HAL
open science

Analyses expérimentales et numériques du comportement hygrothermique d'une paroi composée de matériaux fortement hygroscopiques

Yannick-Ariel Kedowide

To cite this version:

Yannick-Ariel Kedowide. Analyses expérimentales et numériques du comportement hygrothermique d'une paroi composée de matériaux fortement hygroscopiques. Génie civil. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. NNT : 2015GREAA015 . tel-01245319

HAL Id: tel-01245319

https://theses.hal.science/tel-01245319

Submitted on 17 Dec 2015

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

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

UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Génie civil et Sciences de l'Habitat**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Yannick - Ariel KEDOWIDE

Thèse dirigée par **Monika WOLOSZYN** et
codirigée par **Nolwenn LE PIERRES**

préparée au sein du **Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement**
dans **l'École Doctorale SISEO**

Analyses expérimentales et numériques du comportement hygrothermique d'une paroi composée de matériaux fortement hygroscopiques

Thèse soutenue publiquement le **07 Juillet 2015** ,
devant le jury composé de :

Mr Rafik BELARBI
Professeur, Université de la Rochelle, Rapporteur
Mr Joseph VIRGONE
Professeur, Université Lyon 1, Rapporteur
Mme Timea BEJAT
Ingénieur de recherches, CEA LITEN, Examinateur
Mr Bernard PERRIN
Professeur Emérite, Université Paul Sabatier Toulouse III, Examinateur
Mme Monika WOLOSZYN
Professeur, Université Savoie Mont Blanc, Directeur de thèse
Mme Nolwenn LE PIERRES
Maître des Conférences HdR, Université Savoie Mont Blanc, Codirecteur de thèse

Résumé

Les nouvelles exigences thermiques pour les bâtiments, plus strictes, ont rendu nécessaire la prise en compte des transferts de masse dans les parois de bâtiment et leur interaction avec les transferts thermiques, particulièrement dans le cas de celles composées de matériaux poreux très hygroscopiques.

Dans ce travail une importante campagne expérimentale a été conduite. Le dispositif expérimental est composé de deux parois montées et testées sur des cellules PASSYS orientables et à l'ambiance intérieure régulée, situées sur le site du CEA-INES au Bourget du Lac. Les parois, à ossature bois et à l'isolation en fibre de bois, ont été testées sous différentes conditions intérieures et extérieures, en fonction respectivement des consignes en température et en humidité, et de l'orientation. Les mesures expérimentales longues de plus d'une année ont mis en évidence l'influence des fluctuations en humidité sur le comportement thermique des parois testées, et inversement de l'influence des températures sur l'humidité dans les parois.

Un modèle numérique a été mis en oeuvre afin de simuler les phénomènes observés en conditions expérimentales. Le modèle, développé sur l'outil DYMOLA, a été validé par une comparaison avec d'autres modèles numériques existants, lors d'un benchmark sur des mesures expérimentales en conditions contrôlées. Il a ensuite été simulé les séquences expérimentales en conditions extérieures de ce travail. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux ont mis en évidence une concordance des mesures de température, mais des écarts ont été observés pour les mesures en humidité. Des ajustements paramétriques ont mis en évidence une surestimation de l'inertie hygrique combinée à une sous-estimation de la perméabilité à la vapeur du modèle numérique en comparaison aux séquences expérimentales. Une inadéquation des propriétés des matériaux telles que prises en compte généralement dans les modèles numériques, avec les conditions expérimentales dans lesquelles elles sont relevées est soulignée.

Abstract

More stringent thermal requirements for buildings made necessary the study of mass transfer in building walls and their interaction with heat transfer, particularly for those composed of porous and highly hygroscopic materials.

A large number of tests has been conducted. The experimental device consists of two walls mounted and tested on PASSYS orientable cells, with controlled indoor environment, located on the CEA-INES site in Le Bourget du Lac. The wood framed walls with a wood fiber insulation were tested under different internal and external conditions, depending respectively on internal monitored temperature and humidity, or orientation. The one-year long experimental measurements have shown the influence of moisture fluctuations on the thermal behavior of the tested walls, and also the influence of temperature on the moisture in the walls.

