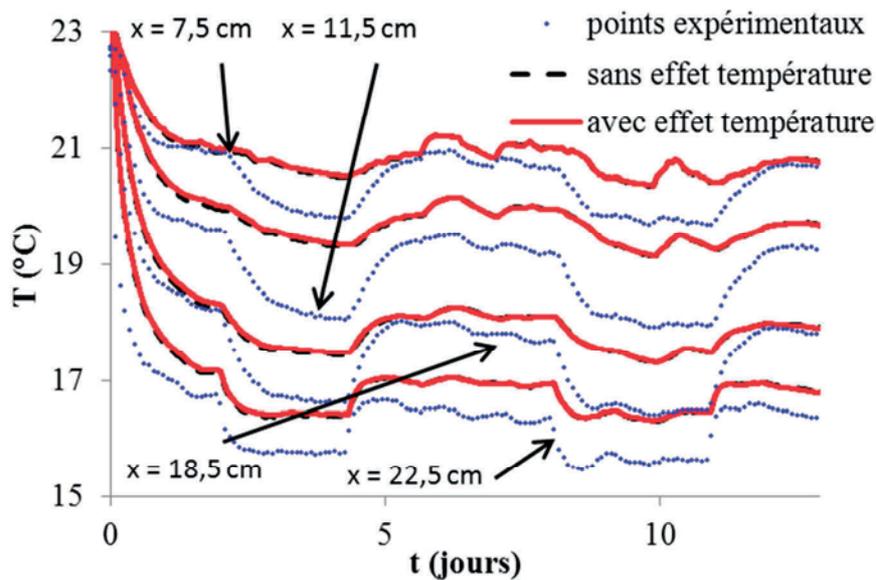


Figure 6-26 Distributions de température - influence de la température -

Tout d'abord, on peut observer que seule la prise en compte de l'effet de la température sur la teneur en eau permet de reproduire la cinétique de distribution d'humidité lorsque la température diminue fortement en début de séquence. Cependant, la modélisation adoptée est insuffisante pour traduire les variations importantes d'humidité dans la paroi proche de la surface extérieure. Proches de la surface intérieure, les distributions d'humidité semblent néanmoins tout à fait acceptables. Ces résultats laissent penser que la capacité hydrique aux humidités voisines de 60%HR n'est pas évaluée de manière totalement satisfaisante ce qui vient corroborer les observations du paragraphe 6.3.3. Par ailleurs, il est à noter que les distributions de température au sein de la paroi sont plutôt bien reproduites même si, une fois le régime établi atteint en température, le niveau de température est légèrement surestimé.

6.4.3.2.2. Analyse des conditions aux limites

L'étude précédente a été menée en utilisant les conditions de Dirichlet. Cependant, cette approche n'offre qu'une vision limitée des échanges surfaciques. Le recours aux conditions de Neumann qui traduisent une égalité entre flux entrant et flux surfacique est physiquement bien plus pertinent. Cependant cette modélisation est tributaire des coefficients d'échanges surfaciques considérés.

Afin de bien analyser les résultats obtenus, il convient au préalable de rappeler que les coefficients d'échange massique sont déduits des coefficients d'échange thermique à l'aide de la relation de Lewis (cf. chapitre 2).

Les coefficients d'échange thermique et les coefficients d'échange massique relevés dans le cadre de la simulation sont présentés figure 6-27.

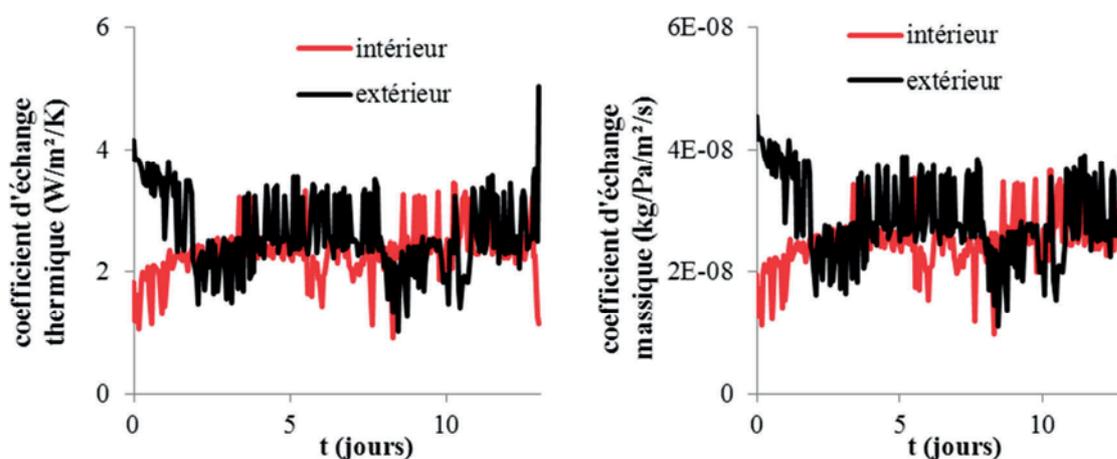


Figure 6-27 Evolution des coefficients d'échange thermique et massique

Avec des valeurs moyennes autour de $3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, les coefficients d'échange thermique intérieur et extérieur sont représentatifs du phénomène de convection naturelle. Cependant, les systèmes frigorifiques et hygrométriques utilisés pour imposer les conditions d'ambiance extérieure participent probablement aux échanges de surface extérieure en convection forcée lorsque ces conditions sont particulièrement contraignantes (ce qui est le cas dans la séquence étudiée). Afin de justifier cette hypothèse, au coefficient de convection naturelle extérieur est ajouté un coefficient additif qui prend en compte ce phénomène. Deux valeurs sont étudiées : $h_{\text{conv,nat}} + 10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ et $h_{\text{conv,nat}} + 20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Les résultats obtenus en termes de distribution d'humidité relative et de température sont présentés figure 6-28 et 6-29.

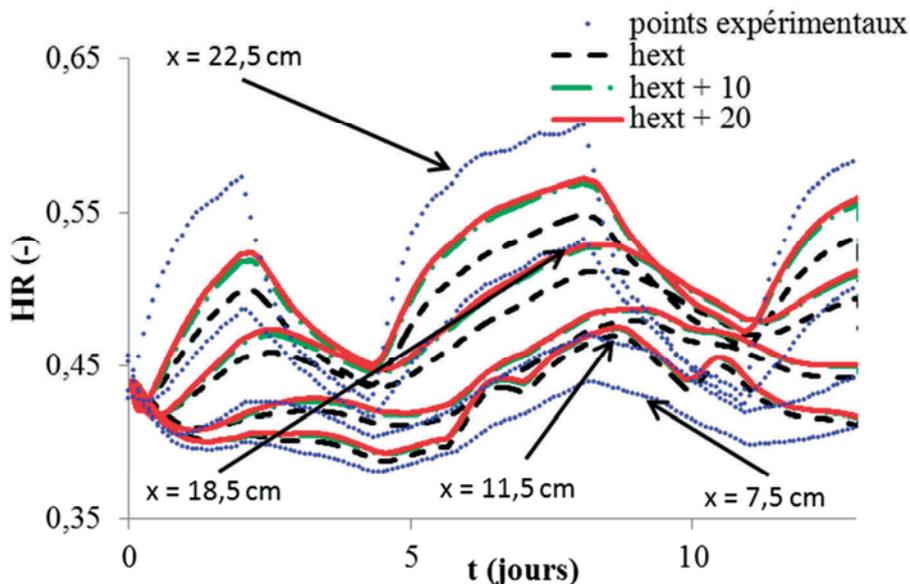


Figure 6-28 Distributions d'humidité relative - influence coefficient d'échange thermique extérieur -

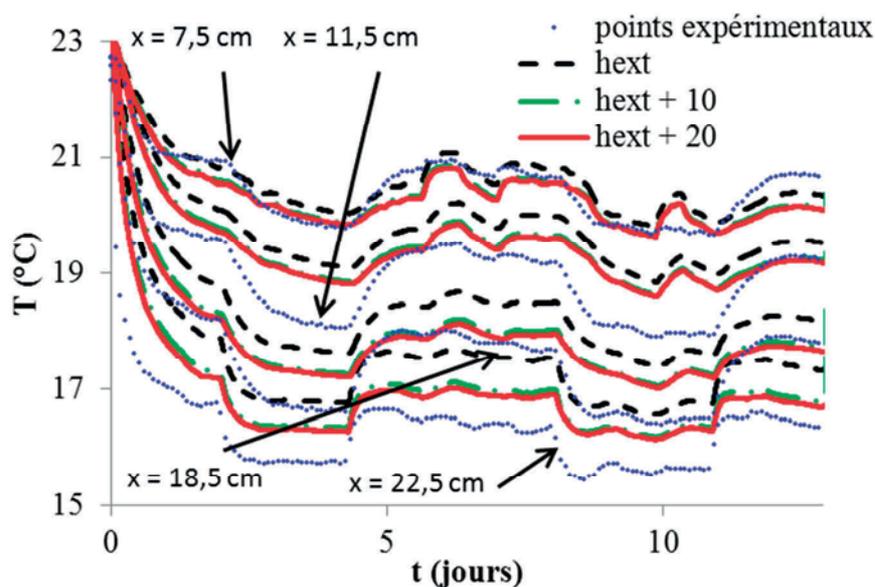


Figure 6-29 Distributions de température - influence coefficient d'échange thermique extérieur -

La prise en compte d'un coefficient d'échange additif permet de mieux représenter les distributions d'humidité et de température à travers la paroi. Il est donc possible que les systèmes régulateurs jouent un rôle dans les échanges de surface extérieurs. Ceci dit, à partir d'une certaine valeur, leur influence se réduit sensiblement. En tout état de cause, une meilleure identification des échanges convectifs de surface au sein des chambres climatiques est à envisager.

Il est également à noter que les fluctuations importantes d'humidité relative intérieures observées lors de la deuxième semaine de test ne se retrouvent pas de manière attendue dans la réponse expérimentale de la paroi. Les résultats numériques qui prennent en compte ces

fluctuations ont ainsi tendance à surestimer, par rapport aux résultats expérimentaux, la réponse de la paroi. Il convient donc de rester prudent à la fois sur les réponses numériques et sur les réponses expérimentales durant cette seconde semaine d'essai.

6.4.4. Etude d'autres séquences non isothermes

6.4.4.1. Séquence non isotherme n°2

6.4.4.1.1. Conditions de l'étude

Dans cette séquence, le mur est initialement stabilisé à 40%HR et 23°C. La durée de l'expérience est d'une dizaine de jours. Au temps $t = 0$, la consigne de l'humidité extérieure est portée à 80%HR. Les aléas liés au système de régulation de cette enceinte conduisent à des variations importantes de l'humidité relative entre 60% et 80%HR et de la température entre 5°C et 23°C. Les températures des chambres et les humidités relatives mesurées lors du test sont représentées figure 6-30.

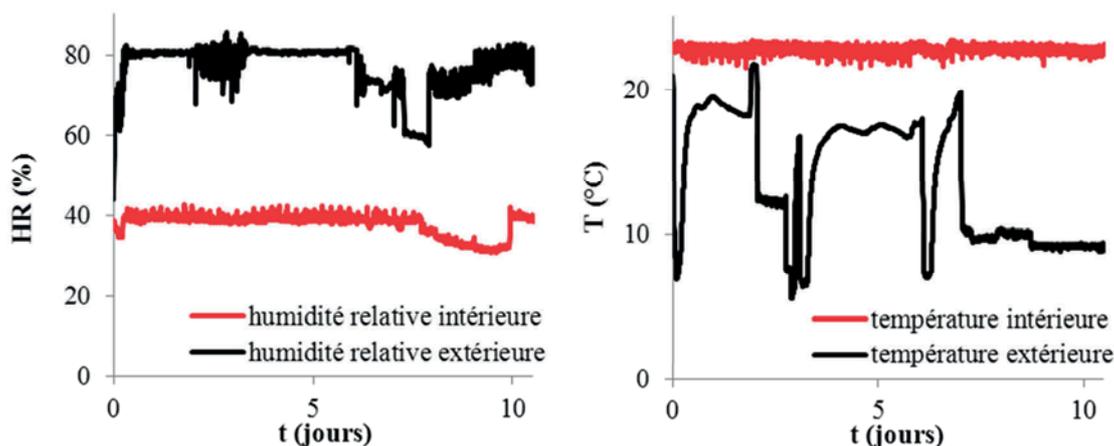


Figure 6-30 Humidités relatives (à gauche) et températures (à droite) intérieure et extérieure

A l'instar de l'étude précédente, au coefficient d'échange thermique de convection naturelle extérieur est ajouté un coefficient de $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ prenant en compte les échanges de convection forcée.

Les conditions initiales choisies sont les suivantes :

- Température : 23°C
- Humidité relative : 41%

6.4.4.1.2. Résultats et analyse

Les résultats issus de la modélisation adoptée sont présentés figures 6-31 et 6-32 respectivement pour les distributions d'humidité relative et de température. Pour plus de lisibilité, seules les résultats aux positions $x = 22,5 \text{ cm}$ et $x = 7,5 \text{ cm}$ sont représentées.

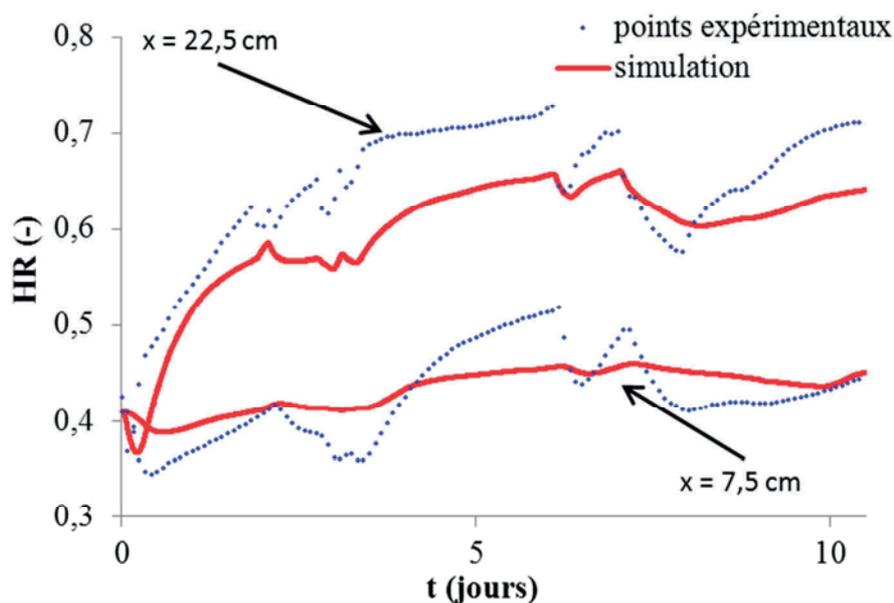


Figure 6-31 Distributions d'humidité relative - Cas non isotherme n°2 -

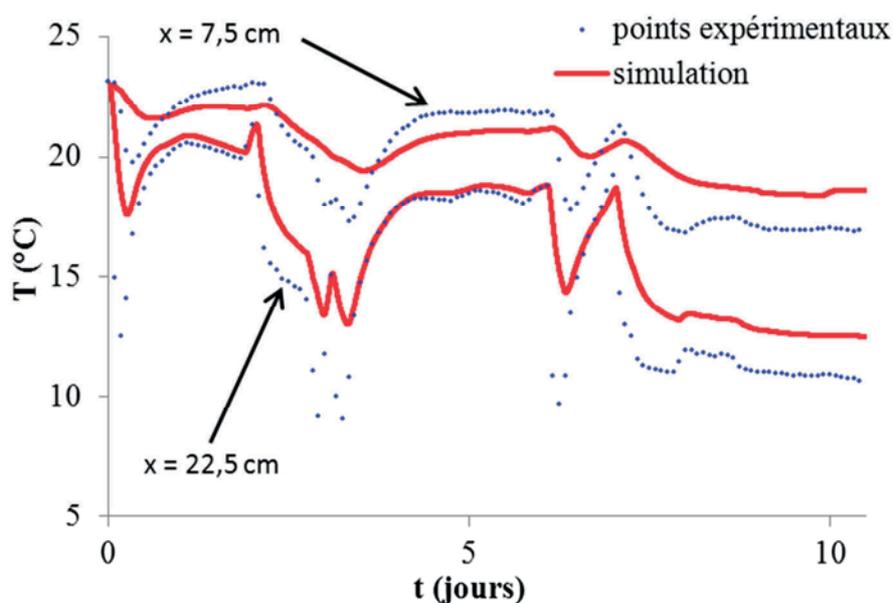


Figure 6-32 Distributions de température - Cas non isotherme n°2 -

L'observation des réponses numériques vient corroborer celle effectuée pour la première séquence d'étude. La modélisation complète réalisée permet d'obtenir une réponse numérique en température et humidité relative globalement satisfaisante malgré la surestimation de la capacité hydrique à température réduite.

6.4.4.2. Séquence non isotherme n°3

6.4.4.2.1. Conditions de l'étude

Dans cette séquence, le mur est initialement stabilisé à 40%HR et 23°C. La durée de l'expérience est d'une dizaine de jours. Au temps $t=0$, la consigne de l'humidité extérieure est

portée à 50%HR. Les aléas liés au système de régulation de cette enceinte conduisent à des variations de l'humidité relative entre 30% et 55%HR. La consigne de la température extérieure est fixée à 30°C. Les températures des chambres et les humidités relatives mesurées lors du test sont représentées figure 6-33.

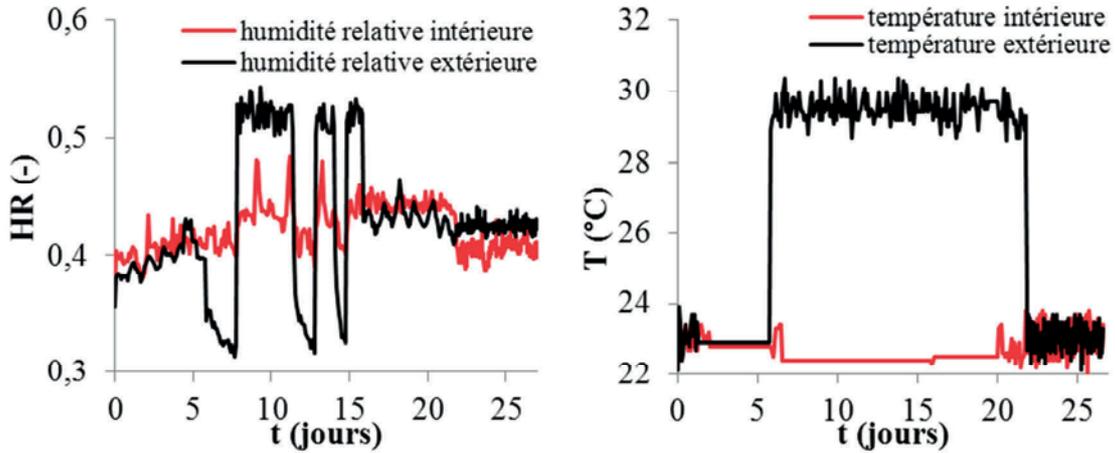


Figure 6-33 Humidités relatives (à gauche) et températures (à droite) intérieure et extérieure

Les conditions initiales choisies sont les suivantes :

- Température : 23°C
- Humidité relative : 37,5%

Dans ce cas, l'augmentation de la température ambiante de la chambre extérieure est assurée par des convecteurs qui ne créent pas les débits d'air que génère le système frigorifique. En conséquence, les échanges de surface sont supposés être uniquement dus à la convection naturelle et aucun coefficient d'échange de convection forcée n'est pris en compte.

6.4.4.2. Résultats et analyse

Les résultats issus de la modélisation adoptée sont présentés figures 6-34 et 6-35 respectivement pour les distributions d'humidité relative et de température.

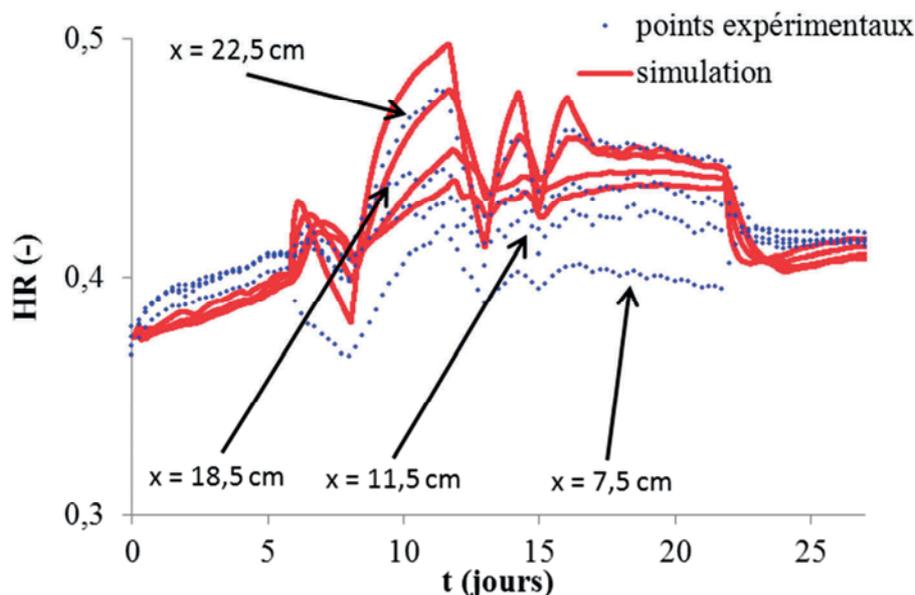


Figure 6-34 Distributions d'humidité relative - Cas non isotherme n°3 -

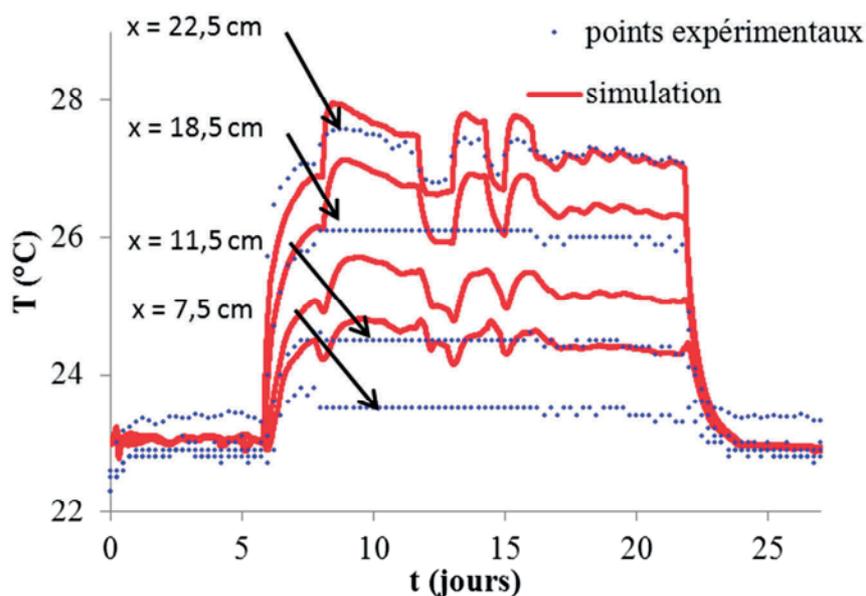


Figure 6-35 Distributions de température - Cas non isotherme n°3 -

Il est tout d'abord à noter une défaillance des relevés des thermocouples sur une période comprise entre 7 et 16 jours aux positions $x = 7,5$ cm, $x = 11,5$ cm et $x = 18,5$ cm. L'analyse des distributions de température en est ainsi rendue délicate. Toutefois, proches de la surface extérieure, les réponses en température semblent tout à fait pertinentes alors qu'il apparaît que proche de la surface intérieure elles sont légèrement surestimées.