A numerical model was used to simulate the phenomena observed in experimental conditions. The model, developed on DYMOLA was first validated by a comparison with other existing numerical models, during a benchmark on experimental measurements under controlled conditions. It was then used to simulate experimental sequences with real external conditions. Comparing the numerical and experimental results have shown a good agreement for the temperature measurements, but a difference for the moisture measurements. Parametric adjustments showed an overestimation of the hygric inertia combined with an underestimation of the vapor permeability of the numerical model compared to experimental sequences. A mismatch of material properties such as reflected generally by the numerical models in the experimental conditions in which they are recorded is underlined.

Remerciements

Je voudrais remercier tous ceux qui directement ou indirectement ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

Merci en premier lieu à Joseph Virgone et Rafik Belarbi qui ont accepté d'assurer les rôles de rapporteurs. Je voudrais aussi remercier Bernard Perrin pour sa participation au jury en tant que président.

Je remercie vivement Monika Woloszyn et Nolwenn Le Pierrès, mes directrices de thèse, dont le suivi et la patience ont permis l'aboutissement de cette thèse. Je voudrais aussi remercier Timea Bejat, qui a assuré le rôle de troisième encadrante, et surtout d'intermédiaire avec le CEA, indispensable pour la réussite expérimentale de ce travail.

Ce travail expérimental n'aurait pu être mené aussi bien sans la participation active de Didier Therme au CEA, et de Thierry Goldin au LOCIE. Je remercie aussi Amandine Piot, qui a parfaitement assuré le rôle de Timea Bejat lors de son absence.

Mes grands remerciements à tous ceux grâce à qui l'atmosphère a été optimale lors de mes années de thèse. Merci à mes collègues et colocataires Parfait et Igor, aux amis Guillaume, Noamen, Madi, Marie, Fredy, Jeff, Karolina, Jeanne, Michael, Sébastien. Merci à tous les collègues du LOCIE, et mention spéciale à ceux avec qui j'ai partagé le même bureau, Clara, Luzolo, Felipe, Nolwenn, Wout, Anna Maria.

Je voudrais terminer en remerciant l'ANR qui a financé entièrement cette thèse au travers du projet HYGROBAT.

Merci enfin à ceux qui à l'origine m'ont permis de découvrir le monde de la recherche, Yao Azoumah et Edem N'Tsoukpoe.

Dédicace

A la mémoire de Béatrice et Colombe KEDOWIDE, grand mère et tante, qui n'ont pu voir avec moi la fin de ce parcours avant de rejoindre nos ancêtres en ce début d'année 2015

Table des matières

1 Contexte scientifique **16**
1.1 Géneralités sur les matériaux poreux/hygroscopiques . . . 16
1.1.1 Définition du matériau poreux . . . 16
1.1.2 Transferts de masse dans les matériaux poreux . . . 17
1.2 Dispositifs expérimentaux d'étude des transferts thermiques et de masse dans l'enveloppe du bâtiment . . . 18
1.2.1 Dispositifs d'expérimentation en conditions contrôlées . . . 19
1.2.2 Dispositifs d'expérimentation en conditions réelles . . . 22
1.3 Projet HYGROBAT et Positionnement du travail . . . 25
1.4 Conclusion . . . 26

2 Dispositif expérimental - Résultats **28**
2.1 Description du dispositif expérimental . . . 28
2.1.1 Présentation des cellules . . . 28
2.1.2 Parois testées et instrumentation . . . 32
2.1.3 Instrumentation . . . 34
2.2 Résultats expérimentaux . . . 41
2.2.1 Repères . . . 41
2.2.2 Description générale . . . 42
2.2.3 Qualification des mesures . . . 44
2.2.4 Analyse des résultats expérimentaux . . . 47
2.3 Conclusion . . . 59

3 Descriptif du modèle numérique **62**
3.1 Transferts de Chaleur . . . 62
3.2 Transferts de masse en milieux poreux . . . 63
3.3 Transferts couplés de chaleur et de masse . . . 64
3.3.1 Équations générales . . . 64
3.3.2 Discrétisation des équations de transferts couplés en 1D . . . 66
3.3.3 Conditions aux limites . . . 67
3.4 Implémentation du modèle . . . 67
3.4.1 Modèles existants . . . 67
3.4.2 Outil de simulation : DYMOLA . . . 68
3.4.3 Structure du modèle . . . 68
3.4.4 Validation du modèle . . . 70

4 Confrontation du modèle numérique et des résultats expérimentaux **75**
4.1 Propriétés physiques . . . 75
4.2 Simulation sur la 1ère séquence du printemps 2013 . . . 77
4.2.1 Étude dans l'isolant en fibre de bois, validation dans une couche uniforme 78
4.2.2 Étude sur l'isolant en fibre de bois, validation aux limites de l'isolant . . 85

4.3 Simulation sur séquences suivantes 88
4.3.1 Été 2013 88
4.3.2 Hiver 2014 92
4.4 Retour sur la simulation de validation du modèle (Chapitre 3) 96
4.5 Conclusion 98

A Plans de la paroi **108**

B Composition de l'enduit - Conseils pour mise en œuvre (Source : Document fabricant) **112**

C Étalonnage des thermocouples **114**

D Propriétés des matériaux : Rapport de comparaison (Source : Rapport final du projet HYGROBAT, à paraitre en Juillet 2015) **118**

Table des figures

1.1 Transfert de vapeur d'eau et d'eau liquide à l'échelle d'un pore. Source (Rose, 1963) a : Adsorption, b :Transfert de vapeur, c :Distillation, d : Transfert (liquide) de surface, e : Transfert de liquide (mode non saturé), f : Transfert de liquide (mode saturé) . . . 17
1.2 Courbe de sorption d'un matériau hygroscopique. Issu de (Piot, 2009) . . . 18
1.3 Schéma de principe chambre climatique (Vinha, 2007) . . . 20
1.4 Schéma de principe chambre climatique (Rafidiarison et al., 2015) . . . 20
1.5 Utilisation de la double enceinte climatique en mode boite chaude gardée (haut gauche), boite chaude calibrée (haut droite) et test de bâtiment grandeur nature (bas) (Fazio et al., 1997) . . . 21
1.6 VLIET Building (Blocken and Carmeliet, 2005) . . . 23
1.7 Bâtiment test de l'institut norvégien pour la recherche dans le bâtiment (Geving and Uvslø kk, 2000) . . . 23
1.8 Schéma de principe des cellules test de l'IBP, Fraunhofer (Lengsfeld et al., 2007) 24
1.9 Cellule OPTIMOB à proximité de la station météo dédiée (Piot, 2009) . . . 24

2.1 Emplacement de l'INES(Gauche, point rouge) ; Plan détaillé (Droite ; Plate forme INCAS encadré rouge ; Cellules PASSYS 1 et 2 cercles bleus) . . . 29
2.2 Structure 3D d'une cellule PASSYS. Issu de (Jensen et al., 1989) . . . 30
2.3 Cellule PASSYS . . . 30
2.4 Centrale de traitement d'air d'une cellule PASSYS . . . 31
2.5 Plage de fonctionnement de la CTA . . . 31
2.6 Coupe de la paroi (Unité : cm) . . . 32
2.7 Coupe de la paroi modifiée, Phase 2 (Unité : cm) . . . 33
2.8 Montage de la paroi : Ossature (Gauche), Deuxième couche d'isolant en cours (Droite) . . . 33
2.9 Structure de l'enduit . . . 34
2.10 Pose des plaques d'OSB . . . 34
2.11 Schéma de l'emplacement des capteurs d'air intérieur : Vue de haut (Haut), Vue de profil (Bas). Issu de (Jensen et al., 1989) . . . 35
2.12 Thermo-hygromètre (Gauche), Thermocouple (Centre), Fluxmètre thermique (Droite) . . . 36
2.13 Schéma des zones d'emplacement des thermocouples, thermohygromètres (voir Table 2.3) et fluxmètres thermiques (en bleu) ; Unité : cm. . . . 37
2.14 Pyranomètre posé sur la paroi testée . . . 37
2.15 Étalonnage des thermocouples . . . 38
2.16 Schéma de l'emplacement des capteurs dans l'épaisseur de la paroi . . . 39
2.17 Capteur protégé . . . 40
2.18 Schéma de l'emplacement des capteurs supplémentaires après modification de la paroi (Encadré) . . . 40
2.19 Chronologie de tests effectués (FdB* :Isolant en fibre de bois) . . . 42