Les distributions d'humidité relative sont par ailleurs plutôt bien reproduites bien que le gradient imposé à la paroi soit limité.

6.5. Conclusion

Le comportement expérimental du béton de chanvre en température est caractéristique des matériaux poreux. A ce titre, une diminution de la température entraîne une augmentation de la teneur en eau à une humidité relative donnée. De plus, la diminution de la température augmente l'hystérésis. L'hypothèse de déplacement de l'équilibre thermodynamique basée sur la relation de Clausius-Clapeyron permet de reproduire et de prédire l'évolution de la teneur en eau en fonction de la température. L'approche utilisée demande cependant à être confrontée et complétée par une étude expérimentale plus approfondie afin d'obtenir une évaluation plus précise de la chaleur isostérique.

La surestimation de la capacité hydrique de stockage modélisée à basse température est probablement le facteur qui explique les différences observées entre résultats numériques et expérimentaux à l'échelle de la paroi et confirme la nécessité d'approfondir la caractérisation expérimentale du comportement hydrique du béton de chanvre en température.

La modélisation complète réalisée jusqu'ici (modélisation des propriétés hygrothermiques, prise en compte de l'hystérésis, modélisation du comportement hygrothermique en température, prise en compte de l'influence de l'histoire thermohydrrique) permet toutefois d'évaluer de manière assez satisfaisante la réponse d'une paroi en béton de chanvre à des sollicitations climatiques réalistes et ainsi d'envisager la simulation du comportement hygrothermique d'une paroi en utilisation réelle.

7

Application en configuration réelle

En configuration pratique d'utilisation, une couche d'enduit est apposée sur les deux faces des parois en béton de chanvre. L'intérêt de ces couches ajoutées est de protéger le béton de chanvre des agressions extérieures et d'assurer un fini aux surfaces.

Comment ces couches d'enduit peuvent influencer la réponse hygrothermique de la paroi en béton de chanvre ?

SOMMAIRE

<u>7.1.</u>	<u>Introduction</u>	305
<u>7.2.</u>	<u>Application une paroi enduite</u>	306
7.2.1.	Propriétés des enduits étudiés	306
7.2.2.	Simulation numérique et analyse des résultats.....	310
7.2.2.1.	Cadre de la simulation.....	310
7.2.2.2.	Influence du type d'enduit.....	311
7.2.2.3.	Influence de l'épaisseur de l'enduit.....	316
7.2.2.4.	Bilan	319
<u>7.3.</u>	<u>Simulation en situation réelle</u>	321
7.3.1.	Configuration d'étude	321
7.3.2.	Conditions climatiques	321
7.3.3.	Résultats de la simulation.....	324
7.3.3.1.	Analyse des résultats à l'échelle de l'année	324
7.3.3.2.	Analyse des résultats sur trois années	328
7.3.3.3.	Intérêt de l'enduit	329
<u>7.4.</u>	<u>Comparaison de différentes solutions constructives</u>	331
7.4.1.	Présentation des solutions constructives étudiées	331
7.4.2.	Résultats de la simulation.....	333
7.4.2.1.	Distributions d'humidité relative et de température annuelles.....	333
7.4.2.2.	Comparaison des paramètres de surface intérieure	336
7.4.2.3.	Discussion sur la notion de confort d'hiver / confort d'été.....	338
7.4.3.	Bilan	339
<u>7.5.</u>	<u>Conclusion</u>	340

7.1. Introduction

Le béton de chanvre, réalisé à base de chènevotte, est comme tout matériau de construction de composition organique enclin à la formation de moisissures. La conséquence première de ce phénomène est d'ordre sanitaire (allergies, toux, irritations...).

Bien qu'aucune étude précise n'ait été réalisée, l'expérience acquise de l'étude expérimentale réalisée sur les bétons de chanvre Easy R et Easy P nous laisse penser que la formation de moisissures survient lorsque l'humidité relative atteint des valeurs de l'ordre de 90-95%HR en adsorption principale. Que ce soit pour le béton de chanvre Easy P ou Easy R, ces valeurs d'humidité relative correspondent à des teneurs en eau massique de l'ordre de 10%.

Outre l'aspect esthétique, l'enduit possède donc également une utilité pratique de protection hydrique de la partie courante en béton de chanvre.

A la campagne expérimentale menée sur la paroi non enduite dont les résultats ont été exploités au cours des chapitres précédents, a succédé une campagne expérimentale analogue réalisée après avoir apposé une couche d'enduit sur les surfaces externes de la paroi. Cependant, l'exploitation des résultats issus de cette étude expérimentale se heurte à plusieurs contraintes qui ne permettent pas à ce stade de confronter les résultats issus du modèle numérique aux résultats expérimentaux. Tout d'abord, le principal frein à cette étude est la méconnaissance des propriétés hygrothermiques de l'enduit utilisé qui n'a pas été caractérisé expérimentalement. Par ailleurs, de nombreux soucis techniques ont sensiblement réduit le nombre de séquences d'étude exploitables.

Compte tenu de ces difficultés, ce chapitre s'oriente vers une approche purement numérique dont l'objectif est d'analyser l'influence d'une couche d'enduit sur le comportement hygrothermique de la paroi.

Pour mener cette étude, différents types d'enduits sont utilisés. Ces enduits se différencient par leurs propriétés hygrothermiques qui les rendent singuliers. La discussion menée au cours de ce chapitre porte sur l'influence de la nature de l'enduit et de son épaisseur sur la réponse d'une paroi exposée à des sollicitations climatiques.

Dans un second temps, l'étude est axée sur l'analyse de la réponse hygrothermique d'une paroi en configuration réelle d'utilisation (partie courante en béton de chanvre et couches d'enduits sur les surfaces externes de la paroi) sous sollicitations climatiques annuelles typiques. La comparaison de différentes solutions constructives est finalement abordée pour discuter des avantages du béton de chanvre en termes de confort.

7.2. Application une paroi enduite

7.2.1. Propriétés des enduits étudiés

Dans le cadre de l'analyse menée sur l'influence de l'enduit sur la réponse hygrothermique d'une paroi en béton en chanvre, trois enduits sont étudiés :

- Un enduit chanvre/chaux (ECC)
- Un enduit chaux/plâtre (ECP)
- Un enduit classique (Ecl)

Le choix de ces enduits n'est pas anodin mais provient du fait qu'ils possèdent des propriétés hygrothermiques qui les différencient les uns des autres.

L'enduit chaux/plâtre et l'enduit classique sont présentés dans les travaux d'Evrard [Evrard 2008]. Les propriétés de ces deux enduits proviennent de la librairie de matériaux du logiciel WUFI.

L'enduit chanvre/chaux étudié est un mélange de chènevotte et de liant hydraulique. Sa formulation et sa caractérisation sont issus des travaux de thèse de [Collet 2004]. Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur de cet enduit est déterminé par des essais à la coupelle pour les couples d'humidité [0,50%] et [0,85%]. Les valeurs proposées par Collet sont de l'ordre de 10-13. Cependant, leur méthode de détermination est largement critiquable (cf. chapitre 3) car elle ne considère pas la quantité d'eau stockée dans le matériau lors de l'essai. Une réévaluation du facteur de résistance à la vapeur de cet enduit, de manière analogue à ce qui a été présenté au chapitre 3, nous fournit des valeurs de l'ordre de 4-5 pour les deux essais considérés. Ces valeurs apparaissent plus réalistes compte tenu de la porosité ouverte de l'enduit estimée par Collet autour de 64%. L'ordre de grandeur de ces valeurs de facteur de résistance à la vapeur n'est pas sans rappeler celui du béton de chanvre Easy R (proche de 4 cf. chapitre 3). Par ailleurs, la caractérisation de cet enduit chanvre/chaux présente l'inconvénient de ne pas s'intéresser à la diffusivité du matériau aux fortes humidités. Pour cette étude, les propriétés de diffusion vapeur et liquide retenues pour caractériser cet enduit chanvre/chaux sont celles du béton de chanvre Easy R. Cette hypothèse n'est sans doute pas tout à fait exacte mais n'est en rien problématique dans le cadre de cette étude.

Les propriétés à l'état sec des différents enduits sont présentées dans le tableau 7-1.

Il est à noter que les enduits ECP et Ecl possèdent des propriétés globalement identiques à la différence près que l'enduit ECP est nettement plus perméable à la diffusion de la vapeur. L'enduit ECC se distingue des deux autres enduits par sa porosité ouverte bien plus élevée qui lui confère des propriétés d'isolation thermiques bien plus fortes. Toutefois, l'ordre de grandeur de sa résistance à la diffusion de vapeur est relativement proche de celle de l'enduit ECP.

Matériau	Porosité totale (%)	Masse volumique apparente [kg.m ⁻³]	Capacité thermique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Conductivité thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Facteur de résistance à la vapeur
ECC	64 (60 ouverte)	785	1070	0,28	4
ECP	30 (25,5 ouverte)	1600	850	0,7	7
Ecl	24 (21 ouverte)	1900	850	0,8	25

Tableau 7-1 Caractéristiques à l'état sec des enduits étudiés

Cette caractérisation à l'état sec est à compléter par une évaluation des propriétés à l'état humide.

La connaissance de la masse volumique apparente à l'état sec des différents enduits ainsi que leur porosité ouverte nous permet tout d'abord d'évaluer leur teneur en eau à saturation (méthode présentée au chapitre 3). Comme pour les bétons de chanvre, la construction de la courbe d'adsorption principale repose sur l'application de la méthode des moindres carrés appliquée au modèle de Van Genuchten. Le paramétrage issu de ce travail est présenté dans le tableau 7-2.

Matériau	u _{sat} (%)	α _{ads}	η _{ads}
ECC	76,4	0,0234	1,747
ECP	15,9	0,0099	1,554
Ecl	11	0,0078	1,482

Tableau 7-2 Paramètres du modèle de Van Genuchten pour les différents enduits

Les courbes d'adsorption principale obtenues sont présentées figure 7-1.

Les courbes d'adsorption principales des différents enduits apparaissent relativement proches les unes des autres. On peut également observer la grande similitude de pente (et donc de capacité hydrique de stockage) sur une large plage d'humidité des trois enduits ECC, ECP et Ecl.

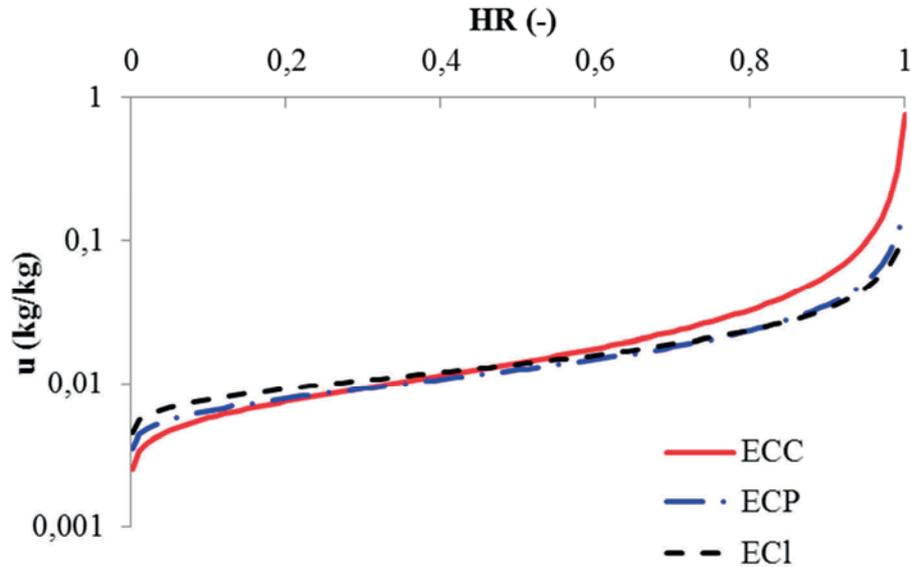


Figure 7-1 Courbes d'adsorption principale des différents enduits

Pour les enduits ECP et ECI, on ne dispose que de la courbe d'adsorption principale. En revanche, l'étude de caractérisation menée par Collet est plus complète car une étude en désorption primaire 97-0%HR est également effectuée. La méthode développée au chapitre 5 s'appuyant sur le modèle d'hystérésis de Huang pour construire la courbe de désorption principale est alors appliquée (cf. figure 7-2). Le paramétrage issu de cette étude nous fournit les valeurs : $\alpha_{des} = 0,00174$ et $\eta_{des} = 1,58$.

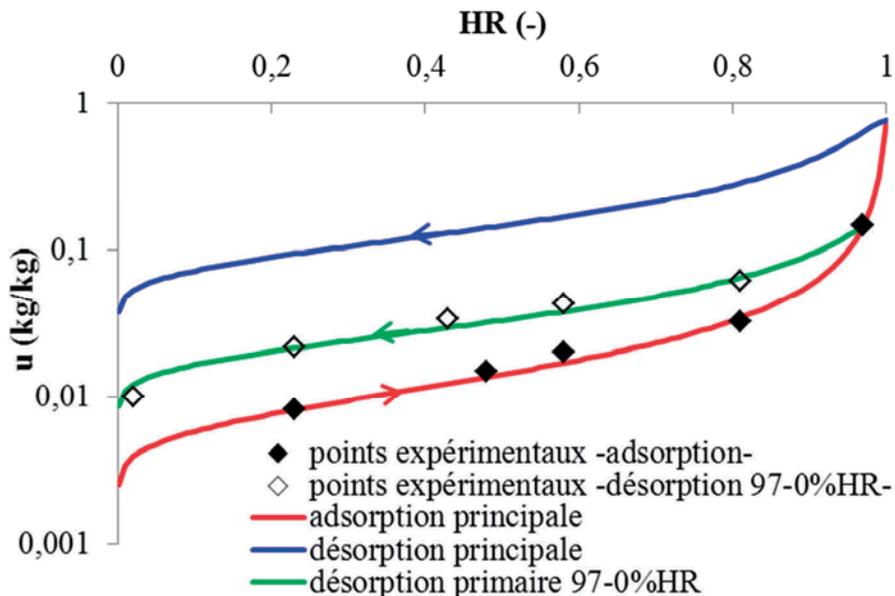


Figure 7-2 Courbes d'adsorption et de désorption principales et de désorption primaire 97-0%HR de l'enduit ECC

L'influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique des enduits est formalisée par la relation linéaire classique :

$$\lambda(u) = \lambda_0(1 + bu) \quad (7-1)$$

λ_0 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] désigne la conductivité thermique à l'état sec, u [kg/kg] la teneur en eau massique et b un paramètre de calage.

Les valeurs de b pour chaque enduit sont de :

- ECC : 3 (valeur déduite des conductivités thermiques humides mesurées dans [Collet 2004])
- ECP : 8
- Ecl : 8

La figure 7-3 représente l'évolution de la conductivité thermique de en fonction de la teneur en eau normalisée u/u_{\max} . u_{\max} se déduit de la porosité totale (cf. chapitre 3).

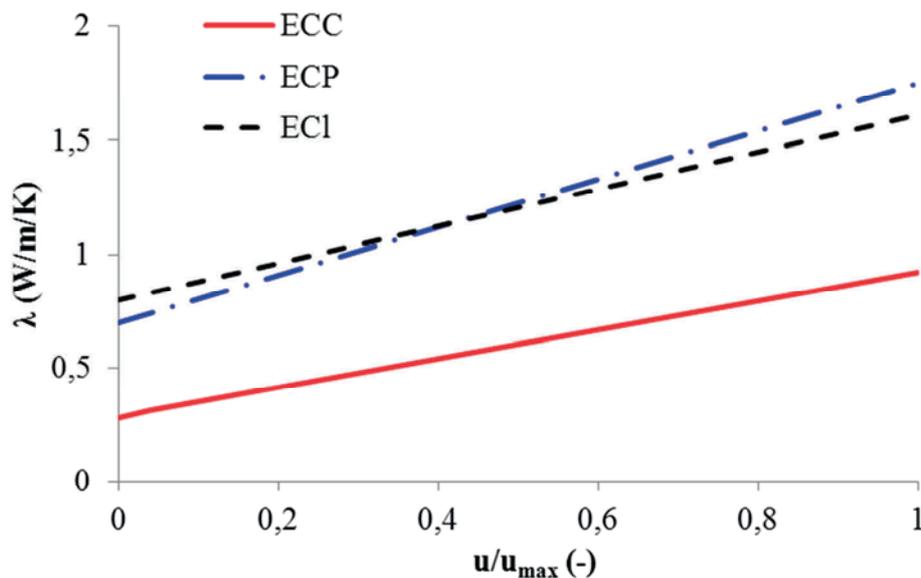


Figure 7-3 Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau normalisée

L'enduit ECC conserve, du point de vue de l'isolation thermique, une meilleure conductivité thermique devant les autres enduits sous teneur en eau croissante.

Le coefficient de diffusion liquide des enduits ECC et Ecl utilisé pour caractériser le phénomène de transport liquide suit la relation :

$$D_l(u) = 3,8 \left(\frac{A}{w_{sat}} \right)^2 (1000)^{\frac{w}{w_{sat}} - 1} \quad (7-2)$$

Cette expression exponentielle proposée par Künzle [Künzel 1994] est en réalité un coefficient d'absorption qui caractérise les phénomènes de succion capillaire. A ce titre, elle ne prend pas en compte les phénomènes de diffusion liquide à la surface des pores. Selon l'auteur, elle n'offre ainsi qu'une vision approximative des processus de transport liquide et son utilisation doit se limiter aux cas où ce mode de transport n'est pas prédominant. Dans

cette expression, A [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$] désigne un coefficient d'absorption liquide et w_{sat} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] la teneur en eau libre à saturation. Les valeurs utilisées pour les enduits ECP et Ecl sont :

- ECP : $A = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ et $w_{\text{sat}} = 270 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Ecl : $A = 0,00167 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ et $w_{\text{sat}} = 210 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Il est à noter qu'Evrard admet que ce coefficient de diffusion liquide est constant dans les régions super saturées lorsque $w > w_{\text{sat}}$. De plus, en phase de redistribution (processus inverse de l'absorption), le coefficient de diffusion liquide est pondéré. Afin de simplifier la représentation, ces deux considérations ne sont pas prises en compte ce qui n'est pas gênant dans notre domaine d'étude.

La figure 7-4 représente ainsi les coefficients de diffusion liquide des trois enduits.

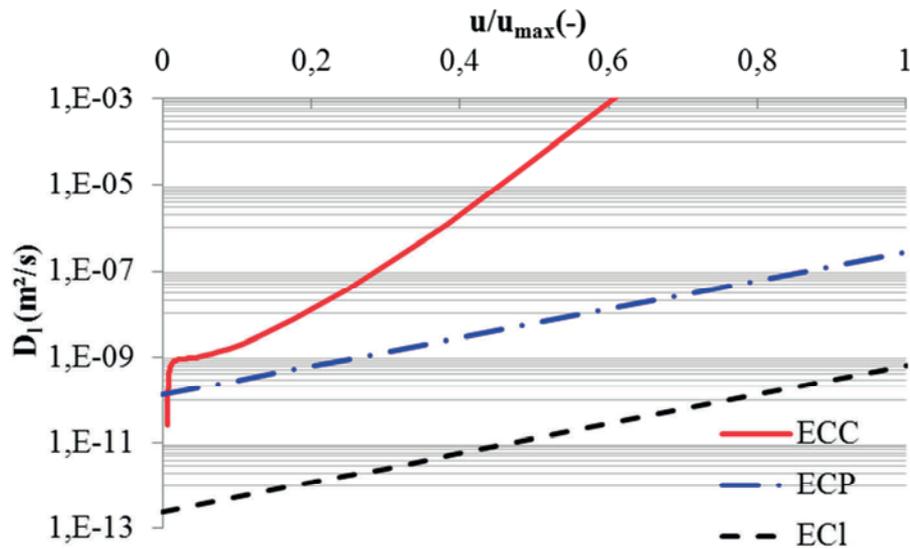


Figure 7-4 Coefficients de diffusion liquide des trois enduits étudiés

Les coefficients de diffusion liquide ECP et Ecl sont largement inférieurs à celui pris en compte pour l'enduit ECC.

7.2.2. Simulation numérique et analyse des résultats

7.2.2.1. Cadre de la simulation

Dans le cadre de ce travail, deux séquences d'étude sont étudiées : l'une isotherme présentée au chapitre 4 et utilisée au chapitre 5, l'autre non isotherme analysée au chapitre 6. La séquence isotherme est étudiée en détail dans ce chapitre. L'analyse de la séquence non isotherme est présentée en annexe E.

Afin de mieux identifier le rôle de l'enduit, une seule couche d'enduit située sur la surface extérieure de la paroi est prise en compte (cf. figure 7-5). Le contact à l'interface entre la couche d'enduit et le béton de chanvre est supposé parfait. L'épaisseur de la paroi en béton de chanvre est conservée à savoir 30 cm.

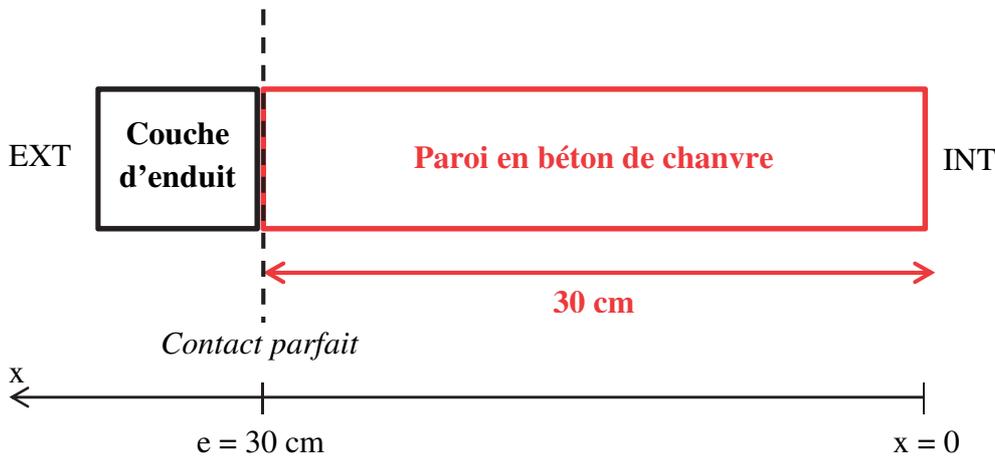


Figure 7-5 Configuration de mur étudiée

Le béton de chanvre constitutif de la paroi est le béton de chanvre Easy P. Son hystérésis est modélisé à partir du modèle de Huang et la dépendance de la teneur en eau à la température est prise en compte.

L'évolution des teneurs en eau des enduits est modélisée par la courbe d'adsorption principale. Les données des enduits ECP et Ecl nous contraignent à cette modélisation. Dans un premier temps, le choix est fait de ne pas modéliser l'effet de l'hystérésis sur l'enduit ECC pour pouvoir comparer les différents enduits à partir d'une modélisation identique. L'effet de la température sur les teneurs en eau des différents enduits n'est pas non plus pris en compte.

Pour rappel, dans la séquence d'étude considérée, l'humidité relative initiale est de 41%HR et la température de 23°C. Dans le cadre de l'analyse envisagée, la teneur en eau initiale de la partie courante en béton de chanvre est définie constante. Une teneur en eau initiale élevée est retenue pour mieux identifier l'influence de la couche d'enduit sur les réponses numériques. Elle est construite en faisant subir une désorption primaire à la paroi d'une valeur d'humidité de 90%HR à la valeur initiale HR_{init} (cf. chapitre 5). Ce choix de modélisation, purement numérique, a pour objectif de proposer une teneur en eau initiale réaliste.

7.2.2.2. Influence du type d'enduit

Dans cette section, l'épaisseur de l'enduit est fixée à 2 cm.

Les résultats issus des simulations pour les différents enduits sont présentés figure 7-6 en termes de distributions d'humidité relative et figure 7-7 en termes de distributions de température. Par ailleurs, pour plus de lisibilité, seuls les résultats à $x = 7,5$ cm et $x = 22,5$ cm sont présentés.

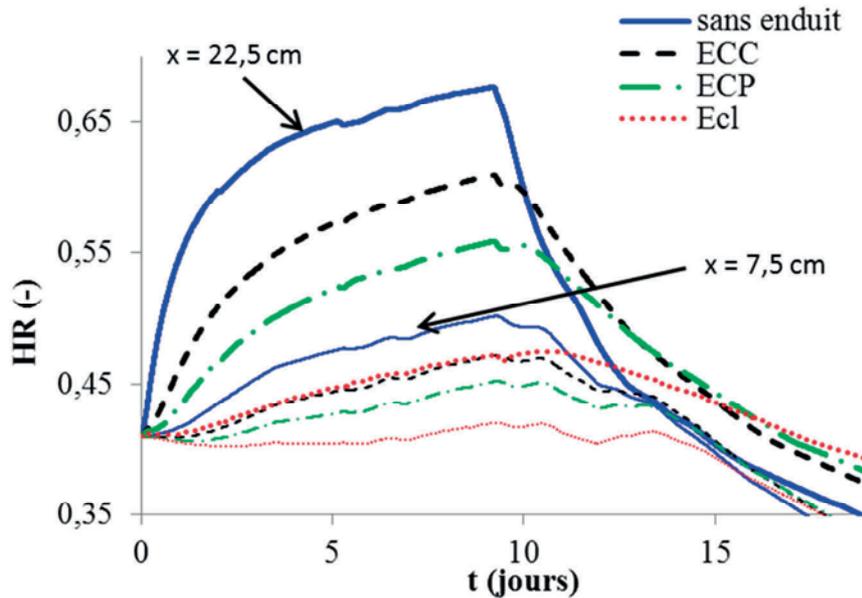


Figure 7-6 Distributions d'humidité relative (traits gras : $x = 22,5$ cm et traits fins : $x = 7,5$ cm) -influence du type d'enduit-

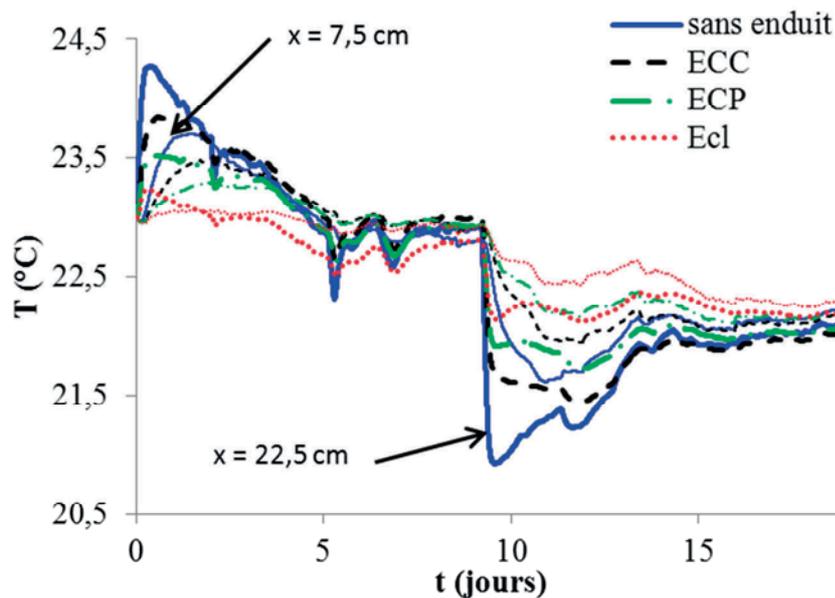


Figure 7-7 Distributions de température (traits gras : $x = 22,5$ cm et traits fins : $x = 7,5$ cm) -influence du type d'enduit-

Quel que soit le type d'enduit, on constate qu'il limite les variations d'humidité relative et de température au sein de la partie courante en béton de chanvre. En effet, plus les propriétés de résistance à la diffusion d'humidité sont élevées, moins il autorise son transport. L'influence de l'enduit sur les distributions d'humidité relative est avant tout remarquable proche de la surface extérieure soumise aux plus fortes fluctuations d'humidité. Ainsi, d'un point de vue hydrique, l'enduit classique Ecl se révèle être le plus isolant au contraire de l'enduit ECC qui ne limite que très peu le transport d'humidité. L'enduit ECP possède un comportement intermédiaire. L'enduit Ecl possède en outre une capacité hydrique exprimée en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ plus

importante que les deux autres enduits sur la plage d'humidité étudiée 30%-80%HR (cf. figure 7-8).

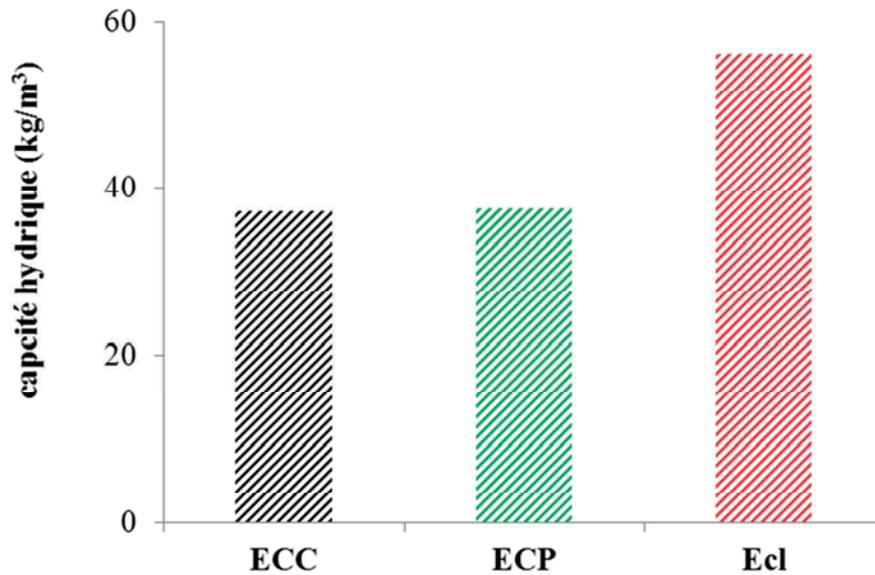


Figure 7-8 Capacité hydrique massique des différents enduits sur la plage d'humidité 30%-80%HR

En conséquence, à un niveau toutefois limité dans cette séquence d'étude (plus notable dans la seconde séquence d'étude cf. annexe E), l'enduit Ecl conduit à des cinétiques de distributions d'humidité relative dans le béton de chanvre légèrement déphasées par rapport à celles induites par les deux autres enduits.

Par ailleurs, du point de vue thermique, la présence d'une couche d'enduit joue un rôle essentiel dans les distributions de température au sein du béton de chanvre en limitant sensiblement ces fluctuations. L'enduit semble ainsi permettre une meilleure isolation thermique. Cependant, ce caractère isolant ne provient pas des propriétés de conductivité thermique des enduits qui sont supérieures à celles du béton de chanvre. En effet, les distributions de température représentées figure 7-7 sont directement conditionnées par l'évolution de l'humidité relative. Ainsi, les fluctuations de température associées aux phases d'adsorption et de désorption sont limitées par la diminution de l'amplitude de l'humidité relative qui réduit l'influence des phénomènes d'évapo-condensation.

Afin de poursuivre l'analyse de l'influence de l'enduit, il convient de s'intéresser aux profils de teneurs en eau et d'humidité relative à travers la paroi complète, présentés figure 7-9 en phase d'adsorption à 5 jours de simulation et en phase de désorption à 15 jours.

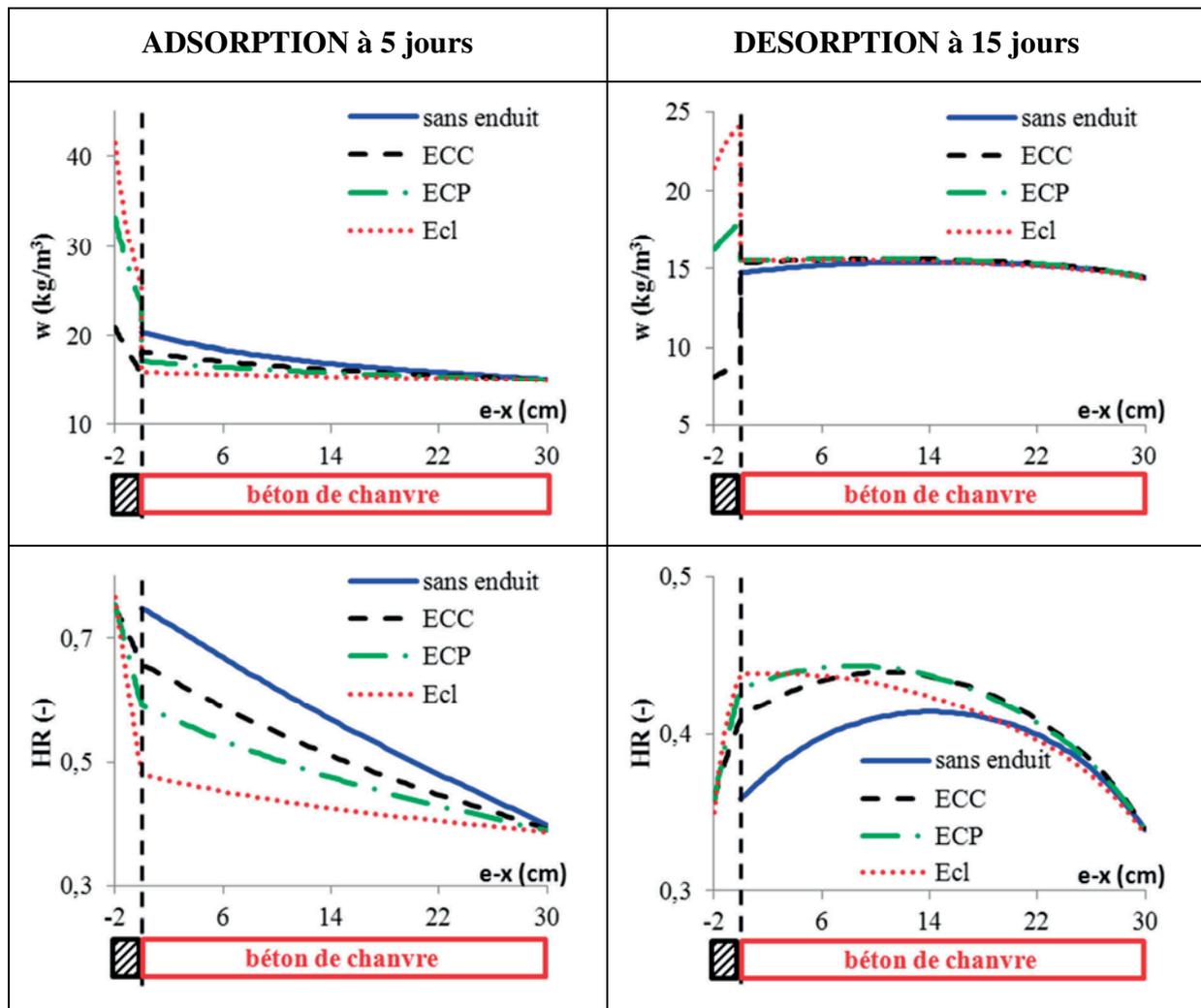


Figure 7-9 Profils de teneur en eau et d'humidité relative en phase d'adsorption (à gauche) et de désorption (à droite) -influence du type d'enduit-

Il est tout d'abord à noter, qu'aussi bien en phase d'adsorption qu'en phase de désorption, on observe une discontinuité de la teneur en eau au niveau de l'interface enduit/béton de chanvre car les teneurs en eau des enduits et du béton de chanvre répondent à une évolution différente. A l'inverse, l'humidité relative est une fonction continue de l'espace. Les enduits contribuent à limiter l'augmentation de teneur en eau au sein du béton de chanvre et ainsi à réduire l'humidité qui y entre.

A l'appui de cette observation, la figure 7-10 représente les quantités d'eau accumulées en phase d'adsorption et évacuées en phase de désorption par les éléments constitutifs de la paroi. Ces quantités d'eau sont évaluées respectivement à 5 et 15 jours par rapport à la quantité d'eau initialement présente dans chaque couche de matériau.

En phase d'adsorption, on constate qu'en plus de stocker une grande partie l'humidité, les enduits ont également tendance à limiter son entrée. Ce double rôle joué par l'enduit, de stockage et de frein à l'entrée de l'humidité, contribue à réduire l'élévation de teneur en eau au sein du béton de chanvre. Il est à noter que la quantité d'eau stockée dans la couche d'enduit est pratiquement la même, quelle que soit la nature de l'enduit. En revanche, la

masse totale d'eau accumulée (enduit + béton de chanvre) décroît avec la capacité de diffusion de l'humidité de l'enduit. On en conclut donc que la nature de l'enduit influence essentiellement l'entrée de l'humidité davantage que son stockage ce qui s'explique par la proximité des courbes d'adsorption principales des différents enduits.

Au terme de la phase de désorption à 15 jours, il est très intéressant de noter qu'en présence d'enduits, ce sont ces derniers qui autorisent et participent en premier lieu à l'évacuation de l'humidité. En effet, leur rôle bloquant et stockant décrit en phase d'adsorption est le même durant cette phase de désorption. Cependant, au lieu de limiter l'entrée de l'humidité en adsorption, il l'empêche de sortir en désorption.

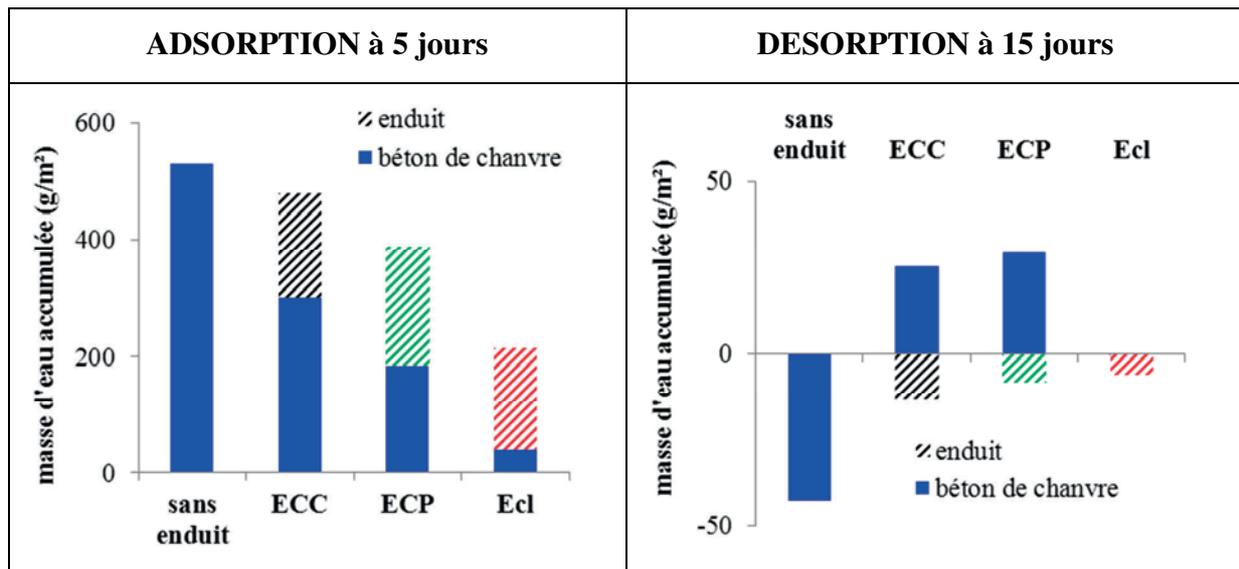


Figure 7-10 Quantités d'eau accumulée en phase d'adsorption (à gauche) et en phase de désorption (à droite) par rapport à la quantité d'eau initiale présente dans chaque couche de matériau -influence du type d'enduit-

Afin de mieux analyser les processus hydriques intervenant en phase de désorption, dans un premier temps, il convient de s'intéresser à la transition adsorption/désorption et au rôle que joue l'enduit durant cette période. Pour mener ce raisonnement, seul le cas de l'enduit ECC est traité. La figure 7-11 présente ainsi les profils de teneur en eau et d'humidité relative autour de l'interface enduit/béton de chanvre dans les premiers instants qui succèdent au pic d'humidité relative dans la paroi.

Juste après la transition adsorption/désorption qui correspond au pic d'humidité relative, la redistribution de l'humidité par l'enduit se fait vers l'extérieur et vers le béton de chanvre compte tenu de l'évolution des gradients d'humidité relative et de teneur en eau de part et d'autre de l'interface enduit/béton de chanvre. Durant cette phase, le béton de chanvre continue donc d'être en adsorption. Après quelques heures (entre 4h et 6h), l'humidité de l'enduit est évacuée de manière unidirectionnelle vers l'extérieur de la paroi. Au niveau de l'interface, le béton de chanvre entre en désorption et libère son humidité vers l'enduit. Ce raisonnement est bien évidemment applicable aux autres types d'enduits, seule varie la durée pendant laquelle le béton de chanvre continue à être en adsorption après le pic (et l'enduit redistribue de manière bidirectionnelle l'humidité qu'il a accumulé).

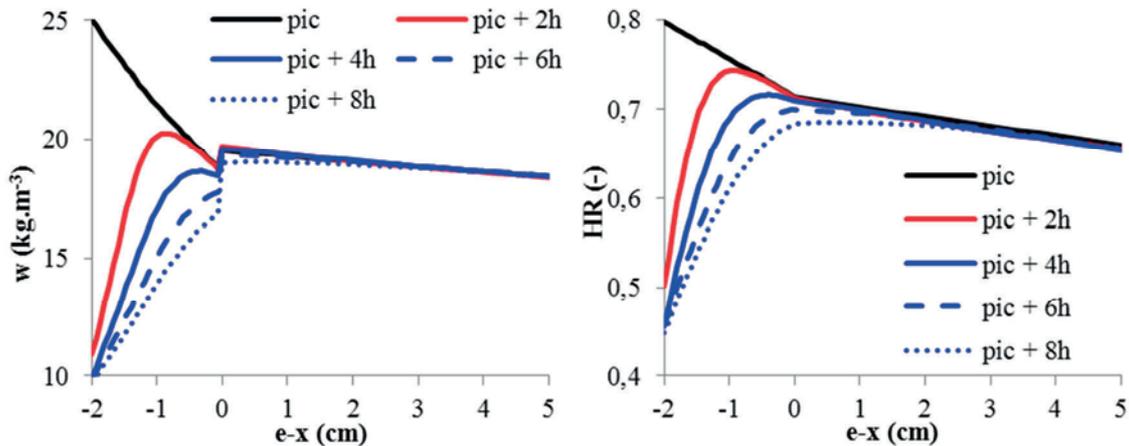


Figure 7-11 Profils de teneur en eau (à gauche) et d'humidité relative (à droite) après le pic d'humidité relative

De manière générale, en phase d'adsorption ou de désorption, l'enduit joue un rôle de « tampon hydrique » qui ne coupe pas le transport d'humidité mais limite ces variations. Le côté modérateur à l'entrée de l'humidité en adsorption est contrebalancé par le fait qu'il gêne son évacuation en désorption.

Par ailleurs, un enduit trop isolant d'un point de vue hydrique (enduit Ecl) a tendance à réduire la capacité régulatrice du béton de chanvre. La nature du type d'enduit se révèle ainsi d'une influence première sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre. Afin de profiter des propriétés hydriques du béton de chanvre, celles de l'enduit ne doivent pas trop s'en éloigner.

Si la nature de la couche d'enduit a son importance, il est naturel de supposer que son épaisseur l'a également. Quelle influence joue ainsi l'épaisseur de l'enduit ?

7.2.2.3. Influence de l'épaisseur de l'enduit

Pour analyser cette problématique, seul l'enduit ECC est étudié. Cette investigation peut être menée pour les deux autres types d'enduit conduisant à des conclusions analogues.

Les données que l'on possède sur cet enduit nous permettent de prendre en compte le phénomène d'hystérésis qui caractérise son isotherme de sorption/désorption à 23°C et ainsi de mieux représenter l'évolution de la teneur en eau.

A ce titre, l'introduction de ce phénomène permet d'introduire une teneur en eau initiale au sein de l'enduit plus réaliste. La teneur en eau massique initiale est ainsi prise égale à celle du béton de chanvre (on a : $u_{ECC} = u_{EasyP}$ mais $w_{ECC} \neq w_{EasyP}$ en raison des masses volumiques différentes).

Quatre épaisseurs d'enduit sont ainsi étudiées : 1 cm, 2 cm, 3 cm et 5 cm.

Les résultats issus des simulations pour les différentes épaisseurs d'enduit étudiées sont présentés figure 7-12 en termes de distributions d'humidité relative et figure 7-13 en termes de distributions de température.

L'épaisseur de la couche d'enduit a tendance à diminuer les fluctuations d'humidité et de température au sein du béton de chanvre. Plus la couche d'enduit est épaisse, plus son caractère d'isolation thermohydrigue est renforcé.