2.20 Cumuls journaliers des rayonnements sur chacune des façades (Source : Pyranomètres de façades) et de la pluviométrie sur le site (Source : Station météo) . . . 43
2.21 Valeurs réelles des conditions intérieures et extérieures durant les tests 43
2.22 Comparaison des températures relevées, zone A 44
2.23 Comparaison des rayonnements sur les façades 45
2.24 Comparaison des températures relevées, zone B 45
2.25 Comparaison des humidités relatives relevées, zone A 46
2.26 Comparaison des humidités relatives relevées, zone B 46
2.27 Températures et humidités relatives moyennes journalières en zone A de la paroi sur PASSYS 2 48
2.28 Températures et humidités relatives moyennes journalières en zone A de la paroi sur PASSYS 1 (FdB : isolant en fibre de bois) 48
2.29 Séquence de printemps 2013 : Conditions aux limites 50
2.30 Séquence de printemps 2013 : humidités relatives (Haut) et pressions de vapeur (Bas) en partie courante de la paroi sur PASSYS 1 50
2.31 Séquence de printemps 2013 : températures en partie courante de la paroi sur PASSYS 1 51
2.32 Distribution de la température adimensionnelle pendant la séquence d'automne 2013 52
2.33 Température adimensionnelle pendant la séquence de printemps 2013, Humidité relativé à l'intérieur de la cellule 52
2.34 Séquence d'été 2013 (a) : températures en partie courante des parois sur PASSYS 1 et PASSYS 2 53
2.35 Séquence d'été 2013 (a) : densités de flux thermiques de la paroi sur PASSYS 1 et PASSYS 2 54
2.36 Séquence d'été 2013 (a) : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 1 et PASSYS 2 54
2.37 Séquence d'été 2013 (b) : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 1 et PASSYS 2 56
2.38 Séquence d'été 2013 (b) : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 1 et PASSYS 2 56
2.39 Séquence d'automne 2013 : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 1 57
2.40 Distribution de la température adimensionnelle pendant la séquence d'automne 2013 57
2.41 Conductivité thermique apparente de la séquence d'automne 2013 58
2.42 Conductivité thermique apparente de la séquence du printemps 2013 58
2.43 Séquence d'hiver 2014 : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 2 59
2.44 Séquence d'hiver 2014 : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 1 59

3.1 Discrétisation 1D d'une zone à l'intérieur du matériau 66
3.2 Exemple de module développé, avec ports de transferts thermiques existants, et ports de transferts de masse créés 69
3.3 Capture d'écran du modèle de paroi 70
3.4 Comparaison des températures simulées et expérimentales, phase "hivernale" . . 71
3.5 Comparaison des températures simulées et expérimentales, phase "périodique" . 72
3.6 Comparaison des humidités relatives simulées et expérimentales, phase "hivernale" 72
3.7 Comparaison des humidités relatives simulées et expérimentales, phase "périodique" 73