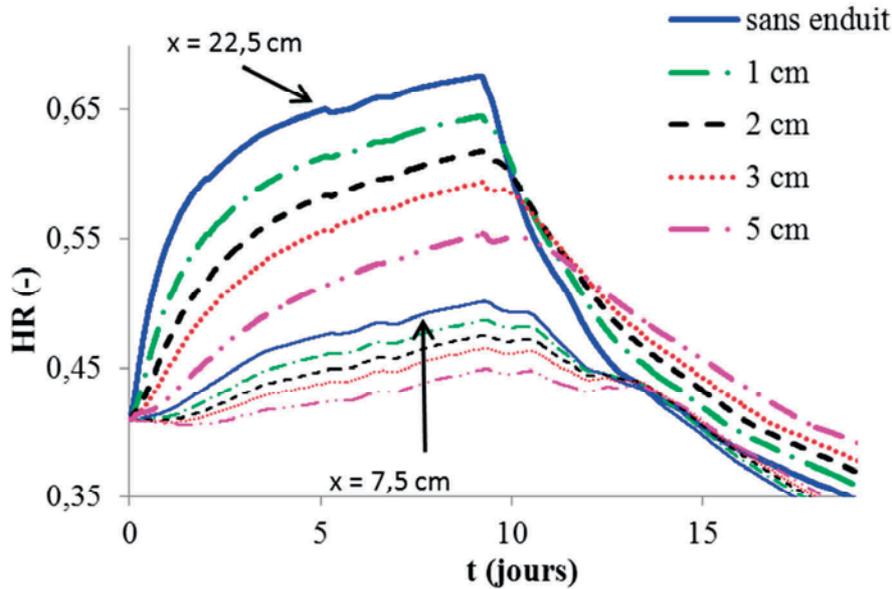


Figure 7-12 Distributions d'humidité relative (traits gras : $x = 22,5$ cm et traits fins : $x = 7,5$ cm) -influence de l'épaisseur d'enduit-

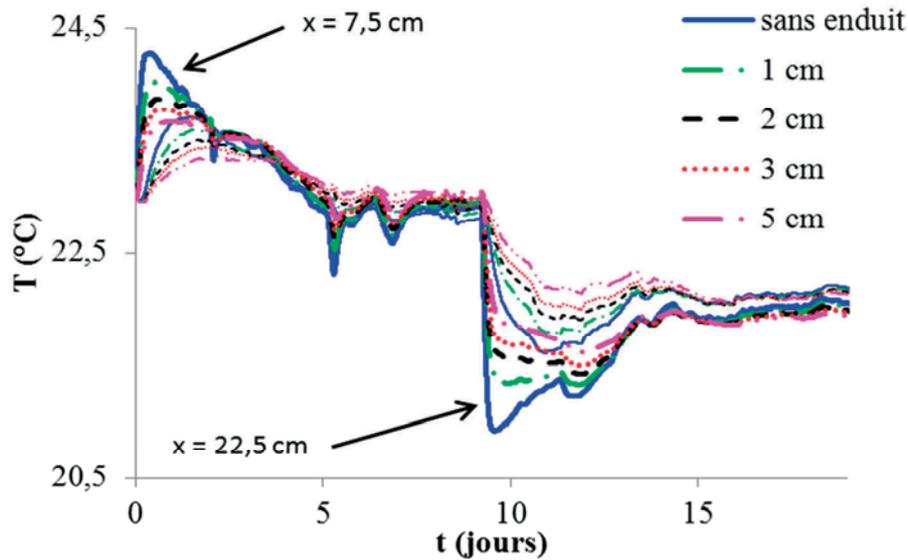


Figure 7-13 Distributions de température (traits gras : $x = 22,5$ cm et traits fins : $x = 7,5$ cm) -influence de l'épaisseur d'enduit-

Comme le montre la figure 7-14 en adsorption et en désorption, les profils de teneur en eau et d'humidité relative sont de formes relativement similaires quelle que soit l'épaisseur de l'enduit.

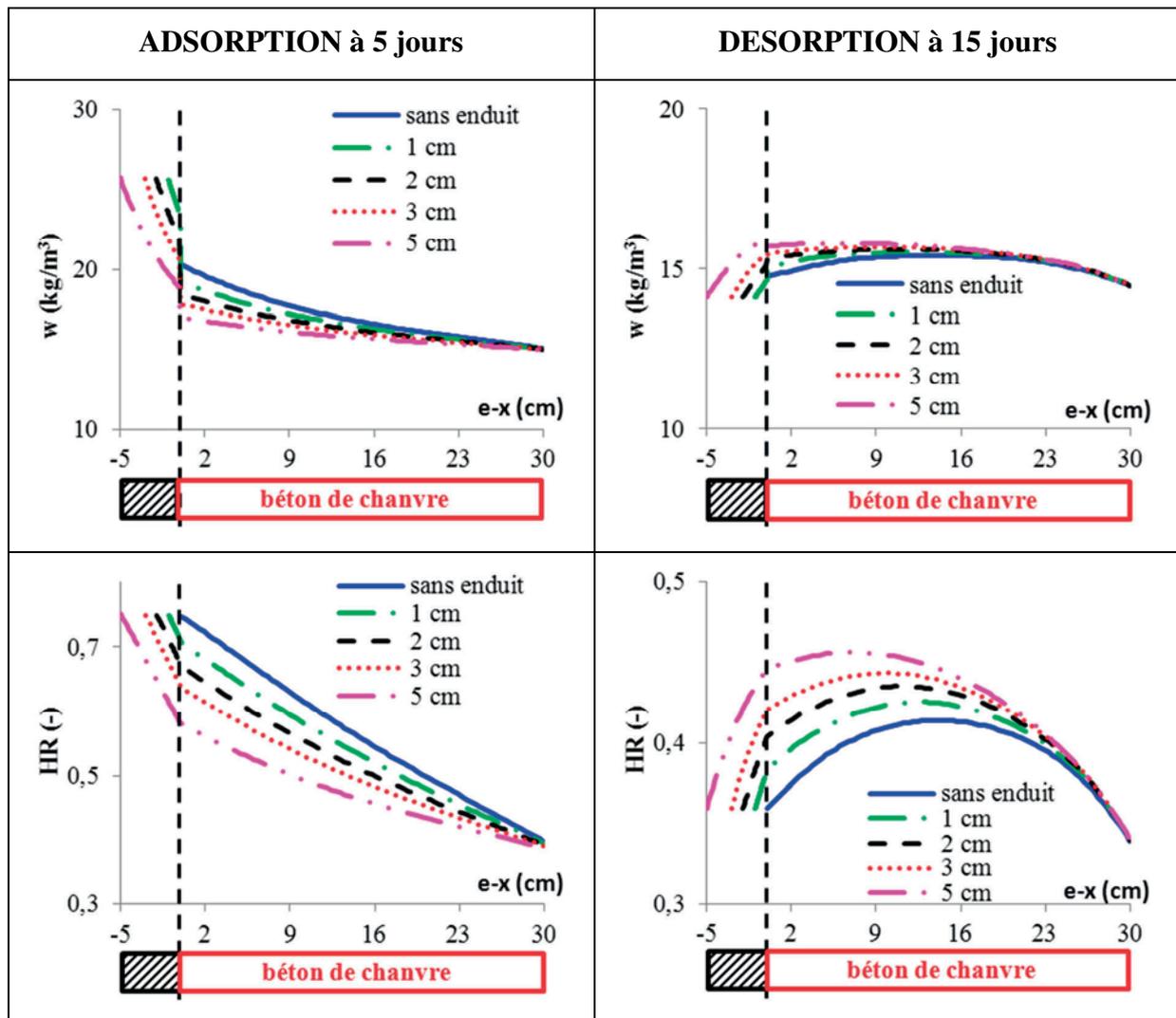


Figure 7-14 Profils de teneur en eau et d'humidité relative en phase d'adsorption (à gauche) et de désorption (à droite) -influence de l'épaisseur d'enduit-

La figure 7-14 montre que l'allure des profils d'humidité relative est directement à relier avec celle des profils de teneur en eau. La figure 7-15 qui représente les quantités d'eau accumulées en phase d'adsorption et évacuées en phase de désorption par les éléments constitutifs de la paroi permet de mieux identifier le rôle joué par l'épaisseur de la couche d'enduit.

En phase d'adsorption, il apparaît clairement que l'épaisseur de la couche d'enduit n'a que très peu d'impact sur l'entrée d'humidité. Les masses totales d'eau accumulées (enduit + béton de chanvre) sont en effet sensiblement proches. La nature de l'enduit est à ce titre bien plus influente (cf. paragraphe 7.2.2.2.). En revanche, on observe que plus la couche d'enduit est épaisse, plus la quantité d'eau stockée dans cette dernière est importante.

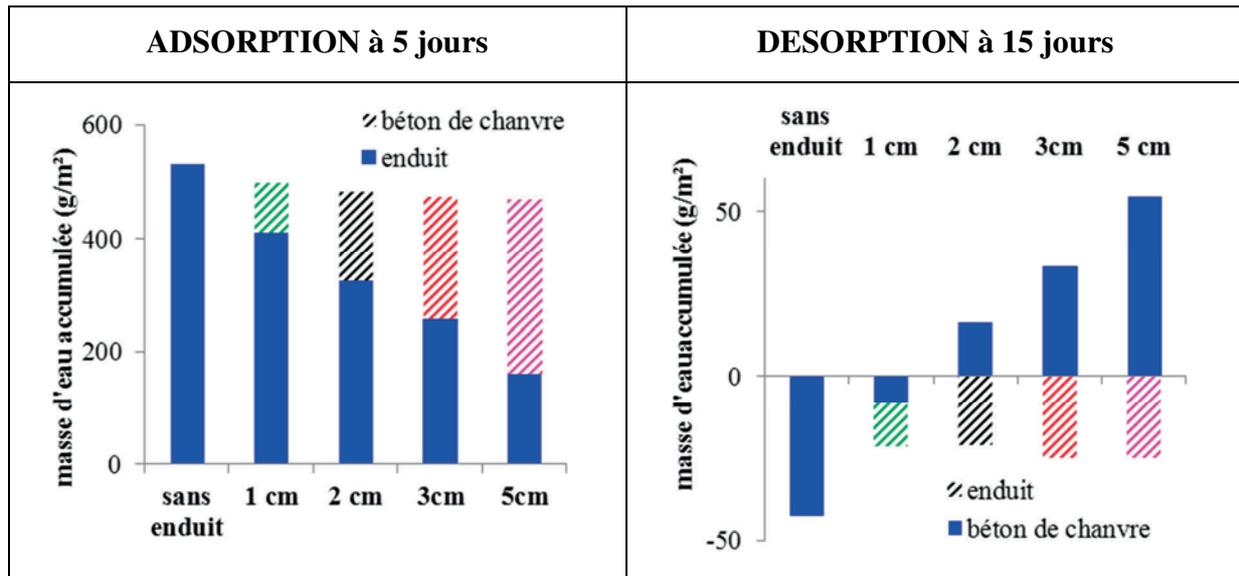


Figure 7-15 Quantités d'eau accumulée en phase d'adsorption (à gauche) et en phase de désorption (à droite) par rapport à la quantité d'eau initiale présente dans chaque couche de matériau -influence du type d'enduit-

En phase de désorption, moins l'épaisseur de l'enduit est grande, plus facilement l'humidité peut être évacuée de la paroi. L'inertie hydrique de la paroi (observée figure 7-12 sur les distributions d'humidité relative) est par ailleurs peu affectée par l'épaisseur de l'enduit.

Les conclusions établies au paragraphe précédent en début de désorption sont identiques lorsqu'est pris en compte l'hystérésis de l'enduit ECC à la différence près que l'enduit redistribue l'eau accumulée vers le béton de chanvre pendant un temps plus court (entre 2h et 4h) (cf. figure 7-16 pour une épaisseur de 2 cm).

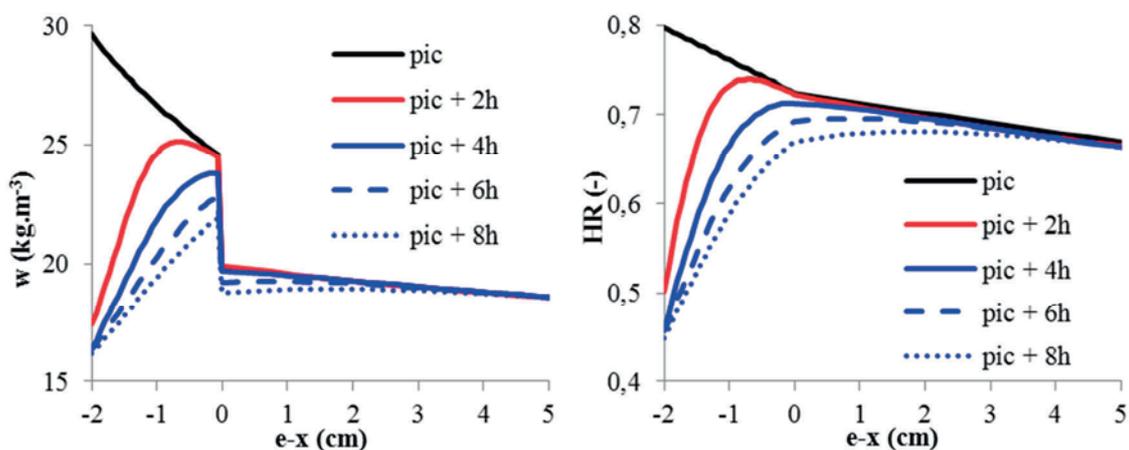


Figure 7-16 Profils de teneur en eau (à gauche) et d'humidité relative (à droite) après le pic d'humidité relative

7.2.2.4. Bilan

Les résultats issus de l'étude d'une séquence non isotherme sur les réponses numériques sont analogues à ceux d'une séquence isotherme (cf. annexe E).

L'enduit joue le rôle de « tampon thermohydrrique » pour la partie courante en béton de chanvre :

- En phase d'adsorption, il limite l'entrée de l'humidité dans la partie courante en béton de chanvre d'une part en bloquant l'humidité et d'autre part en la stockant. Réciproquement, en phase de désorption, il ralentit l'évacuation de l'humidité. La réponse en température est conditionnée par la réduction des variations d'humidité au sein de la paroi. La participation des phénomènes d'évapo-condensation au transport de chaleur est en conséquence réduite sensiblement.
- La nature et l'épaisseur de la couche d'enduit conditionnent activement le transport et le stockage d'humidité au sein du béton de chanvre. Ils sont à donc choisir de manière à ne pas trop perturber les transferts thermohydrriques auquel cas la capacité régulatrice du béton de chanvre serait mise à défaut.

7.3. Simulation en situation réelle

7.3.1. Configuration d'étude

Dans ce paragraphe, on se propose d'étudier l'influence des conditions climatiques sur la réponse hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre en situation réelle. La configuration de la paroi est présentée figure 7-17.

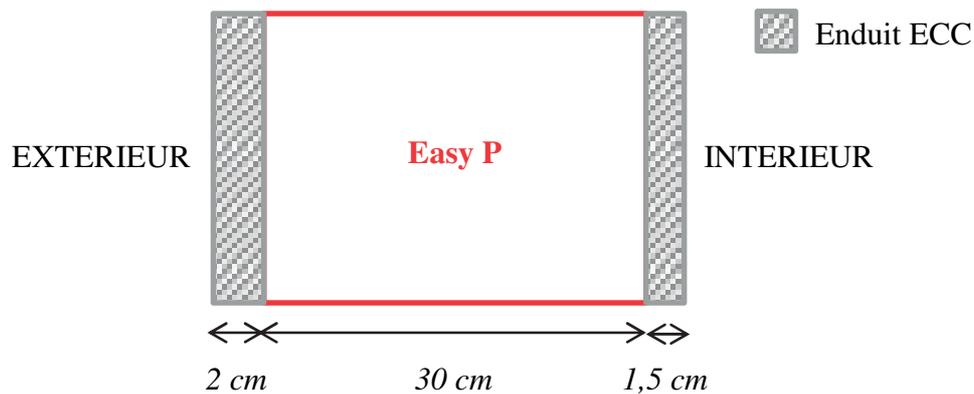


Figure 7-17 Solution constructive étudiée

L'épaisseur de la partie courante en béton de chanvre est conservée à savoir 30 cm. L'enduit apposé sur les surfaces externes de la paroi en béton de chanvre est l'enduit chanvre/chaux ECC présenté précédemment. La couche d'enduit extérieure possède une épaisseur de 2 cm et la couche d'enduit intérieure une épaisseur de 1,5 cm.

7.3.2. Conditions climatiques

Dans le cadre de l'étude proposée, les conditions climatiques extérieures sont celles de la région rennaise. Elles proviennent des données du logiciel Météonorm³⁹, présent dans la bibliothèque TRNSYS, spécialisé dans le calcul de données météo typique (à partir d'une base de données de mesure météo). L'outil Météonorm permet d'accéder au relevé typique sur une année d'un site donné en interpolant les résultats obtenus sur les stations de mesure les plus proches. L'ensemble de ces données est fourni au pas temps horaire.

La paroi est admise orientée au sud. Les données de rayonnement solaire incident total (diffus, direct et réfléchi) dépendant de l'orientation de la paroi nous permettent de déterminer le flux solaire absorbé par la paroi et le rayonnement solaire reçu horizontalement (diffus et direct) utilisé pour déterminer la température de ciel (cf. chapitre 2). Température ambiante, humidité relative ambiante, vitesse et direction du vent sont également nécessaires pour modéliser l'ensemble des échanges de surface extérieure. La détermination des coefficients d'échange thermique (radiatif et convectif) et massique sont ainsi déterminés en respectant le formalisme présenté au chapitre 2. En particulier, la température de ciel est déterminée à

³⁹ www.meteonorm.com

partir du modèle d’Ineichen (cf. annexe A). Les émissivités de la surface extérieure et du sol sous l’hypothèse de corps gris sont prises égales à 0,9. Le coefficient d’absorption est de 0,4. Ces valeurs sont communément admises dans le cas de notre application ([Tran Le 2011, Evrard 2008]). Les figures 7-18 à 7-21 représentent les valeurs moyennes mensuelles respectivement du flux solaire total incident sur la paroi, des flux solaire diffus et total reçus à l’horizontal, de la température ambiante et de l’humidité relative ambiante. Ce choix de représentation à l’échelle du mois permet de dégager les tendances d’évolution sur l’année des différents paramètres climatiques.

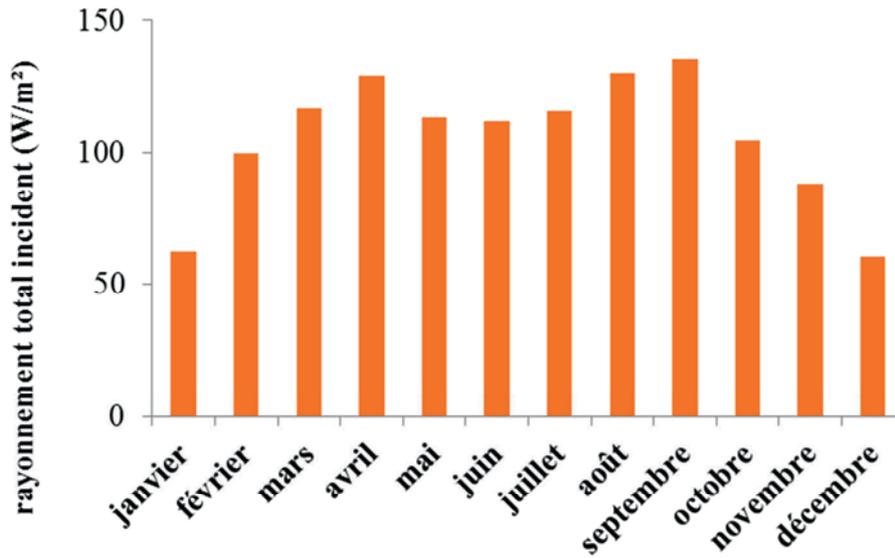


Figure 7-18 Flux solaire total incident

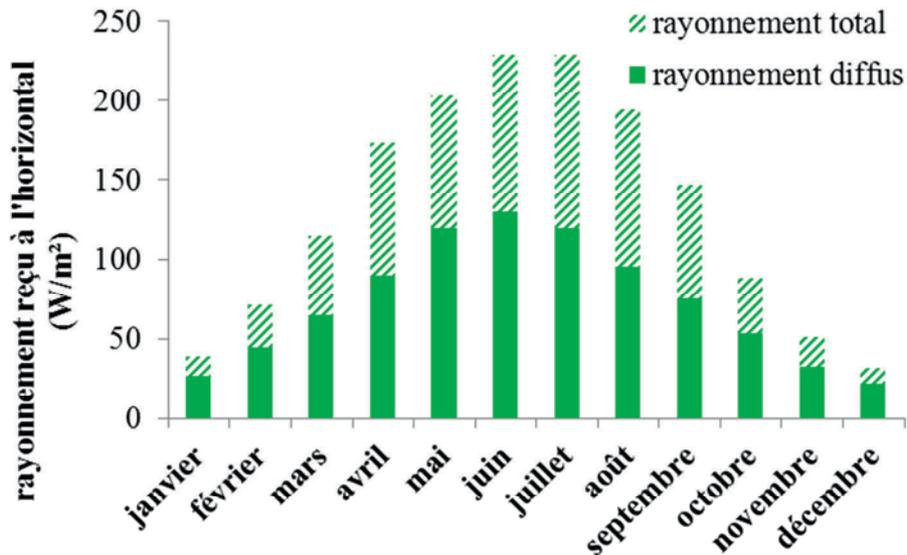


Figure 7-19 Flux solaire reçu à l’horizontal

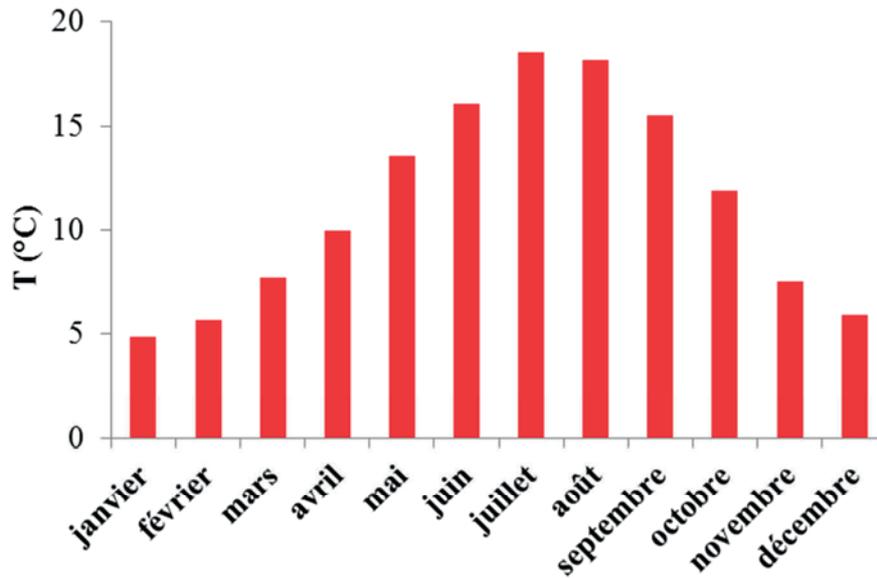


Figure 7-20 *Température ambiante*

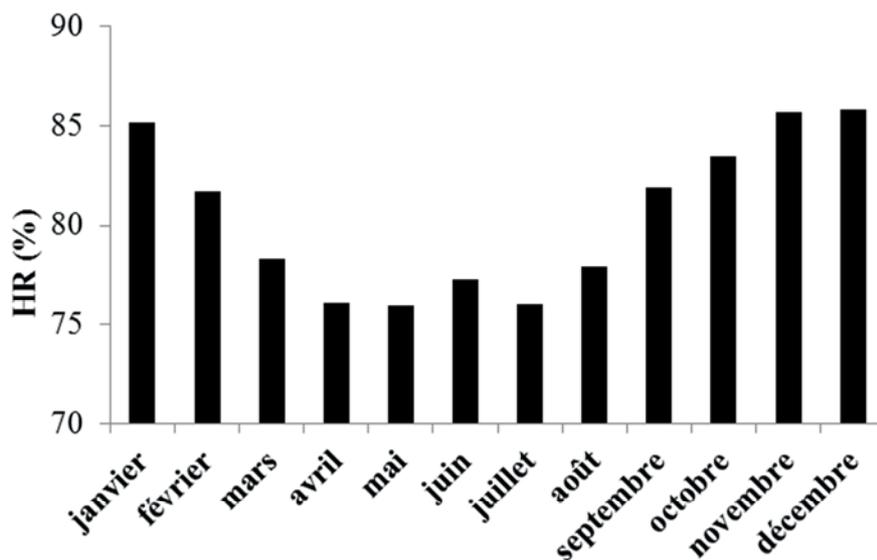


Figure 7-21 *Humidité relative ambiante*

Le rayonnement solaire incident sur la surface extérieure de la paroi orientée plein sud est légèrement plus faible sur la période estivale (de mai à août) que sur les mois précédents et suivants cette période. Ce résultat est lié à la position du soleil dans le ciel qui est plus haut en été. Les fluctuations saisonnières de température restent modérées comprises globalement entre 5°C et 20°C. L'humidité relative moyenne conserve un niveau élevé toutefois légèrement plus haut en hiver qu'en été. La paroi est ainsi globalement soumise à une phase de désorption sur la première moitié de l'année et à une phase d'adsorption sur la seconde.