4.1 Limites (cercles) et point de comparaison (triangle) dans l'isolant 78
4.2 Comparaison des résultats expérimentaux et de la simulation de référence à 8 cm 79
4.3 Comparaison des résultats expérimentaux et de la simulation de référence à 8 cm : Zoom sur les températures 79
4.4 Comparaison à 8 cm des résultats expérimentaux et des simulations avec perméabilités à la vapeur mesurées 81
4.5 Comparaison à 8 cm des résultats expérimentaux et des simulations avec perméabilités à la vapeur modifiées 82
4.6 Isothermes de sorption/désorption et courbes intermédiaires artificielles 83
4.7 Comparaison à 8 cm des résultats expérimentaux et des simulations avec pentes des isothermes de sorption modifiées 84
4.8 Comparaison à 8 cm des résultats expérimentaux et des simulations avec perméabilité à la vapeur et pente de l'isotherme de sorption modifiés 85
4.9 Limites (cerles) et points de comparaison (triangles) dans l'épaisseur de la paroi 85
4.10 Comparaison des humidités relatives dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" 86
4.11 Comparaison des températures dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" 87
4.12 Comparaison des pressions de vapeur dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" 87
4.13 Comparaison des températures dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence a 88
4.14 Comparaison des flux thermiques dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence a 89
4.15 Comparaison des humidités relatives dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence a 89
4.16 Comparaison des pressions de vapeur dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence b - première partie 90
4.17 Comparaison des pressions de vapeur dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence b - deuxième partie 91
4.18 Comparaison des humidités relatives dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence b - première partie 91
4.19 Comparaison des humidités relatives dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence b - deuxième partie 92
4.20 Limites (cercles) et points de comparaisons (triangles) dans l'épaisseur de la paroi 93
4.21 Comparaison des températures dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Hiver 2014 93
4.22 Comparaison des humidités relatives dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Hiver 2014 94
4.23 Comparaison des pressions de vapeur dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Hiver 2014 95
4.24 Simulations de validation : humidités relatives avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH", séquence "hivernale" 96
4.25 Simulations de validation : humidités relatives avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH", séquence "périodique" 97
4.26 Simulations de validation : températures avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH", séquence "périodique" 98

Liste des tableaux

2.1 Précision des capteurs à l'intérieur de la cellule 35
2.2 Données relevées par la station météo 36
2.3 Détails sur instrumentation de la paroi 38
2.4 Séquences choisies et combinaisons correspondantes 49

3.1 Propriétés physiques du matériau fibre de bois 71

4.1 Propriétés physiques du matériau fibre de bois 76
4.2 Propriétés physiques de l'enduit 76
4.3 Propriétés physiques du matériau OSB 77
4.4 Chaleurs massiques/latentes utilisées dans le modèle 77
4.5 Valeurs de perméabilité à la vapeur de la fibre de bois en conditions humides . . 80
4.6 Valeurs de perméabilité à la vapeur de la fibre de bois utilisées en étude paramétrique 81
4.7 Pente des courbes intermédiaires artificielles des isothermes de sorption 83

Liste des symboles

Constantes

R	Constante universelle des gaz parfaits $(J/(mol.K))$
r	Constante thermodynamique $(J/(kg.K))$

Lettres grecques

α	Absorptivité $(-)$
δ_v	Perméabilité à la vapeur d'eau (s)
ϵ	Porosité du matériau $(-)$
Γ	Coefficient de diffusion m^2/s
λ	Conductivité thermique massique $(W/(m.K))$
Φ_i	Potentiel Φ utilisé pour l'élément i $(-)$
ρ	masse volumique (kg/m^3)
σ	Réflectivité $(-)$
τ	Transmissivité $(-)$
θ_m	Teneur en eau massique $(\%)$

Indices et exposants

$'$	Apparent
a	air
adv	Advection
as	air sec
cd	Conduction
$conv$	Convection
dif	Diffusion
fl	Fluide
m	Matériau
$Rabs$	Rayonnement absorbé
Ri	Rayonnement incident
Rr	Rayonnement réfléchi
Rtr	Rayonnement transmis

s	Surface
v	Vapeur d'eau
w	Eau liquide

Lettres Latines

C	Chaleur massique de l'élément $(J/(kg.K))$
C_p	Chaleur massique à pression constante $(J/(kg.K))$
C_v	Chaleur massique à volume constant $(J/(kg.K))$
H	Enthalpie (J)
h	Enthalpie spécifique $(J/(kg.K))$
h_c	Coefficient de convection thermique $(W/(m^2.K))$
h_w	Coefficient de convection massique $(W/(m^2.K))$
HA	Humidité absolue $(-)$
HR	Humidité relative $(\%)$
j	Densité de flux massique $(kg/(m^2.s))$
K_i^Φ	Perméabilité à l'élément i avec pour potentiel Φ $(-)$
k_X	Perméabilité du matériau à l'élément X (s)
L_0	Chaleur latente de vaporisation à 0°C (J/kg)
m	Masse (kg)
M_X	Masse molaire de l'élément X (kg/mol)
P	Pression totale de l'air (Pa)
P_c	Pression capillaire (Pa)
P_X	Pression partielle de l'élément X (Pa)
q	Densité de flux de chaleur (W/m^2)
T	Température (K)
T^*	Température (°C)
U	Énergie interne (J)