La figure 7-22 représente ainsi les vitesses moyennes mensuelles à 1 m du sol pour un terrain de catégorie III (cf. annexe A) et leurs occurrences.

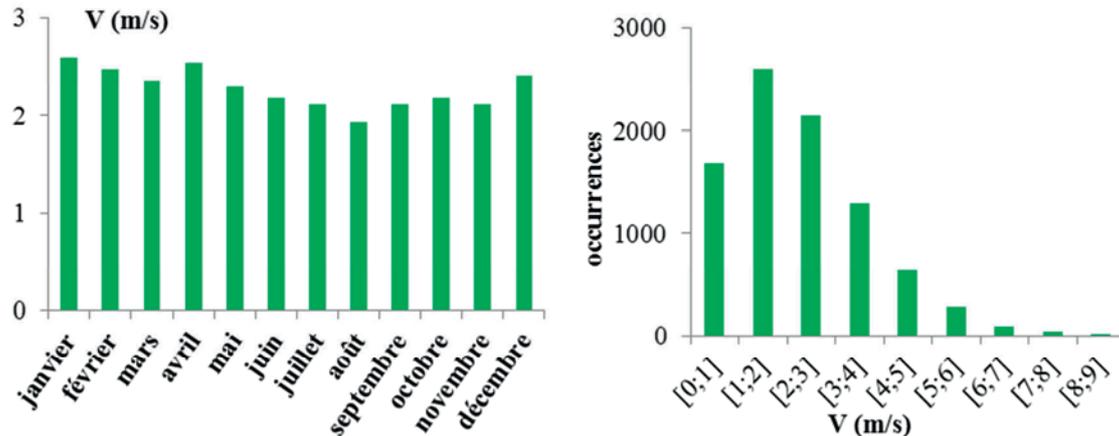


Figure 7-22 Vitesses moyennes de vent à 1 m du sol

La vitesse moyenne du vent au niveau de la paroi à l'échelle annuelle dans la configuration retenue est d'environ 2 m/s. La direction du vent n'est pas prise en compte dans la simulation.

La présence d'eau sur la surface extérieure de la paroi se manifeste lorsque l'humidité relative ambiante est de 100%HR. Cependant, la quantité d'eau susceptible d'être absorbée par la paroi demeure inconnue. En ce sens, la prise en compte de la pluie reste incomplète.

La température intérieure est maintenue constante pendant la totalité de la simulation à 20°C. L'humidité relative intérieure est fixée à 40%HR. Ces valeurs sont choisies comme valeurs cibles du confort thermohydrique. La discussion autour du choix de ces valeurs de consigne est largement ouverte en raison de la complexité de la définition de la notion de confort thermohydrique.

Le coefficient d'échange thermique intérieur est défini à $8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, valeur usuellement admise pour modéliser les échanges surfaciques intérieurs d'une habitation. Le coefficient d'échange massique associé se déduit de la relation de Lewis.

Enfin, la température initiale choisie est de 20°C et l'humidité relative initiale de 40%HR dans la paroi. La teneur en eau initiale du béton de chanvre Easy P est définie constante comme au paragraphe précédent en faisant subir une désorption primaire de 90%HR à la valeur d'humidité relative initiale. La teneur en eau initiale de l'enduit ECC est construite de manière analogue afin d'obtenir une teneur en eau massique initiale égale à celle du béton de chanvre.

7.3.3. Résultats de la simulation

La simulation est réalisée au pas de temps horaire (résultats identiques obtenus avec un pas de temps de 5 minutes).

7.3.3.1. Analyse des résultats à l'échelle de l'année

Dans cette section, on se propose d'évaluer à l'échelle l'influence de la prise en compte du phénomène thermodépendant hystérique sur la réponse hygrothermique de la paroi. Dans la suite, le terme **référence** est attribué à la modélisation complète du comportement

hygrothermique du matériau à l'inverse du terme **sans hystérésis** qui ne prend pas en compte le caractère hystérétique thermodépendant du béton de chanvre.

Les réponses numériques sont présentées dans un premier temps sur l'année complète aux positions $x = 22,5$ cm, $x = 18,5$ cm, $x = 11,5$ cm et $x = 7,5$ cm à l'intérieur de la partie courante en béton de chanvre. Pour un peu plus de clarté, les représentations graphiques sont décomposées en trois parties.

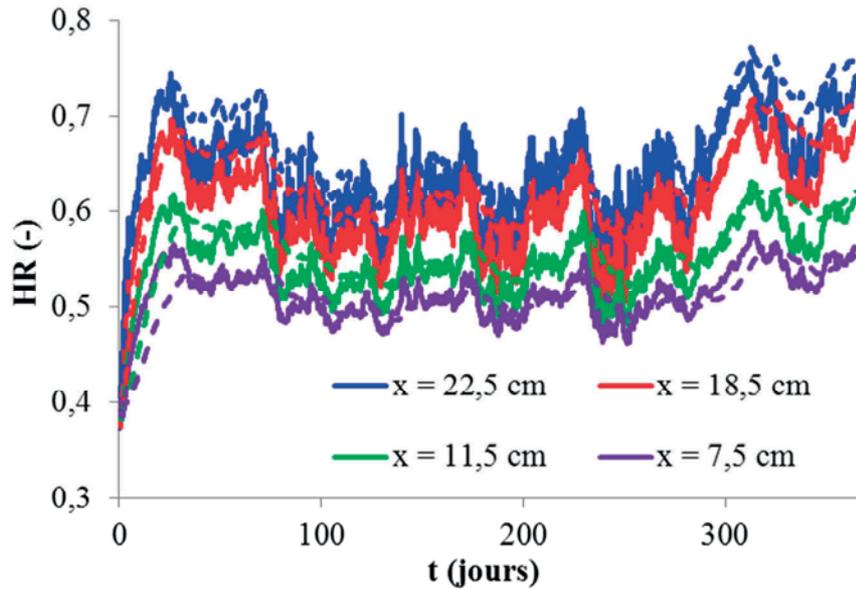


Figure 7-23 Distributions d'humidité relative (traits pleins : référence, traits pointillés : sans hystérésis)

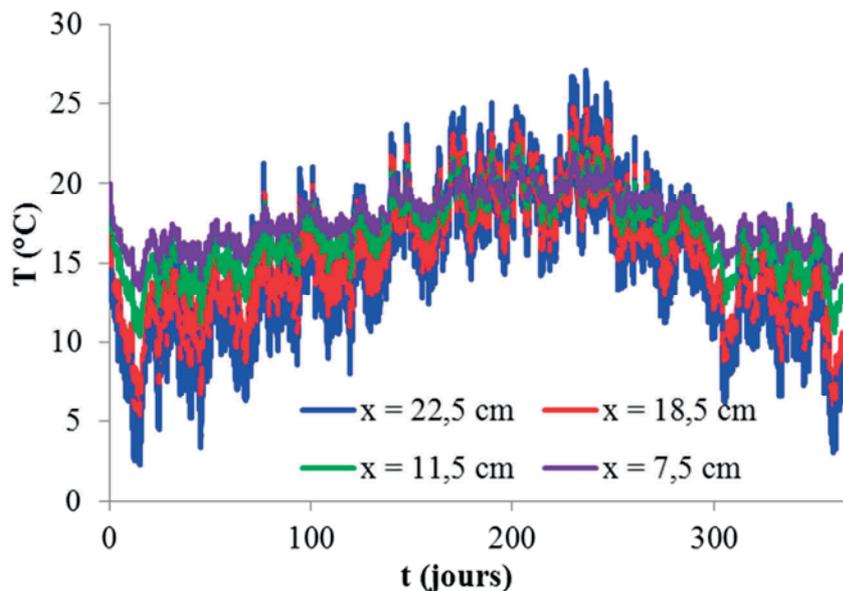


Figure 7-24 Distributions de température

Tout d'abord, dans cette simulation, il est à noter une période de régime transitoire d'une quinzaine de jours qui provient du choix des conditions initiales.

Globalement, les figures 7-23 et 7-24 montrent une distribution répartie de l'humidité relative et de la température, quel que soit le degré de modélisation utilisé. La non prise en compte du phénomène d'hystérésis ne permet que de reproduire les tendances générales d'évolution de l'humidité relative. A cette échelle, l'influence de l'hystérésis sur la température n'est pas identifiable. Se focaliser sur une période plus courte permet de mieux apprécier les différences existantes : la figure 7-25 en est une illustration sur une période de 48 heures correspondant aux deux premiers jours d'août.

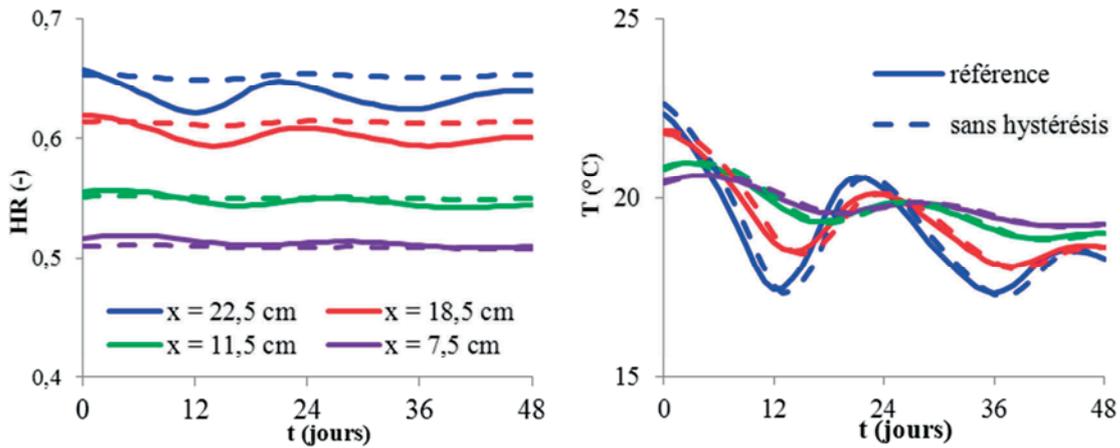


Figure 7-25 Distributions d'humidité relative (à gauche) et de température (à droite)

La prise en compte de l'hystérésis permet de mieux reproduire les variations quotidiennes de l'humidité relative. En outre, on observe, sans hystérésis, un léger déphasage des distributions de température à travers la paroi. La meilleure évaluation de la teneur en eau et corrélativement de la capacité hydrique de stockage permise par la modélisation du phénomène d'hystérésis explique ces différences.

L'évolution de la teneur en eau et de la teneur en eau accumulée dans la paroi par rapport à la teneur en eau initiale représentée figure 7-26 vient compléter cette analyse.

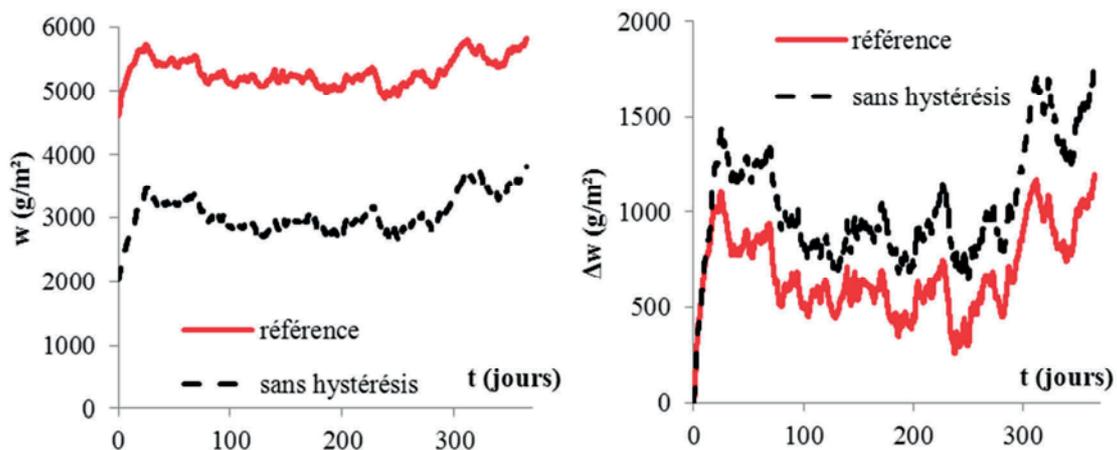


Figure 7-26 Evolution de la teneur en eau (à gauche) et de la teneur en eau accumulée (à droite) dans la paroi

La non prise en compte du phénomène d’hystérésis conduit à une sous-estimation de la teneur en eau dans la paroi. En revanche, l’accumulation d’eau dans la paroi par rapport à la quantité d’eau initialement présente dans la paroi est sur estimée.

Par ailleurs, dans la perspective d’apporter des éléments de réflexion à la notion de confort hygrothermique, il est intéressant de se placer au niveau de la surface intérieure de la paroi. La figure 7-27 représente ainsi l’évolution de l’humidité relative et de la température de la surface intérieure.

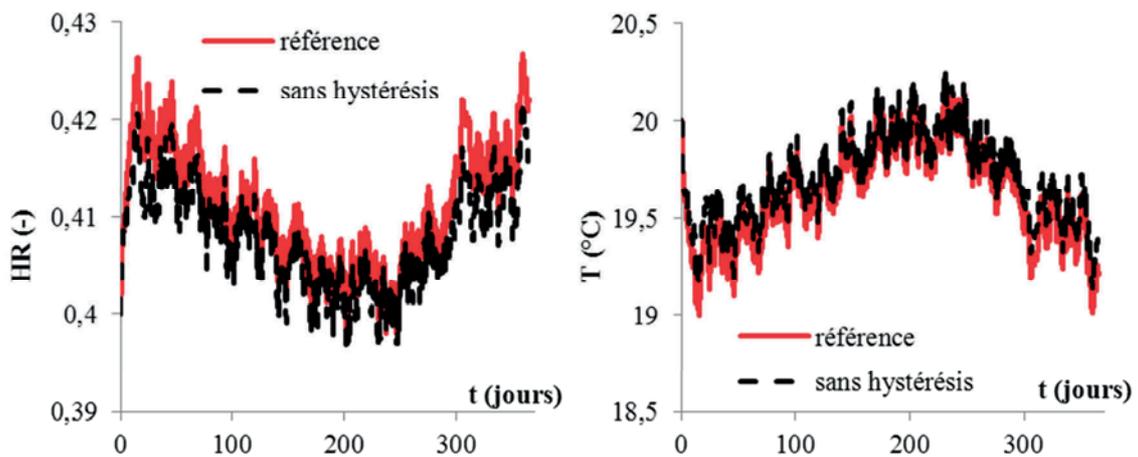


Figure 7-27 Humidité relative (à gauche) et température (à droite) de la surface intérieure

De manière générale, la température et l’humidité relative de la surface intérieure restent proches des valeurs d’ambiances intérieures. La température atteint des valeurs plus élevées en période estivale alors que l’humidité relative y connaît ses valeurs les plus basses.

Cette représentation ne fournit cependant qu’une vision partielle des échanges hygrothermiques qui ont lieu entre l’ambiance intérieure et la paroi. La figure 7-28 représente ainsi l’évolution des flux de masse et de chaleur entrants du point de vue de la zone d’habitation (intérieur).

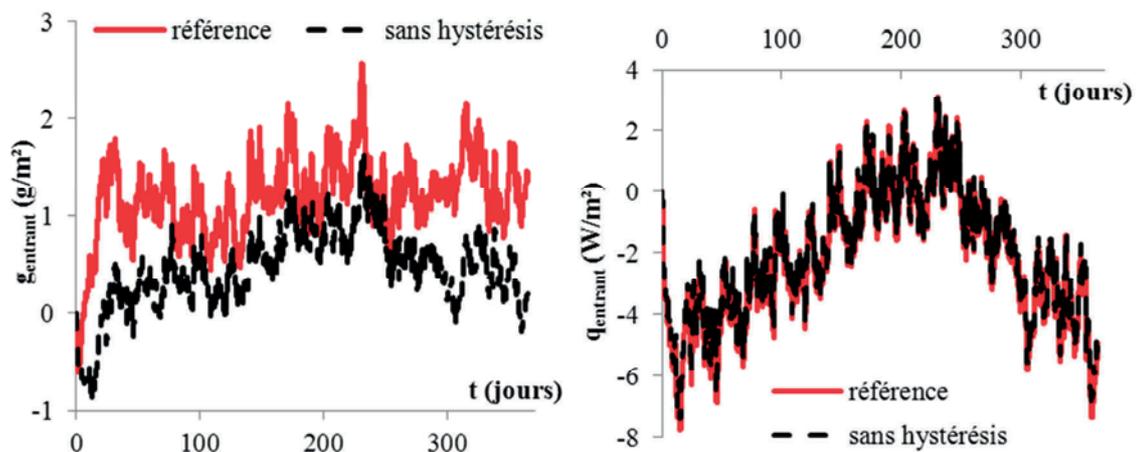


Figure 7-28 Flux de masse (à gauche) et de chaleur (à droite) entrants

L’humidité entrante est globalement stable à l’échelle annuelle autour de de quelques grammes d’eau par mètre carré. Elle est cependant légèrement plus importante en été où les

températures extérieures plus proches de celles de l'ambiance intérieure favorisent le transport d'humidité sous forme vapeur par des gradients de pression de vapeur plus élevés. Le flux de chaleur entrant est majoritairement négatif ce qui signifie que l'ambiance intérieure cède de la chaleur à la paroi.

Si la non prise en compte de l'hystérésis a peu d'influence sur les paramètres thermiques de température de surface intérieure et de flux de chaleur entrant, elle conduit en revanche à une sous-estimation marquée de l'humidité relative de surface intérieure et de flux d'humidité entrant. Déjà mis en évidence au cours des chapitres précédents, l'étude de la réponse de la paroi aux sollicitations climatiques ne peut s'affranchir de la prise en compte du phénomène d'hystérésis.

Dans la suite du travail, le comportement hygrothermique du béton de chanvre est modélisé de manière complète, **avec hystérésis**.

7.3.3.2. Analyse des résultats sur trois années

Il est par ailleurs intéressant de s'interroger sur la réponse de la paroi au bout de plusieurs années. Pour l'étudier, les mêmes sollicitations sont appliquées à la paroi durant trois années successives. La figure 7-29 représente ainsi l'évolution de l'humidité relative et de la température de surface intérieure et la figure 7-30 les flux de masse et de chaleur entrants pendant les trois années de simulation.

Il est à noter la similarité des réponses de la paroi aux sollicitations extérieures à l'échelle annuelle. En particulier, la teneur en eau, paramètre qui conditionne le comportement hygrothermique du béton du chanvre, conserve année après année une évolution identique (cf. figure 7-31).

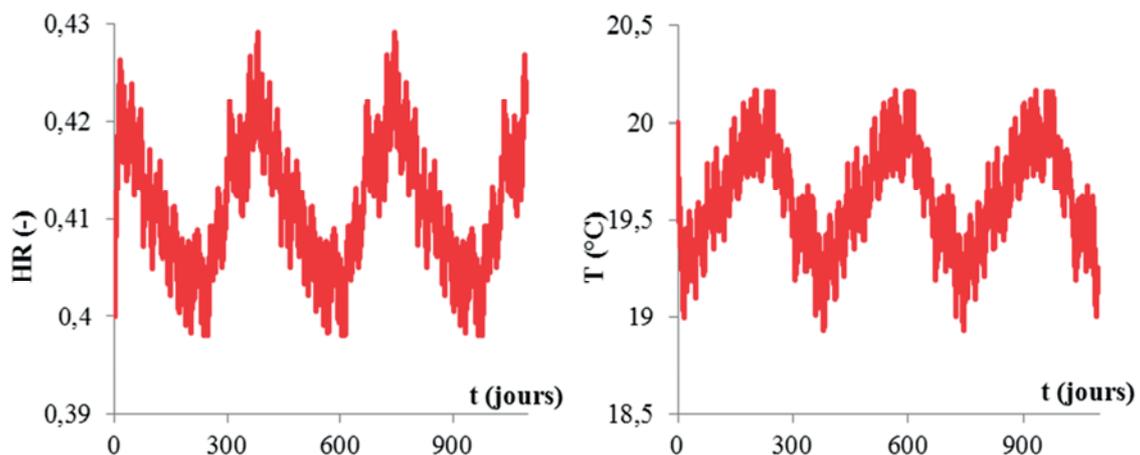


Figure 7-29 Humidité relative (à gauche) et température (à droite) de surface intérieure

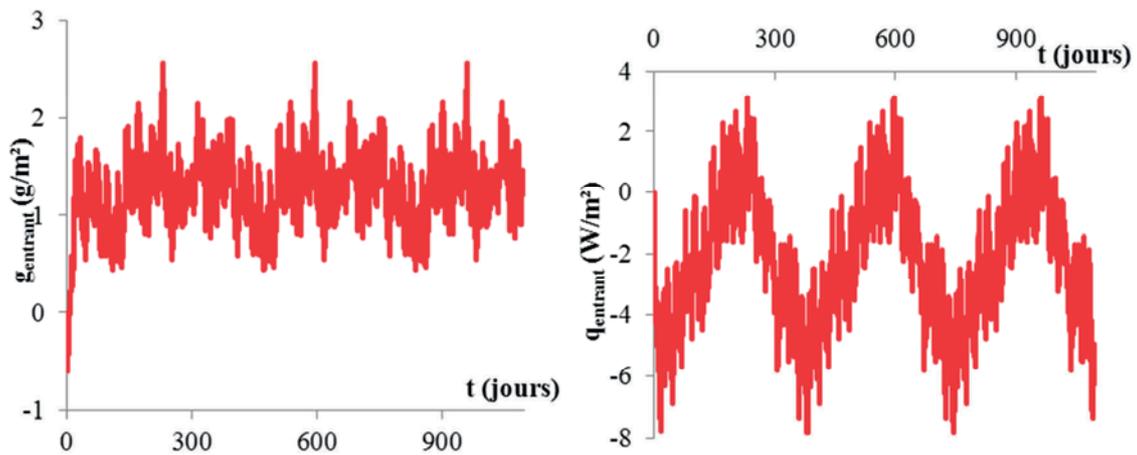


Figure 7-30 Flux de masse (à gauche) et de chaleur (à droite) entrants

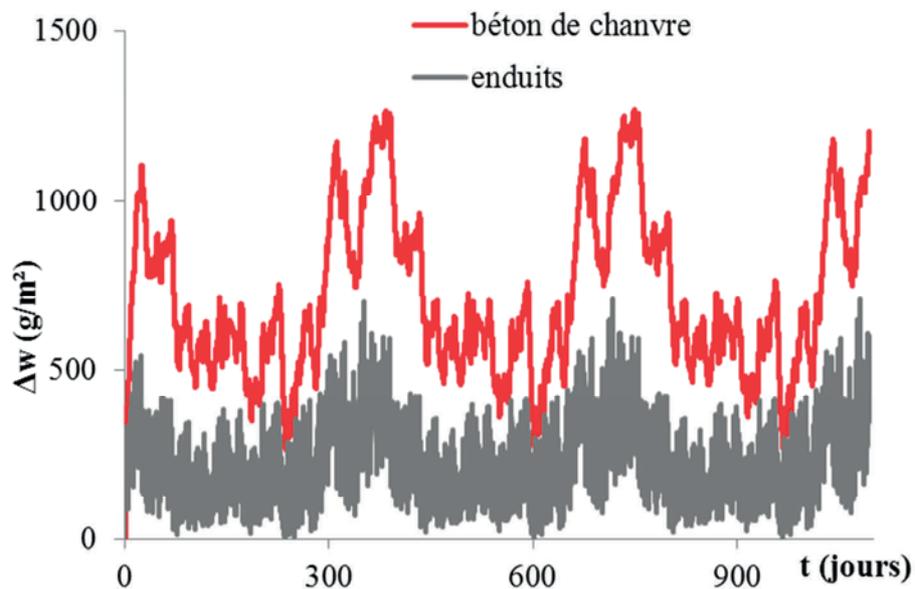


Figure 7-31 Evolution de l'accumulation teneur en eau de la paroi par rapport à la teneur en eau initiale pendant trois années de simulation

La couche d'enduit par son effet limitant de la circulation de l'humidité dans la partie courante en béton de chanvre et le niveau annuel toujours élevé de l'humidité relative explique en partie cette similarité de l'évolution de la teneur en eau.

7.3.3.3. Intérêt de l'enduit

Bien que la part de liant minéral soit largement prédominante, l'enduit chanvre/chaux est également composée de matière organique et à ce titre peut également voir se développer des moisissures d'autant plus qu'il est exposé aux conditions climatiques les plus sévères. Afin de prévenir la dégradation éventuelle de ce type d'enduit, il est plus prudent d'utiliser un enduit non organique. Le choix d'un enduit à base de chaux hydraulique pour sa mise en œuvre et ses propriétés perspirantes est un bon compromis.

L'utilisation de l'enduit chanvre/chaux sur la surface intérieure de la paroi en béton de chanvre est en revanche pleinement justifiée puisqu'elle permet de préserver sa capacité de régulation hygrothermique.

A titre informatif, il est légitime de s'intéresser à l'évolution de la teneur en eau à l'entrée de la partie courante en béton de chanvre qui est susceptible d'atteindre les valeurs les plus importantes. La figure 7-32 compare ainsi les valeurs de teneurs en eau obtenues avec l'enduit extérieur ECC à celles obtenues à partir d'une solution constructive identique où l'enduit extérieur est un l'enduit chaux/plâtre ECP présenté au paragraphe 7.1.

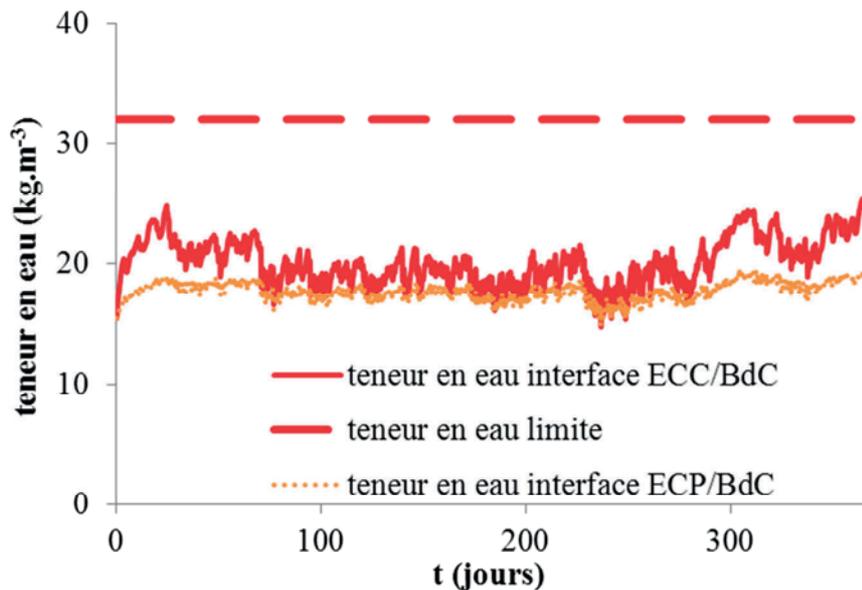


Figure 7-32 Evolution de la teneur à l'interface enduit/béton de chanvre

L'utilité de l'enduit extérieur apparaît dans cette application pleinement justifiée dans la mesure où elle évite à la partie courante en béton de chanvre d'atteindre des teneurs en eau trop élevées favorables à l'apparition de moisissures. Malgré des humidités relatives extérieures très élevées, la teneur en eau reste nettement en deçà de la valeur seuil retenue. Toutefois, comme indiqué en préambule, le flux liquide de surface extérieure apparaissant en cas de pluie n'est pas pris en compte. En conséquence, dans ces conditions, la teneur en eau du béton de chanvre peut atteindre des valeurs plus élevées.

Finalement, le choix et le dimensionnement de l'épaisseur de l'enduit doivent répondre à un cahier des charges intégrant la prise en compte de la pluie et imposant une teneur en eau maximale susceptible d'être atteinte par la partie courante en béton de chanvre.

Comme montré au paragraphe 7.2., l'enduit ECP est moins favorable au transport d'humidité que l'enduit ECC réduisant ainsi la teneur en eau à l'interface enduit/béton de chanvre. Quelle conséquence sur la réponse hygrothermique à l'échelle de l'année a ce choix d'enduit ? Le paragraphe suivant aura pour objectif d'y répondre.

7.4. Comparaison de différentes solutions constructives

L'objectif de cette étude est de comparer les réponses hygrothermiques de solutions constructives différentes sous sollicitations climatiques annuelles typiques.

7.4.1. Présentation des solutions constructives étudiées

Quatre types de paroi sont étudiés. Trois sont définis à partir d'une partie courante en béton de chanvre sur laquelle est apposée une couche d'enduit sur les surfaces externes. Les bétons de chanvre analysés sont les bétons Easy R et Easy P déjà présentés dans ce travail au cours des chapitres précédents. Le quatrième type de paroi étudié est à base de béton cellulaire (noté ACC pour *aerated cellular concrete*). Dans la configuration étudiée, une couche d'enduit classique (Ecl présenté au paragraphe 7.2.) est apposée sur sa surface extérieure et une couche de plâtre sur sa surface intérieure. La figure 7-33 présente les trois types de paroi étudiés. Les dimensions des parois sont celles régulièrement rencontrées en application courante.

Comme l'enduit Ecl, les propriétés du béton cellulaire et du plâtre sont présentées dans les travaux d'Evrard [Evrard 2008] et proviennent de la librairie de matériaux du logiciel WUFI. Le lecteur intéressé pourra s'y référer pour toute information complémentaire.

Les propriétés des différents matériaux à l'état sec sont présentées dans le tableau 7-3.

Matériau	Porosité totale (%)	Masse volumique apparente [kg.m ⁻³]	Capacité thermique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Conductivité thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Facteur de résistance à la vapeur
Easy R	78 (67 ouverte)	450	1250	0,117	3,91
Easy P	85 (77 ouverte)	320	1250	0,091	1,955
ACC	77 (43,5 ouverte)	500	850	0,12	8

Tableau 7-3 Synthèse des caractéristiques à l'état sec des matériaux étudiés

Il est à noter que le béton cellulaire possède une porosité ouverte plus faible que celles des bétons de chanvre. Bien qu'il possède des propriétés thermiques équivalentes (conductivité et capacité thermiques), son facteur de résistance à la diffusion de la vapeur est ainsi bien plus élevé.

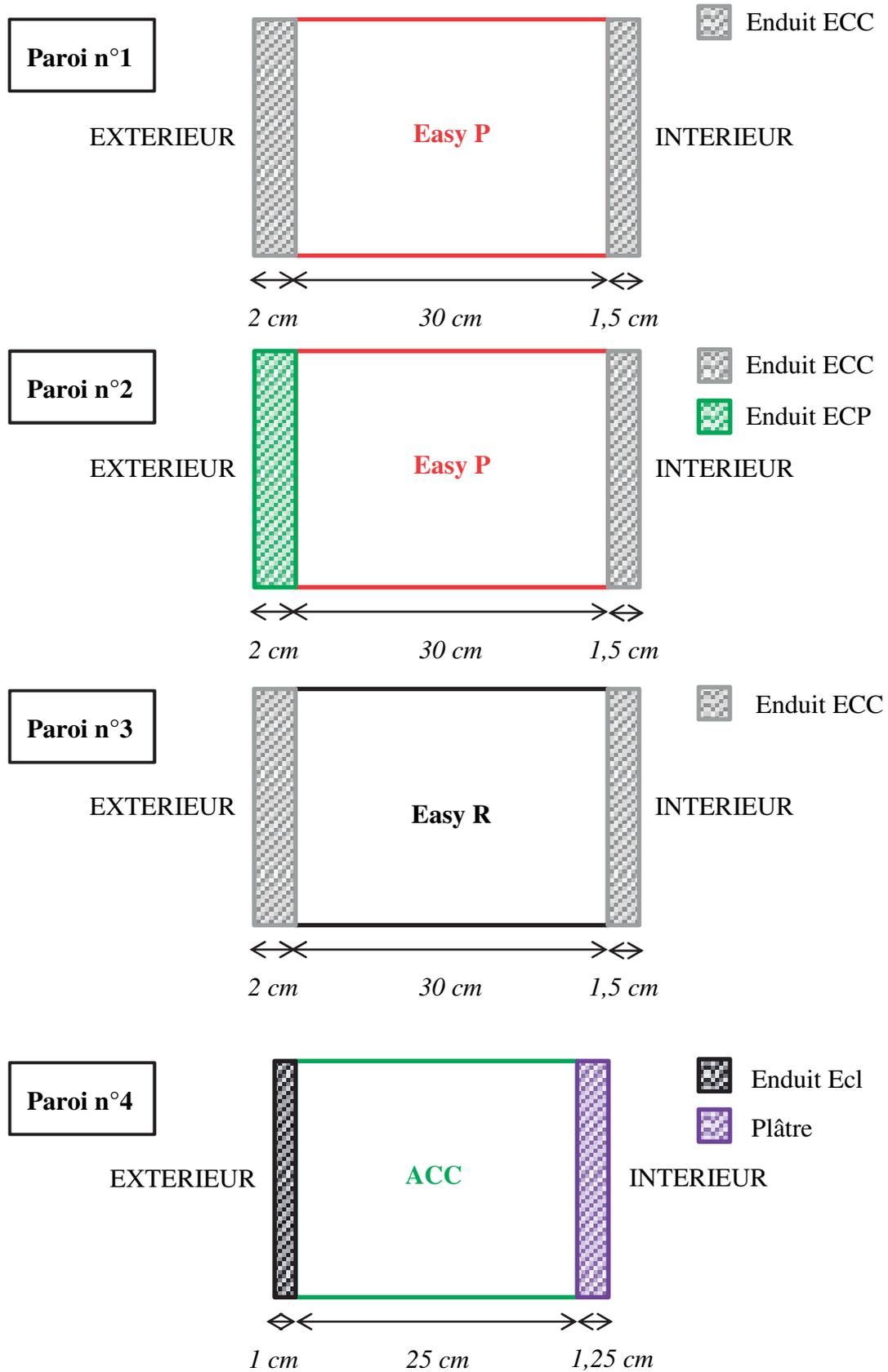


Figure 7-33 Solutions constructives étudiées

La courbe d'adsorption principale du béton cellulaire ACC est construite à partir du modèle de Van Genuchten auquel est appliquée la méthode des moindres carrés pour déterminer ses paramètres. Les paramètres obtenus sont ainsi : $\alpha_{\text{ads}} = 0,0082$ et $\eta_{\text{ads}} = 2,033$ avec $u_{\text{sat}} = 0,87$ kg/kg.

La figure 7-34 représente les courbes d'adsorption principale des différents matériaux.

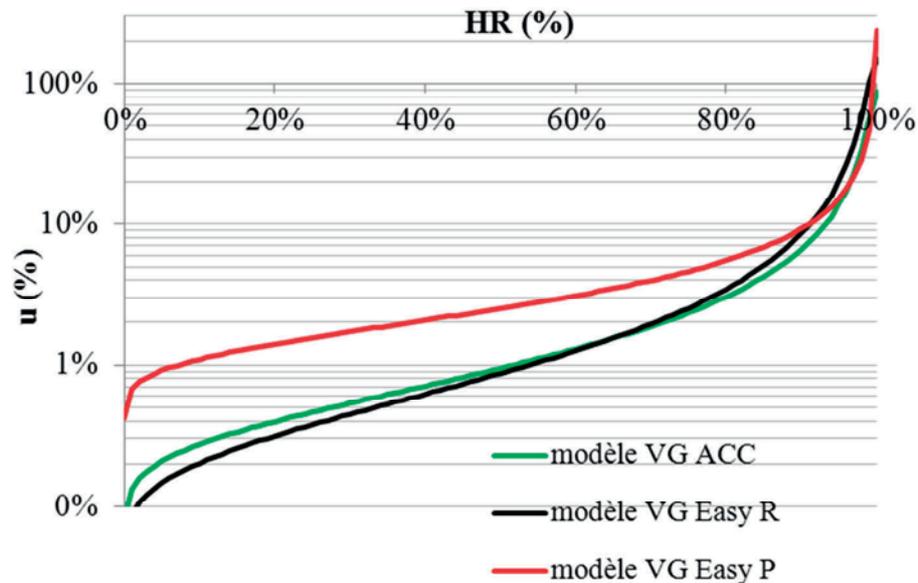


Figure 7-34 Courbes d'adsorption principale des matériaux étudiés

La figure 7-31 montre que les courbes d'adsorption principales du béton de chanvre Easy R et du béton cellulaire ACC sont assez similaires. Toutefois, le manque de données ne permet pas de modéliser le phénomène d'hystérésis qui caractérise l'évolution de la teneur en eau de ce dernier.

En outre, les paramètres de diffusivité, d'effusivité hydriques et thermiques et de capacité de régulation hydrique (MBV) sont autant d'indicateurs qui permettent de comparer et mieux comprendre le comportement des différents matériaux (cf. annexe F).

7.4.2. Résultats de la simulation

7.4.2.1. Distributions d'humidité relative et de température annuelles

Les réponses numériques sont présentées dans un premier temps aux positions $x = 22,5$ cm, $x = 18,5$ cm, $x = 11,5$ cm et $x = 7,5$ cm à l'intérieur de la partie courante en béton de chanvre d'une part et de la partie courante en béton cellulaire d'autre part. Les distributions d'humidité et de température de la paroi^o1 ont été présentées précédemment (cf. paragraphe 7.3.3.1, figures 7-23 et 7-24) et ne sont pas reproduites ici.

Paroi n°2 - ECP/Easy P/ECC - :

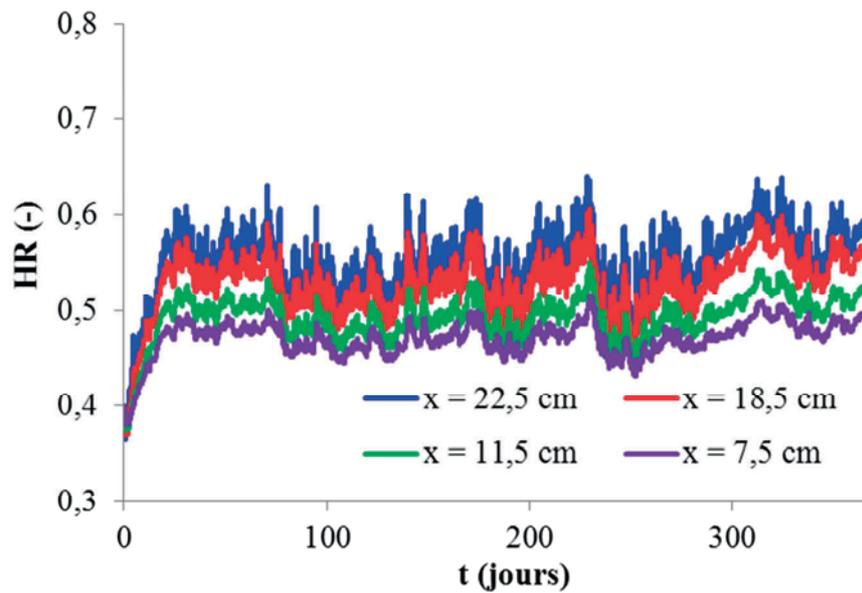


Figure 7-35 Distributions d'humidité relative - paroi n°2 -

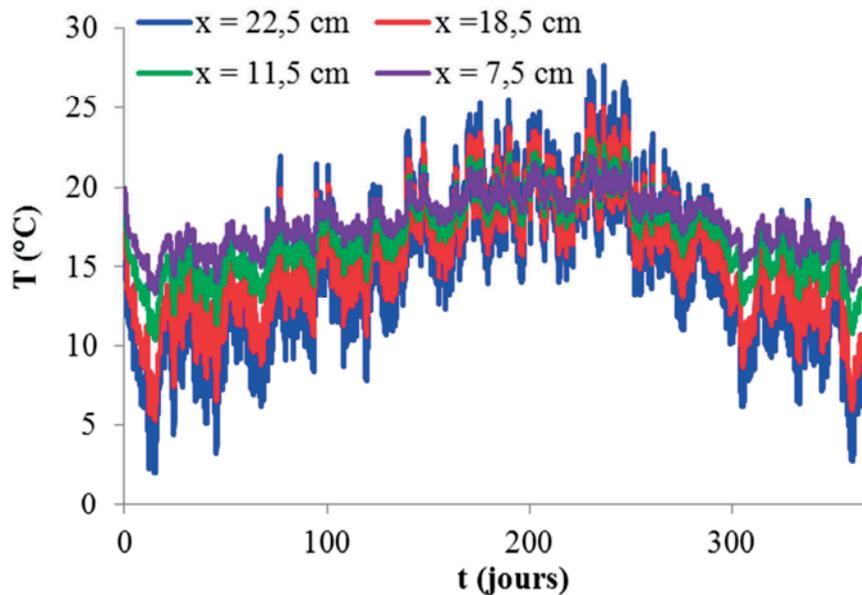


Figure 7-36 Distributions de température - paroi n°2 -

L'enduit ECP plus résistif à la migration de l'humidité réduit sensiblement l'amplitude de l'humidité relative dans la partie courante en béton de chanvre. La température est en revanche peu affectée.

Paroi n°3 - ECC/Easy R/ECC - :

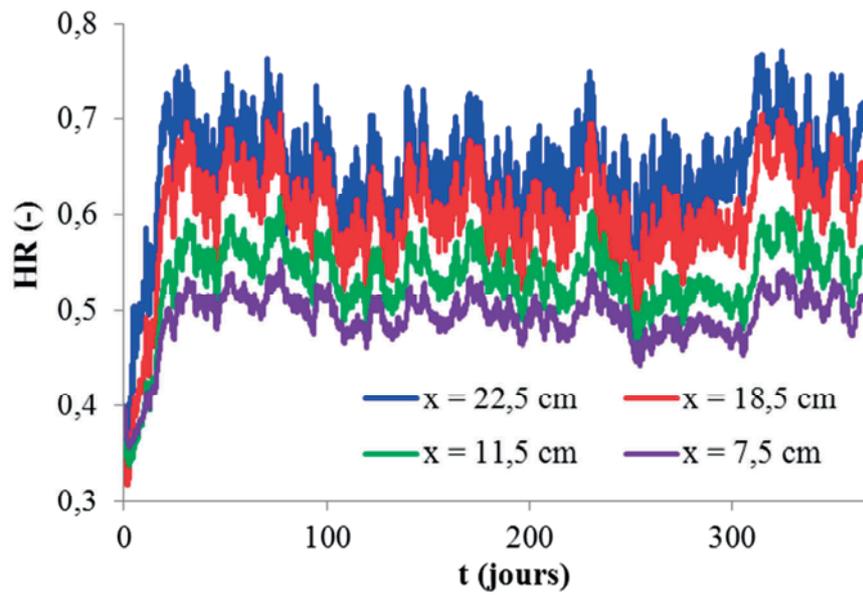


Figure 7-37 Distributions d'humidité relative - paroi n°3 -

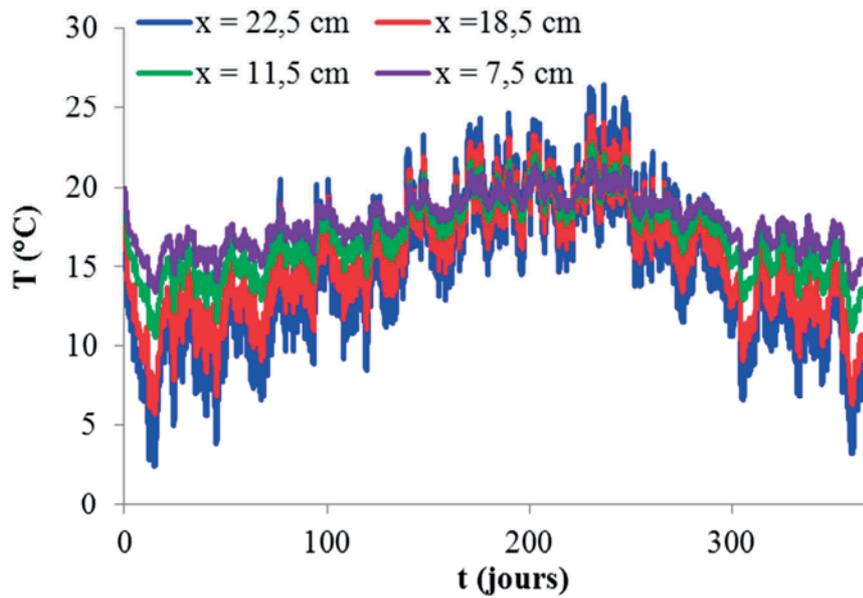


Figure 7-38 Distributions de température - paroi n°3 -

Paroi n°4 - Ecl/ACC/plâtre - :

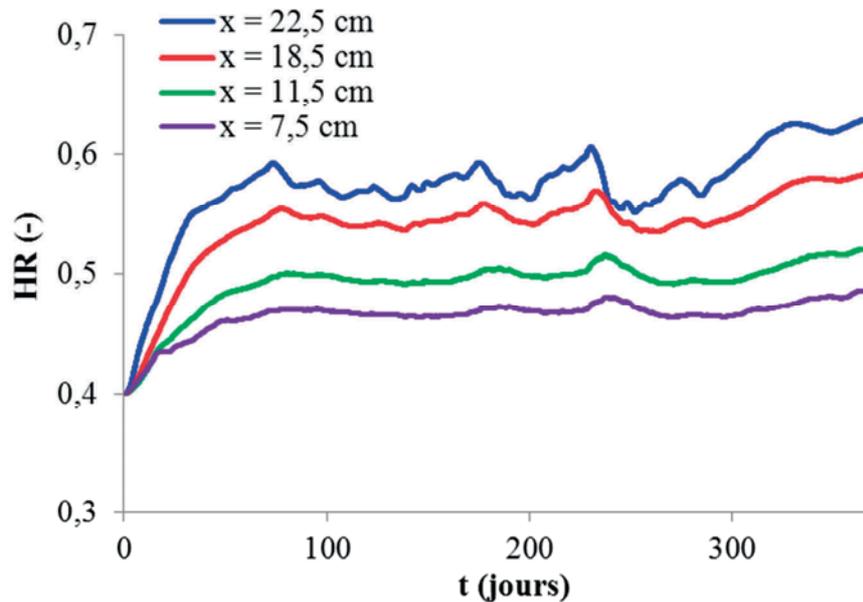


Figure 7-39 Distributions d'humidité relative - paroi n°4 -

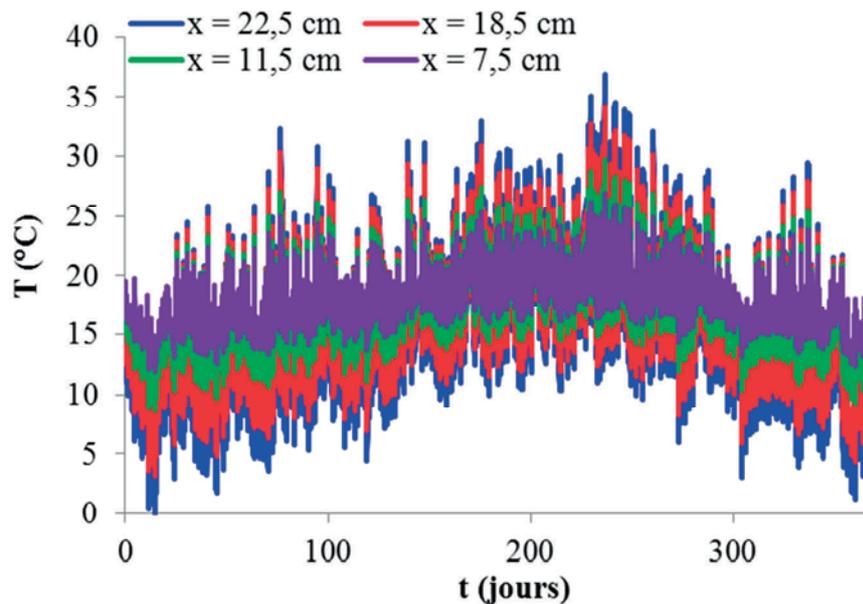


Figure 7-40 Distributions de température - paroi n°4 -

Comme le béton de chanvre, le béton cellulaire est un matériau à isolation répartie ce qui explique les distributions de températures observées. Les faibles variations d'humidité relative (par rapport aux résultats obtenus avec du béton de chanvre) sont liés au degré de modélisation adopté sans prise en compte du phénomène thermodépendant d'hystérésis.