Introduction générale

L'enveloppe du bâtiment (parois, toitures) est d'une très grande importance dans le comportement général du bâtiment. En effet, elle sert de rempart/tampon aux différents aléas du climat extérieur, et à ses performances sont liées le confort des occupants et l'utilisation plus ou moins importante de systèmes de régulation permettant d'obtenir une ambiance stable à l'intérieur du bâtiment. Ainsi, en fonction du type de climat rencontré (chaud et sec, chaud et humide, froid et humide), une isolation et une inertie thermique et hygrique plus ou moins importante sera nécessaire, et l'utilisation de systèmes de ventilation, de climatisation ou de chauffage seront nécessaires pour une ambiance intérieure agréable aux occupants.

Plusieurs facteurs sont pris en compte dans la notion de confort des occupants à l'intérieur d'un bâtiment, dont la température, l'humidité relative et le taux de renouvellement de l'air. Des études comme (Fanger, 1973; Fanger et al., 1985, 1988) portent sur la notion de confort intérieur, à partir de modèles prenant en compte la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air intérieures. Les systèmes de régulation étant des consommateurs importants d'énergie, des enveloppes de bâtiments plus efficaces sont exigés afin d'optimiser au maximum l'utilisation de ces systèmes. Ainsi les réglementations dans ce sens se font de plus en plus strictes (RT 2012).

Il existe une multitude de matériaux et de combinaisons de couches de matériaux afin de former des enveloppes de bâtiments. Si certains servent principalement à la solidité de la structure du bâtiment, ils participent tous à la performance de l'enveloppe du bâtiment. Ainsi sur le plan thermique une isolation optimale sera importante. En ce qui concerne l'humidité, la conception de l'enveloppe doit empêcher la présence importante et prolongée d'eau sous forme liquide, qui pourrait affecter la durabilité des matériaux surtout côté extérieur, ou favoriser l'apparition de moisissures côté intérieur, ces derniers affectant la santé des occupants. Pour cela sont souvent utilisés dans les climats tempérés des parements extérieurs (bardage, pare pluie) et intérieur (pare vapeur) pour limiter au maximum les transferts d'air et d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment.

Cependant, il existe des matériaux de construction qui participent de part leur structure à la régulation en humidité de l'ambiance intérieure, en servant de tampons, absorbant ou libérant l'humidité dans l'air en fonction de leurs propriétés. Ces matériaux sont dits hygroscopiques, la plupart étant des matériaux à base de fibres végétales : bois massif, panneaux en fibres végétales reconstitués (bois, chanvre), ouate de cellulose... Leur impact n'est pas seulement hygrique, l'absorption de vapeur d'eau contenue dans l'air donnant lieu à des transferts de chaleur (latente) qui peuvent ainsi avoir un impact sur la température intérieure et les besoins en régulation (chauffage ou climatisation). Par ailleurs, la teneur en eau de ces matériaux a un impact sur leurs propriétés thermiques, ce qui signifie un impact sur la performance thermique générale de l'enveloppe.

L'étude de l'impact de ces matériaux hygroscopiques sur les performances énergétiques des bâtiments nécessite une excellente maitrise des interactions thermiques et hygriques qui ont lieu

dans ces matériaux lorsqu'ils sont exposés à des conditions réelles d'utilisation. Cette maitrise se traduit par une bonne connaissance des transferts couplés de chaleur et de masse qui ont lieu dans les matériaux très hygroscopiques. Les moyens pour y parvenir sont principalement les dispositifs expérimentaux, construits à plusieurs échelles, et la modélisation des phénomènes physiques observés.