7.4.2.2. Comparaison des paramètres de surface intérieure

A l'instar du travail effectué précédemment sur la paroi en béton de chanvre Easy P au paragraphe 7.3., l'analyse des réponses des différentes parois est portée sur l'évolution des

paramètres de surface intérieure qui servent d'indicateurs au confort hygrothermique. Ainsi, la figure 7-41 représente les évolutions de l'humidité relative et de la température de la surface intérieure des différentes parois étudiées.

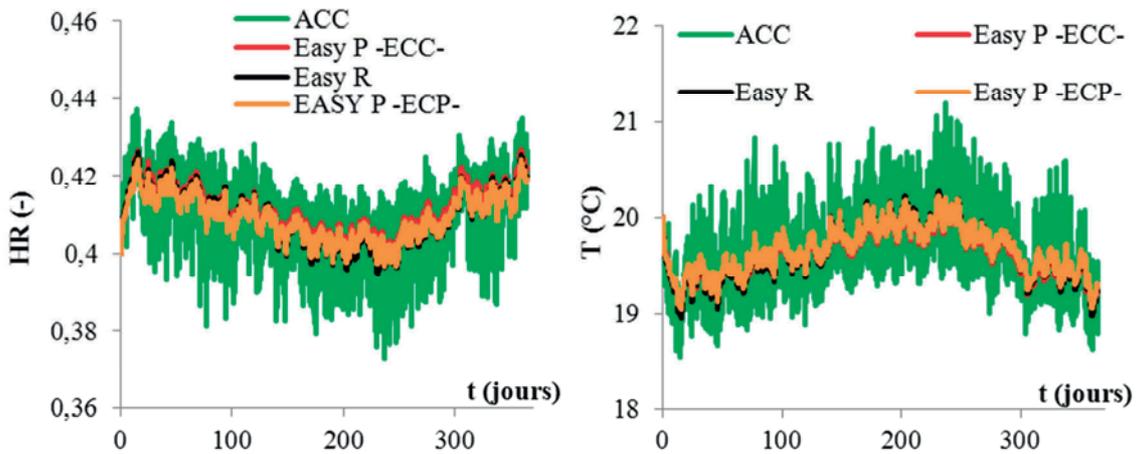


Figure 7-41 Humidités relatives (à gauche) et températures (à droite) de surface intérieure des différentes solutions constructives

Les parois en béton de chanvre permettent d'obtenir des humidités relatives et températures de surface intérieure moins fluctuantes que celles de la paroi en béton cellulaire. Les différences entre les bétons de chanvre Easy R et Easy P restent limitées bien qu'elles soient légèrement plus marquées en été.

La représentation des flux entrants permet en outre de mieux identifier les échanges qui ont lieu entre la paroi et l'environnement intérieur (figure 7-42).

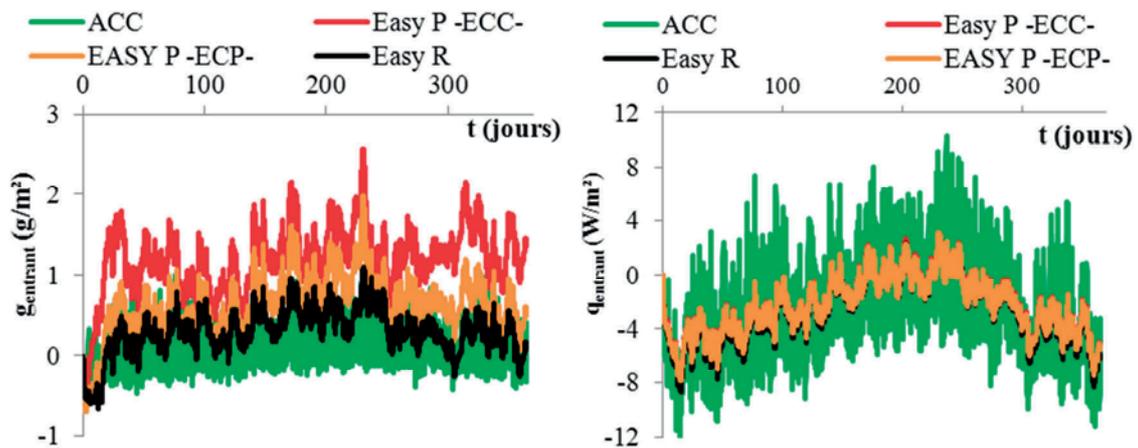


Figure 7-42 Flux de masse (à gauche) et de chaleur (à droite) entrants

Il est tout d'abord à noter que les solutions constructives à base de béton de chanvre favorisent davantage la migration de l'humidité puisque le flux de masse entrant est plus important. Le béton de chanvre Easy P se singularise par des valeurs nettement plus élevées. En ce sens, ce dernier assure une meilleure régulation de l'hygrométrie. En outre, les parois en béton de chanvre assurent une meilleure isolation en limitant les pertes de chaleur de l'intérieur vers la paroi en période hivernale et les gains en période estivale.

7.4.2.3. Discussion sur la notion de confort d'hiver / confort d'été

L'analyse précédente a montré l'intérêt de la solution béton de chanvre de manière globale à l'échelle à l'année mais ne permet pas d'apprécier la gestion des flux de chaleur et d'humidité sur les cycles jour/nuit. Dans cette étude, on se place donc à l'échelle de la journée. On distingue par ailleurs les situations hivernale (confort d'hiver) et estivale (confort d'été). Pour la première, les deux premiers jours du mois de décembre sont analysés et pour la seconde les deux premiers jours du mois d'août.

Afin de distinguer les cycles jour/nuit, on considère le flux solaire incident reçu par la paroi (cf. figure 7-43).

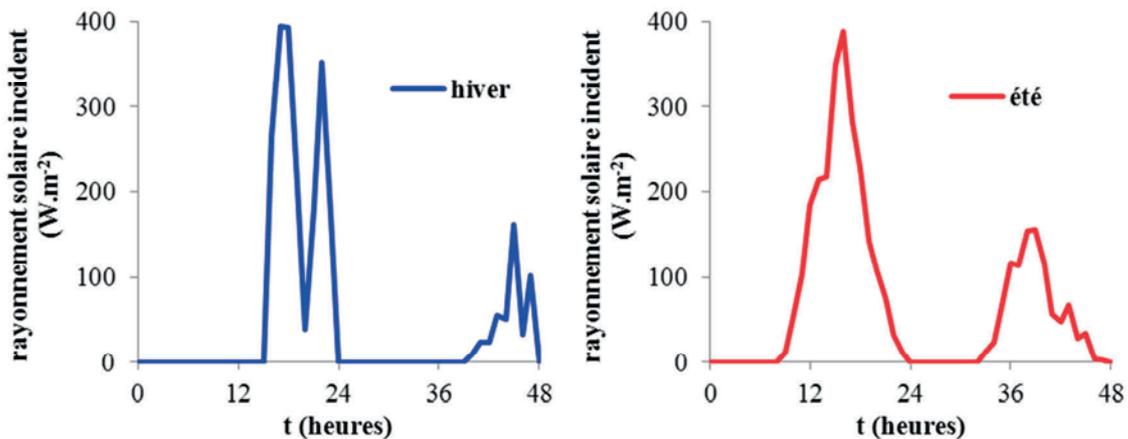


Figure 7-43 Rayonnement solaire incident à la paroi : configuration hivernale (à gauche) et estivale (à droite)

Dans chaque cas, on retrouve une journée typique ensoleillé où le flux solaire reçu atteint des valeurs élevées et une journée nuageuse où le flux solaire est plus faible. Ce qui distingue les deux situations est la durée d'ensoleillement, plus longue en été.

Les résultats obtenus en termes de flux entrants pour les différentes parois étudiés sont présentés figure 7-44 et 7-45 respectivement en hiver et en été.

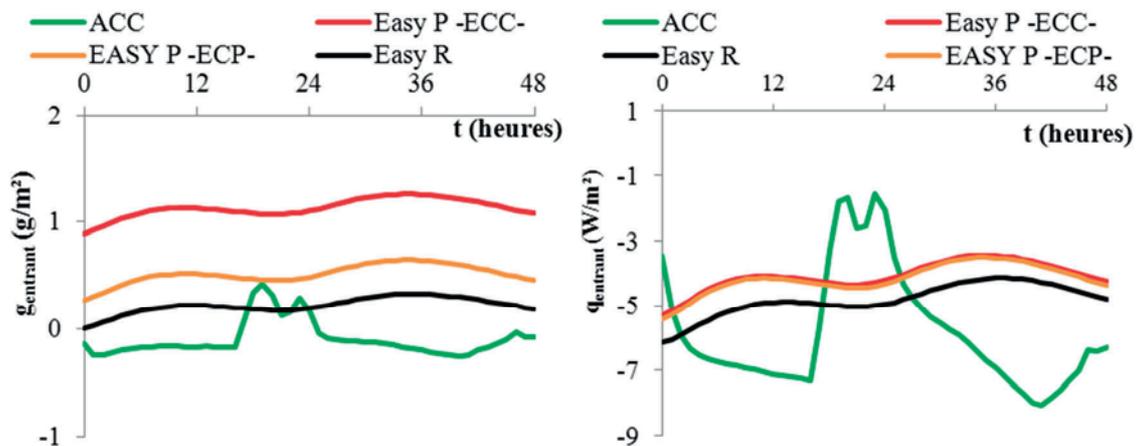


Figure 7-44 Flux de masse (à gauche) et de chaleur (à droite) entrants -hiver-

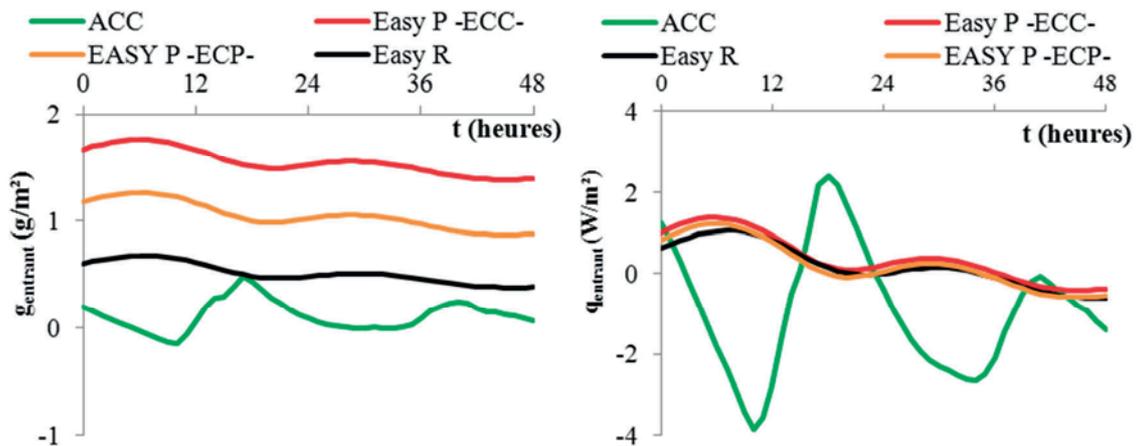


Figure 7-45 Flux de masse (à gauche) et de chaleur (à droite) entrants -été-

Il est intéressant de noter que la réponse de la paroi en béton cellulaire se distingue radicalement de celles des parois en béton de chanvre. D'un point de vue hydrique, les résultats obtenus à cette échelle d'étude hiver comme été viennent corroborés ceux observés à l'échelle annuelle : le béton de chanvre permet une meilleure circulation de l'humidité vers l'ambiance intérieure. Du point de vue thermique, à l'inverse de la paroi en béton cellulaire, les parois en béton de chanvre restituent pendant la nuit la chaleur accumulée en journée. Le couplage hygrothermique et les phénomènes d'évapo-condensation particulièrement actifs au sein du béton de chanvre expliquent ces résultats. En hiver, l'intérêt d'une telle réponse est évident autant d'un point de vue du confort que de réduction de la consommation énergétique. En revanche, en été, une chaleur nocturne ressentie n'est pas particulièrement désirée.

7.4.3. Bilan

L'étude réalisée permet, en partie, de justifier des qualités de confort hygrothermique assurée par la solution constructive en béton de chanvre. Sur toute l'année, la paroi en béton de chanvre régule le transport d'humidité en permettant sa migration. En été, elle permet de limiter l'apport de chaleur de l'extérieur vers la zone d'habitation et ainsi d'éviter d'atteindre des températures intérieures trop importantes préjudiciables au confort. Par ailleurs, les pertes de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur sont limitées durant les périodes hivernales. Les solutions constructives en béton de chanvre permettent de répondre aux exigences de confort hygrothermique d'hiver puisqu'elles permettent de restituer la nuit la chaleur accumulée en journée. L'intérêt du béton de chanvre dans la recherche du confort d'été est plus discutable dans la mesure où la chaleur restituée la nuit ne doit pas être trop importante au risque de nuire au sommeil. Le choix de ce matériau comme solution constructive est donc plus adapté à des climats tempérés où les chaleurs estivales ne sont pas trop importantes (typiquement le cas d'étude : région de Rennes) ou des climats qui connaissent d'importantes fluctuations jour/nuit (très chaud en journée, très froid la nuit).

7.5. Conclusion

Dans un premier temps, les effets de la nature de l'enduit ainsi que de son épaisseur sur le comportement thermohydrrique du béton de chanvre ont été analysés. Ils mettent en évidence la participation au stockage hydrique de l'enduit. Son rôle de frein à l'entrée de l'humidité dans la partie courante de la paroi en béton de chanvre en phase d'adsorption est associé à un rôle de frein à l'évacuation de l'humidité en phase de désorption. La réponse en température est conditionnée par la réduction des variations d'humidité au sein de la paroi due à la présence d'enduit. Le transport de chaleur lié aux phénomènes de changement de phase est en conséquence réduit ce qui limite les fluctuations de température. Le choix de l'enduit conditionne ainsi directement la capacité de régulation hygrothermique de la paroi en participant à une stabilisation de la teneur en eau au sein de la partie courante en béton de chanvre.

L'étude réalisée à l'échelle de l'année sous des sollicitations climatiques typiques de la région rennaise montre la capacité de régulation thermohydrrique d'une solution constructive en béton de chanvre. Elle favorise en effet la migration de l'humidité et limite les pertes de chaleur en hiver et les apports de chaleur en été. En outre, le béton de chanvre permet de répondre aux exigences de confort hydrique, été comme hiver, grâce à sa capacité de régulation de l'humidité. L'analyse des résultats a montré qu'il favorisait la restitution de chaleur accumulée en journée pendant la nuit. Les solutions constructives en béton de chanvre participent ainsi pleinement au confort thermique d'hiver. Sa participation au confort thermique d'été est plus discutable, justifié ou non selon le type de climat.

La régulation du transport d'humidité et de chaleur permet en outre de limiter le recours à des systèmes régulateurs complémentaires (chauffage en hiver, climatisation en été) et ainsi de limiter la consommation énergétique nécessaire pour répondre aux exigences de confort.

L'influence du climat et des conditions météorologiques est donc à étendre en considérant des zones climatiques différentes mais également d'autres orientations de paroi. La quantité d'eau liquide présente sur la surface extérieure générant un apport d'humidité supplémentaire lorsqu'il pleut est également à prendre en compte en complétant la collecte de données météorologiques.

Cependant, le travail effectué ne fournit qu'une vision partielle des qualités de confort et de réduction de consommation énergétique d'une enveloppe d'habitation en béton de chanvre. En effet, une modélisation plus complète de l'ambiance intérieure est à envisager. La justification des qualités de confort du béton de chanvre ne peut s'affranchir d'une étude à l'échelle de l'habitation ou pour le moins d'une pièce.

C onclusions et perspectives

L'utilisation du béton de chanvre dans le domaine de la construction est de plus en plus répandue. Ses qualités environnementales et énergétiques lui confèrent un avantage certain dans le cadre d'une démarche globale de développement durable. La compréhension de son comportement hygrothermique complexe et de sa réponse aux sollicitations climatiques constituent des enjeux majeurs pour le développement de cette solution technologique et de son intérêt face aux problématiques énergétiques et de confort dans le bâtiment.

Dans cet esprit, le chapitre 1 fait état d'un contexte environnemental et politique favorable à l'émergence de solutions constructives comme le béton de chanvre. L'analyse du contexte scientifique dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse a permis d'orienter les objectifs de recherche vers les aspects méconnus ou peu abordés tels que le caractère hystérétique du comportement hygrothermique du matériau ou l'effet de la température sur sa réponse hydrique.

Le chapitre 2 est consacré à la construction d'un modèle de transferts hygrothermiques en milieu poreux qui se veut le plus complet possible afin de produire la réponse juste d'un matériau soumis à des sollicitations thermohydriques complexes. En effet, la nature poreuse du béton de chanvre le rend favorable au transfert d'humidité, à la fois sous forme vapeur et liquide. Ce caractère perspirant influe sur les transferts de chaleur au sein du matériau en raison d'un fort couplage thermohydrique qui se traduit par des phénomènes d'évapo-condensation. En outre, une attention particulière est portée sur les échanges ambiance/paroi qui conditionnent la réponse hygrothermique du matériau (vent, rayonnement solaire, pluie...). La capacité du modèle à décrire les transferts dans de nombreuses configurations (multicouche, pluie, circulation d'air...) typiques du génie civil a par ailleurs été validée par confrontation aux résultats d'un benchmark international (Hamstad), montrant toute la pertinence du modèle retenu.

L'objectif du chapitre 3 était de modéliser les propriétés hygrothermiques du béton de chanvre constitutif de la paroi test. La caractérisation expérimentale de ce béton de chanvre a été envisagée mais malheureusement abandonnée en raison de la fragilité de l'échantillonnage. Pour surmonter cette contrainte, la caractérisation expérimentale s'est reportée sur un béton de chanvre de même composition mais de compacité supérieure. Le premier travail a tout

d'abord été de modéliser les propriétés hygrothermiques de ce béton référence. Une modélisation classique a été adoptée pour les différents paramètres hygrothermiques en conservant toutefois un regard critique sur les résultats expérimentaux. La seconde étape a été de relier les propriétés du béton de chanvre référence à celles du béton de chanvre constitutif de la paroi. Une étude bibliographique et une campagne expérimentale complémentaire ont été réalisées afin de cerner l'influence de la variation de masse volumique sur les propriétés hygrothermiques du béton de chanvre. Une modélisation des propriétés hygrothermiques du béton de chanvre constitutif de la paroi a ainsi été proposée. De cette étude il ressort une augmentation des capacités isolantes et de migration de l'humidité avec la diminution de la masse volumique. De plus, une diminution de masse volumique, dans des conditions hygrothermiques identiques, est favorable à une augmentation de la teneur en eau et une diminution de l'inertie hydrique du matériau.

Le chapitre 4 exploite les données expérimentales obtenues sur la paroi test : suivi des réponses en humidité relative et température en ambiance contrôlée. La confrontation des résultats expérimentaux avec les simulations permet de mettre en évidence l'impact de la variation de masse volumique sur la réponse de la paroi soumise à des sollicitations climatiques réalistes. Ainsi, un béton de chanvre de faible masse volumique favorable à la migration de l'humidité est également favorable à une augmentation des gradients de pression de vapeur au sein de la paroi, moteurs du transfert de chaleur par évapo-condensation, et donc des fluctuations de température. Cependant, la réponse numérique obtenue s'est révélée mal ajustée à la réponse expérimentale notamment en phase de désorption où les distributions de l'humidité relative au sein de la paroi ne sont pas respectées. Une étude de sensibilité aux paramètres de modélisation a été exploitée afin d'identifier les paramètres influents du modèle. Cette étude a ainsi permis de montrer que la teneur en eau associée à la masse volumique était le paramètre le plus influent du modèle. En effet, non seulement la teneur en eau conditionne l'évolution des propriétés hygrothermiques mais également l'inertie thermohydrique du matériau. Par ailleurs, il est apparu que les paramètres de diffusion d'humidité influent aussi sur les réponses hygrothermiques de manière importante.

La mauvaise reproduction de la réponse de la paroi en phase de désorption est interprétée dans ce travail par une mauvaise évaluation de la teneur en eau réelle de la paroi. Le caractère hystérétique de l'évolution de la teneur du béton de chanvre en est l'origine. Une campagne de caractérisation expérimentale de ce phénomène a tout d'abord été réalisée afin de construire des branches intermédiaires d'adsorption et de désorption. L'utilisation de modèles d'hystérésis s'est révélée adaptée pour reproduire le comportement expérimental du matériau. Dans un premier temps, l'exploitation des résultats expérimentaux de détermination de la capacité hydrique tampon (essais MBV) ont permis de valider le modèle proposé. L'histoire hydrique vécue par le matériau a ainsi montré son influence. A l'échelle de la paroi, elle a été discutée autour de l'introduction de gradients de teneur en eau initiale. A défaut de parfaitement reproduire la réponse expérimentale de la paroi, la prise en compte du phénomène d'hystérésis autorise une estimation réaliste de l'évolution des paramètres d'étude, température et humidité relative.