Le travail présenté dans ce document aborde l'étude des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux hygroscopiques, à l'échelle d'une paroi de bâtiment. L'approche est à la fois expérimentale et numérique, et l'étude se décompose en quatre grandes sections :

1. Une synthèse sur les dispositifs expérimentaux antérieurs et une introduction du dispositif expérimental utilisé dans l'étude.
2. La description du dispositif expérimental mis en œuvre, et une étude des résultats expérimentaux relevés.
3. La description et la validation du modèle numérique développé.
4. La simulation à l'aide du modèle numérique de séquences issues des résultats expérimentaux, et une confrontation des résultats.

Chapitre 1

Contexte scientifique

Ce chapitre dans une première partie expose les généralités sur les matériaux poreux et introduit les matériaux hygroscopiques, en donnant un aperçu des mécanismes de transfert de masse qui y ont lieu. Ensuite est faite une synthèse non exhaustive de dispositifs expérimentaux dédiés à l'étude de transferts de masse, couplés aux transferts thermiques dans l'enveloppe du bâtiment, en se focalisant sur des études incluant des matériaux hygroscopiques. La fin du chapitre sera consacrée à la description du cadre de ce travail et au positionnement de ses objectifs scientifiques.

1.1 Géneralités sur les matériaux poreux/hygroscopiques

1.1.1 Définition du matériau poreux

Un matériau poreux est un matériau constitué d'un agrégat de particules solides. La disposition des particules solides entraine la présence de cavités appelées pores.

Les pores sont de géométries et de tailles variables, et plus ou moins isolés. Ainsi il existe des pores isolés sans aucune connexion avec d'autres, des pores semi-isolés avec une ouverture unique sur d'autres pores et les pores ouverts avec plusieurs ouvertures vers d'autres pores. Les deux derniers types de pores se constituent en un réseau qui permet des transferts de masse (liquide, gaz) au sein du matériau.

Les pores sont classées par taille, et différents types de classement existent. Ainsi selon (International Union of Pure and Applied Chemistry, 1994) les pores sont classés de la manière suivante :

- Les micropores qui ont une taille inférieure à 2 nm
- Les mésopores qui ont une taille entre 2 et 50 nm
- Les macropores qui ont une taile au delà de 50 nm

tandis que (Brewer, 1964) propose la classification suivante, spécifique aux sols :

- Les micropores qui ont une taille inférieure à 30 μm
- Les mésopores qui ont une taille entre 30 et 75 μm
- Les macropores qui ont une taile au delà de 75 μm

La distribution de la taille des particules solides et celles des pores d'un matériau sont généralement liées et ont une grande importance sur la mécanique des transferts de masse dans le matériau. Dans le cas du bâtiment, l'élément le plus impliqué dans les transferts de masse est l'eau sous ses deux phases : liquide et gaz. Le flux de vapeur d'eau dans les réseaux de pores entrainent une adsorption de l'eau sur la surface de la matrice solide. Ainsi les matériaux hydrophiles à surface spécifique (rapport de la surface des particules solides accessibles sur la masse

du matériau) importante sont définis comme hygroscopiques, du fait de la possibilité d'adsorption importante d'eau sur la surface de la matrice solide avant la saturation du matériau. C'est le cas des matériaux de construction composés de fibres végétales (bois, chanvre).

1.1.2 Transferts de masse dans les matériaux poreux

Les transferts de masse dans les matériaux poreux se font en plusieurs étapes en fonction du degré de saturation des pores. Ces étapes sont définies par (Rose, 1963) pour l'eau. Il distingue trois phases (Figure 1.1) :

- La phase hygroscopique (1 à 3) : Durant cette phase l'eau qui circule dans les pores est essentiellement sous forme vapeur. Une partie de cette vapeur s'adsorbe à la matrice solide, et la première couche de molécules adsorbées facilitent les transferts de masse dans le matériau. L'adsorption des molécules d'eau se fait couche par couche, jusqu'à ce que les plus petits pores soient entièrement pleins d'eau adsorbée. Cette phase où l'humidité relative environnante va jusqu'à 95% est celle la plus fréquente dans les conditions de fonctionnement réelles du bâtiment.
- La phase super hygroscopique (4e) : Durant cette phase les pores se remplissent de plus en plus et l'eau liquide commence à occuper la majorité de l'espace. Il subsiste néanmoins des poches d'air dans les pores. Dans les conditions réelles d'utilisation du bâtiment cette phase lorsqu'elle est prolongée peut entrainer des dégâts sur le matériau.
- La phase saturée (4f) : Cette phase correspond à une occupation complète des pores par l'eau liquide. A ce stade, les transferts de masse sont uniquement liquides.

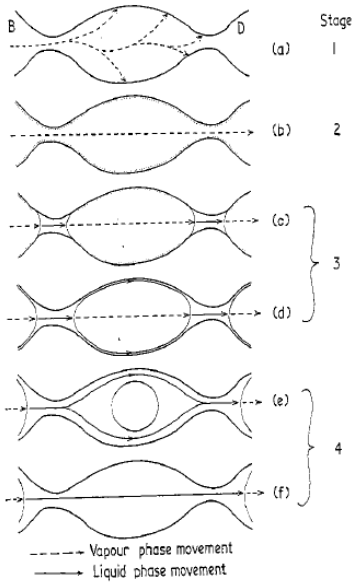


FIGURE 1.1 – Transfert de vapeur d'eau et d'eau liquide à l'échelle d'un pore. Source (Rose, 1963) a : Adsorption, b :Transfert de vapeur, c :Distillation, d : Transfert (liquide) de surface, e : Transfert de liquide (mode non saturé), f : Transfert de liquide (mode saturé)

La teneur en eau des matériaux poreux est fonction de la teneur en eau de leur environnement immédiat. Les isothermes de sorption permettent de connaitre en fonction de l'humidité relative environnante la teneur en eau du matériau (Figure 1.2). L'isotherme de sorption ne présente pas toujours la même courbe selon que le matériau soit en phase d'adsorption ou de désorption de la vapeur : pour certains matériaux, un hystérésis peut apparaitre.

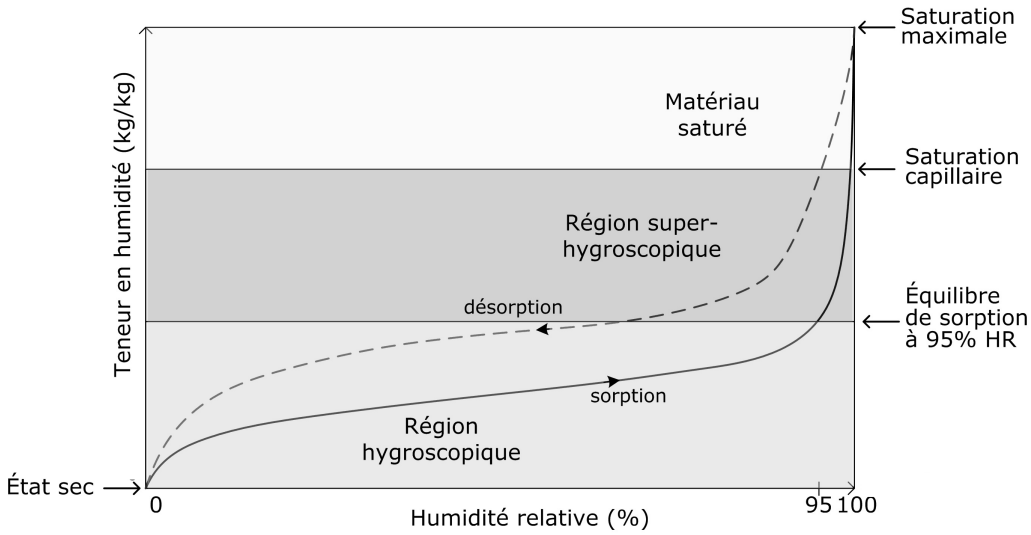


FIGURE 1.2 – Courbe de sorption d'un matériau hygroscopique. Issu de (