Au chapitre 6, l'étude s'est focalisée sur l'effet de la température sur le comportement hydrique du matériau. Le travail de caractérisation expérimentale a montré que la diminution de la température augmente l'hystérésis et la teneur en eau à une humidité relative donnée. La modélisation de ce phénomène hystérétique thermo dépendant repose sur l'hypothèse de déplacement de l'équilibre thermodynamique. Toutefois, malgré la prise en compte de ce phénomène dans le modèle complet de transferts, réponses numériques et expérimentales de la paroi soumise à un gradient d'humidité relative en conditions non isothermes connaissent quelques divergences. L'hypothèse avancée est une surestimation de la capacité hydrique du béton de chanvre à basse température. Une étude expérimentale plus approfondie est à envisager pour affiner la modélisation.

Au chapitre 7, le rôle d'une couche d'enduit apposée sur la partie courante en béton de chanvre est étudié à l'aide de l'outil de simulation. Les résultats mettent en évidence d'une part la participation au stockage hydrique de l'enduit et d'autre part son rôle de frein à l'entrée (respectivement à la sortie) de l'humidité en phase d'adsorption (respectivement désorption). Ce rôle joué par l'enduit perturbe la migration de l'humidité et limite ainsi les transferts de chaleur dus aux phénomènes de changement de phase. Finalement, l'étude est complétée en envisageant une configuration réelle d'utilisation. La notion de confort hygrothermique est discutée dans le cas de parois enduites exposées à des sollicitations climatiques annuelles typiques. A cette échelle, la prise en compte de l'hystérésis se révèle influente pour reproduire les variations quotidiennes d'humidité relative. L'estimation du flux d'humidité entrant est ainsi apparue largement tributaire du degré de modélisation retenu. Plusieurs solutions constructives en béton de chanvre ont été étudiées et comparées à un autre type de paroi à base de béton cellulaire qui possède également des propriétés hygrothermiques intéressantes. Au terme de cette étude, la capacité thermohygro régulatrice élevée du béton de chanvre lui confère un avantage certain à plus d'un titre. Tout d'abord, elle permet à la paroi d'assurer un échange d'humidité entre les ambiances intérieures et extérieures favorable au confort hydrique des occupants. De plus, elle limite les déperditions hivernales et accumulations estivales de chaleur. Par ailleurs, grâce au transfert de chaleur par évapo-condensation, elle répond aux exigences de confort d'hiver en restituant la nuit la chaleur accumulée en journée. Son intérêt pour satisfaire au confort d'été est à relativiser en fonction du climat rencontré, puisque des niveaux de chaleur trop élevés en journée impliquent en conséquence une chaleur ressentie trop importante la nuit, ce qui n'est pas recommandée.

Le béton de chanvre est un système constructif élaboré afin d'assurer plusieurs fonctions de régulation thermohydrrique, d'isolation thermique et acoustique. Son comportement en fait une solution crédible pour répondre aux exigences de préservation de l'environnement, de confort et de réduction de consommation énergétique.

Ces travaux de thèse qui s'appuient sur l'analyse du comportement hystérétique thermodépendant du béton de chanvre et l'étude des transferts hygrothermiques ont permis d'aboutir au développement d'un outil de simulation efficace pour estimer la réponse hygrothermique d'une paroi. Il doit permettre d'optimiser la conception de paroi voire la formulation du matériau en intégrant les notions de confort thermohydrrique.

En outre, l'étude réalisée ouvre de nombreuses pistes de réflexion.

Du point de vue de la caractérisation du matériau, l'étude de l'effet de la température sur le comportement hygrothermique du matériau est à poursuivre et affiner. Le transfert de l'air à travers le matériau a été admis négligeable dans ce travail. Des mesures de perméabilité à l'air complémentaires à celles de la littérature doivent être envisagées afin de justifier cette hypothèse. Ces mesures seraient également intéressantes en présence d'enduits.

Par ailleurs, la modélisation des échanges ambiance/paroi, aussi bien extérieurs qu'intérieurs, est à améliorer. Le recours à des logiciels de simulation de dynamique des fluides CFD peut s'avérer être un outil adapté.

L'étude à l'échelle annuelle est à compléter avec des données météorologiques plus larges comme la pluie. Différents types de climats sont aussi à envisager si l'on souhaite justifier de la pertinence du béton de chanvre pour satisfaire au confort d'été.

Enfin, l'étude réalisée doit permettre de s'intéresser sereinement à l'échelle système, c'est-à-dire de la pièce ou de l'habitation. Cette approche est indispensable pour justifier pleinement de la solution béton de chanvre en termes de confort et d'économie d'énergie. Scénarios d'occupation, gestion de la luminosité, des systèmes de chauffage/climatisation et de ventilation naturels ou artificiels, ponts thermiques et hydriques, sont autant de paramètres à intégrer à ce type d'étude.

Références

- Aït Ouméziane Y., Bart M., Moissette S., Lanos C., Pretot S., Collet F.,** 2011, Hygrothermal behaviour of a hemp concrete wall : influence of sorption isotherm modelling, *9th Nordic Symposium on Building Physics*, Tampere, Finlande
- Aït Ouméziane Y., Moissette S., Bart M., Lanos C.,** 2011, Modélisation du transfert de chaleur et de masse : impact de la perméabilité à l'air et de l'hystérésis pour le béton de chanvre, *29^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Tlemcen, Algérie
- ANR "betonchanvre",** 2010, Béton Chanvre, *Rapport Projet ANR-06-MAPR-0002*, UEB Rennes/Lorient, Université de Nantes, France
- Arnaud L.,** 2000, Mechanical and thermal properties of hemp mortars and wools : experimental and theoretical approaches, *3rd international symposium bioresource hemp and other fiber crops*, Wolfsburg, Allemagne
- Arnaud L., Cerezo V., Samri D.,** 2006, Global approach for the design of building material containing lime and vegetables particles, *6th International Symposium on Cement and Concrete*, Xi'an, Chine
- Artola P.A.,** 2009, Etude théorique et numérique de l'effet Soret, *Thèse de doctorat*, Université Paris-Sud, France
- Berdhal P., Martin M.,** 1984, Characteristics of infrared sky radiation in the United States, *Solar Energy*, col 33, n°3/4, p 321-336, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California-Berkeley, Etats-Unis
- Berit T.,** 1998, Hygroscopic moisture transport in wood, *Thèse de doctorat*, Norwegian University of Science and Technology, Norvège
- Brooks R.H., Corey A.T.,** 1964, Hydraulic properties of porous media, *Hydrology papers*, Colorado State Univeristy, Etats-Unis
- Brue F.,** 2009, Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydro-mécanique des bétons, *Thèse de doctorat*, Ecole Centrale de Lille, France
- Brunauer S., Emmet P.H., Teller E.,** 1938, Adsorption of gases in multimolecular layers, *Journal of the American Chemical Society*, vol 60, p 309-319
- Brunauer S., Deming L.S., Deming W.S., Teller E.,** 1940, On a theory of Van der Waals adsorption of gases, *Journal of the American Chemical Society*, vol 62, n°7, p 1723-1732

-
- Carmeliet J., De Wit M., Janssen H.,** 2005, Hysteresis and moisture buffering of wood, 7th *Nordic Symposium on Building Physics*, Reykjavik, Islande
- Cerezo V.,** 2005, Propriété mécanique thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, *Thèse de doctorat*, ENTPE Lyon, France
- Chamoïn J.,** 2013, Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de béton de chanvre à partir de la maîtrise de la formulation, *Thèse de doctorat*, INSA UEB, Rennes, France
- Chamoïn J., Collet F., Pretot S.,** 2008, Optimisation de bétons de chanvre projeté et moulé - caractérisation du matériau de référence, 26^{ème} *Rencontres Univeristaires de Génie Civil*, Nancy, France
- Chamoïn J., Collet F., Pretot S.,** 2010, Perméabilité à l'humidité de matériaux à base de chaux et chanvre, 28^{ème} *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, La Bourboule, France
- Clear R.D., Gartland L., Winkelmann F.C.,** 2003, An empirical correlation for the outside convective air-film coefficient for horizontal roofs, *Energy and Buildings*, vol 35, issue 8, p 797-811
- Collet F.,** 2004, Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux, *Thèse de doctorat*, INSA Rennes, France
- Collet F., Bart M., Serres L., Miriel J.,** 2008, Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials, *Construction and Building Materials*, vol 22, p 1271-1280, INSA UEB
- Collet F., Pretot S., Chamoïn J., Lanos C.,** 2009, Improvement of manufacturing process and performances of hempcrete – Hydric characterization of reference hempcrete, 4th *International Building Physics Conference*, Istanbul, Turquie
- Collet F., Pretot S., Lanos C.,** 2011, Etude expérimentale du comportement hygrothermique d'une paroi en blocs de béton de chanvre avec ossature en bois, 29^{ème} *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Tlemcen, Algérie
- Collet F., Pretot S.,** 2012, Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete , *Construction and Building Materials*, vol 36, p 58-65
- Couasnet Y.,** 1989, Contribution à l'étude du transfert de vapeur d'eau en régime permanent et non stationnaire dans les matériaux poreux hygroscopiques, *Thèse de doctorat*, ENPC Paris, France
- Cull J.P.,** 1974, Thermal conductivity probes for rapid measurments in rock, *Journal of Physics : scientific instruments*, vol 7, p 771-774
- Daïan J.F.,** 1988, Condensation and isothermal water transfer in cement mortar Part I - Pore size distributio, equilibrium water condensation and imbibition, *Transport in Porous Media*, vol 3, n°6, p 563-589
- De Freitas V.P., Abrantes V., Crausse P.,** 1996, Moisture migration in building walls - analysis of the interface phenomena, *Building and Environment*, vol 31, n°3, p 99-108
- De Vries D.A.,** 1958, Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media, *Transaction of the American Geophysical Union*, vol 39, n°5, p 909-916
-

- Derluyn H., Janssen H., Diepens J., Derome D., Carmeliet J.,** 2007, Hygroscopic Behavior of Paper and Books, *Journal of Building Physics*, vol 31, n°1, p 9-34
- Drouet E.,** 2010, Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires - prise en compte des transferts hydriques, *Thèse de doctorat*, ENS Cachan, France
- Dwi Argo B.,** 1994, Détermination expérimentale de l'influence de l'hystérésis sur les propriétés hydriques des matériaux de Génie Civil, *Thèse de doctorat*, INSA Toulouse, France
- Evrard A.,** 2008, Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials, *Thèse de doctorat*, Université Catholique de Leuven, Belgique
- Evrard A., De Herde A.,** 2010, Hygrothermal performance of lime-hemp wall assemblies, *Building Physics*, vol 34, issue 1, p 5-25
- Evrard A.,** 2006, Sorption behaviour of Lime-Hemp Concrete and its relation to indoor comfort and energy demand, *23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Genève, Suisse
- Ferret E., Iaconelli C.,** 2011, Utilisation de Comsol Multiphysics dans la réalisation de modèles numériques : une aide au calcul et à l'interprétation de phénomènes physiques complexes, GMN 3A, Agrosup Dijon, France
- Frandsen H.L.,** 2005, Modelling of moisture transport in wood, *Wood science and timber engineering Paper n°1, 2nd edition*, Aalborg University, Danemark
- Galbraith G.H., Mclean R.C., Guo J.,** 1997, Moisture permability data presented as a mathematical function applicable to heat and moisture transport models, *5th International Building Performance Simulation Association Conference*, Pragues, République Tchèque
- Garcia Jaldon C.,** 1995, Caractérisation morphologie et chimique du chanvre (cannabis sativa), prétraitement à la vapeur et valorisation, *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier, Grenoble, France
- Garnier C., Prétot S., Collet F.,** 2012, Life assessment of hemp concrete wall manufactured by spraying, *2nd International conference on building energy and environment*, Boulder, Colorado, Etats Unis
- GIEC,** 2007, Contribution of working groups I, II and III to the IVth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, *Climate Change : Synthesis Report*, Genève, Suisse
- Goudet L.,** 2008, Une démarche nationale pour un matériau peu conventionnel : le béton de chanvre, *Développement chanvre, conférence CCIM*, Vannes, France
- Hagentoft C.E.,** 2001, Hamstad WP2 modeling V4, *Final report*, Department of Building Physics, Chalmers University of Technology, Suède
- Hagentoft C.E.,** 2002, Hamstad WP2 benchmark package, *Final report : methodology of HAM modeling*, Chalmers University of Technology, Suède
- Hancox N.L.,** 1968, The role of moisture diffusion in the drying of cement paste under the influence of temperature gradients, *British Journal of Applied Physics*, vol 1, n°2, p 1759-1770
- Hladik J.,** 1990, Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux, *Collection mesures physiques*

- Huang H.C., Tan Y.C., Liu C.W., Chen C.H.,** 2005, A novel hysteresis model in unsaturated soil, *Hydrological Processes*, vol 19, n°8, p 1653-1665
- Hundt J., Kantelberg H.,** 1978, Sorptionsuntersuchungen an zementstein, zementmörtel und beton, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft*, vol 297, p 25-39
- Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L.,** 2006, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, *Fundamentals Sixth edition*
- Ineichen P., Gremaud J.M., Guisan O., Mermoud A.,** 1984, Infrared Sky Radiation in Geneva, *Solar Energy*, vol 32, n°4, p 537-545
- Ishida T., Maekawa K., Kishi T.,** 2007, Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *Cement and Concrete Research*, vol 37, n°4, p 565-578
- Janssen H.,** 2002, The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground, *Thèse de doctorat*, Université Catholique de Louvain, Belgique
- Janssen H.,** 2011, Thermal diffusion of water vapour transport in porous materials : Fact or fiction ?, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 54, p 1548-1562
- Janssen H., Roels S.,** 2009, Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures, *Energy and Buildings*, vol 41, p 382-394
- Jury W.A., Miller E.E.,** 1974, Measurement of the transport coefficients for coupled flow of heat and moisture in a medium sand, *Soil Science Society American Journal*, vol 38, p 551-557
- Kool J.B., Parker J.C.,** 1987, Development and evaluation of closed form expressions for hysteretic soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, vol 23, p 105-114
- Krus M.,** 1996, Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials. Theoretical principles and new test methods, *Fraunhofer IRB Verlag ISBN 3-8167-4535-0*, Stuttgart, Allemagne
- Künzel H.,** 1995, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components, *Fraunhofer IRB Verlag ISBN 3-8167-4103-7*, Fraunhofer IBP Stuttgart, Allemagne
- Kwiatkowski J., Woloszyn M., Roux J.J.,** 2009, Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials, *Building and Environment*, vol 44, p 633-642
- Langmuir L.,** 1918, The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, *Journal of the American Chemical Society*, vol 40, p 1361-1403
- Laroussi C.,** 1972, Analyse de l'interaction espace poreux fluide dans les problèmes de l'écoulement en milieu poreux non saturés, *Thèse de doctorat*, ENSAT, Toulouse, France
- Lefebvre R.,** 2006, Ecoulement et diffusion des gaz en milieu poreux, *Ecoulement multiphase en milieu poreux, chapitre 4*, INRS Québec, Canada
- Lehmann P., Stauffer F., Hinz C., Dury O., Flühler H.,** 1998, Effect of hysteresis on water flow in sand column with a fluctuating capillary fringe, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol 33, p 81-100
- Mendes N., Winkelmann F.C., Lamberts R., Philippi P.C.,** 2003, Moisture effects on conduction loads, *Energy and Buildings*, vol 35, issue 7, p 631-644
- Merakeb S., Dubois F., Petit C.,** 2008, Modélisation des hystérésis de sorption dans les matériaux hygroscopiques, *Comptes Rendus de Mécanique*, vol 337, p 34-39

- Merouani L.,** 1987, Phénomène de sorption et de transfert d'humidité dans les bâtiments : étude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade, *Thèse de doctorat*, INP Grenoble, France
- Milly P.C.D.,** 1982, Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media : a matric head-based formulation and a numerical model, *Water Resources Research*, vol 18, p 489-498
- Milly P.C.D.,** 1984, A linear analysis of thermal effects on evaporation from soil, *Water Resources Research*, vol 20, p 1075-1085
- Mualem Y.,** 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, vol 12, n°3, p 513-522
- Mualem Y.,** 1974, A conceptual model of hysteresis, *Water Resources Research*, vol 10, n°3, p 514-520
- Mualem Y., Beriozkin A.,** 2009, General scaling rules of the hysteretic water retention function based on Mualem's domain theory, *European Journal of Soil Science*, vol 60, p 652-661
- Navi P., Heger F.,** 2005, Comportement thermohydrromécanique du bois : applications technologiques et dans les structures, *PPUR Suisse*
- O'Dowd J., Quinn D.,** 2005, Investigating properties of hemp and lime construction, *Report*, Department of Civil Engineering, Dublin, Irlande
- Padet J.,** 2005, Convection thermique et massique, *Techniques de l'Ingénieur Section Génie Energétique, fascicule BE 8 205*
- Palyvos J.A.,** 2008, A survey of wind convection correlations for building envelope energy systems' modeling, *Applied Thermal Engineering*, vol 28, n°8-9, p 801-808
- Parker J.C.,** 1989, Multiphase flow and transport in porous media, *Reviews in Geophysics*, vol 27, n°3, p 311-328
- Pedersen C.R.,** 1990, Transient calculation on moisture migration using a simplified description of hysteresis in sorption isotherms, *2nd Nordic Symposium on Building Physics*, Trondheim, Norvège
- Perrin B.,** 1985, Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans des matériaux poreux consolidés non saturés, *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France
- Peukhuri R.,** 2003, Moisture dynamics in building envelopes, *Thèse de doctorat*, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark
- Philip J.R., De Vries D.A.,** 1957, Moisture movement in porous material under temperature gradients, *Transaction of the American Geophysical Union*, vol 38, n°2, p 222-232
- Powers T.C., Brownyard T.L.,** 1948, Studies of the physical properties of the hardened cement paste, *Portland Cement Association Bulletin* n°22
- Poyet S.,** 2009, Experimental investigation of the effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete, *Cement and Concrete Research*, vol 39, n°11, p 1052-1059
- Poyet S., Charles S.,** 2009, Temperature dependence of the sorption isotherms of cemented-based materials : heat of sorption and Clausius-Clapeyron formula, *Cement and Concrete Research*, vol 39, n°11, p 1060-1067

- Pretot S., Collet F., Glouannec P., Lang V.,** 2009, Variation des propriétés thermiques de bétons de chanvre en fonction de la formulation, *3^{ème} Congrès de la Société Française de Thermique*, Brest, France
- PRIR "ecomatx",** 2010, Eco-matériaux appliqués à la construction : Optimisation de la fabrication et étude du comportement thermique et hydrique du béton de chanvre, *Rapport Programme de Recherche d'Initiative Régionale*, UBS-INSA UEB, Lorient/Rennes, France
- Qiu X., Haghghat F., Kumaran K.,** 2003, Moisture transport across imperfect hydraulic contact interfaces between building materials, *Journal of Thermal Envelope Building Science*, vol 26, n°3, p213-236
- Radjy F., Sellevold E.J., Hansen K.K.,** 2003, Isosteric vapor-pressure-temperature data for water sorption in hardened cement paste : enthalpy, entropy and sorption isotherms at different temperatures, *Report BYG DTU R-057*, Technical University of Denmark
- Rode C., Hansen K.K.,** 2011, Hysteresis and temperature dependency of moisture sorption – new measurements, *9th Nordic Symposium on Building Physics*, Tampere, Finlande
- Rode C.,** 2005, Moisture buffering of building materials, *Report BYG DTU R-126, ISSN 1601–2917, ISBN 87-7877-195*
- Roels S., Janssen H.,** 2006, A Comparison of the Nordtest and Japanese Test Methods for the Moisture Buffering Performance of Building Materials, *Journal of Building Physics*, vol 30, n°2, p 137-161
- Samri D.,** 2008, Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique, *Thèse de doctorat*, ENTPE Lyon, France
- Stamm A.J.,** 1964, Wood and cellulose science, *Ronald Press, New York, Etats-Unis*
- Steman H.J.,** 2009, Modelling Local Hygrothermal Interaction between Airflow and Porous Materials for Building Applications, *Thèse de doctorat*, Université de Gent, Belgique
- Tariku F., Kumaran K., Fazio P.,** 2010, Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media , *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 53, p 3035-3044
- Taylor S.A., Cary J.W.,**1964, Linear equations for the simultaneous flux of matter and energy in a continuous soil system, *Soil Science Society American Journal*, vol 28, p 167-172
- Timusk P.C., Pressnail K.D., Stritesky V.F.,** 2005, Moisture related properties of oriented strand board, *10th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France
- Tran Le A.D.,** 2011, Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application a bâtiment , *Thèse de doctorat*, Université de Reims Champagne Ardennes, France
- Van Belleghem M., Steman H.J., Steman M., Janssens A., De Paepe M.,** 2010, Sensitivity analysis of CFD coupled non-isothermal heat and moisture modelling, *Building and Environment*, vol 45, p 2485-2496
- Van Genuchten M.Th.,** 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society American Journal*, vol 4, p 892-898

- Van Schijndel J.,** 2007, Integrated Heat Air end Moisture Modeling and Simulation, *Thèse de doctorat*, Technische Universiteit Eindhoven, Pays-Bas
- Vereecken E., Roels S., Janssen H.,** 2011, In situ determination of the moisture buffer potential of room enclosures, *Journal of Building Physics*, vol 34, n°3, p 223-246
- Whitaker S.,** 1997, Simultaneous heat mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying, *Advances in Heat Transfer*, vol 13, p 119-203
- Woloszyn M., Kalamees T., Abadie M.O., Steeman M., Kalagasidis S.,** 2006, The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings, *Building and Environment*, vol 44, issue 3, p 515-524
- Wong S.F., Wee T.H., Swaddiwudhipong S., Lee S.L.,** 2001, Study of water movement in concrete, *Magazine of Concrete Research*, vol 53, n°3, p 205-220
- Zaknoute A.,** 2012, Etude du comportement thermohydrrique de matériaux "chanvre-chaux" lors de la phase de séchage - Estimation par technique inverse des propriétés hydriques, *Thèse de doctorat*, UBS UEB, Lorient, France
- Zillig W., Carmeliet J., Derome D.,** 2005, Influence of the microstructure on the vapour transport in wood, *7th Nordic Symposium on Building Physics*, Reykjavik, Islande

AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

Titre de la thèse:

Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre

Nom Prénom de l'auteur : AIT OUMEZIANE YACINE

Membres du jury :

- Monsieur LAWRENCE Mike
- Monsieur GLOUANNEC Patrick
- Monsieur LANOS Christophe
- Monsieur BURLION Nicolas
- Madame BART Marjorie
- Madame MOISSETTE Sophie
- Madame WOLOSZYN Monika

Président du jury : *Patrick GLOUANNEC*

Date de la soutenance : 27 Mars 2013

Reproduction de la these soutenue

- Thèse pouvant être reproduite en l'état
 Thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées

Fait à Rennes, le 27 Mars 2013

Signature du président de jury

Le Directeur,

M'hamed DRISSI

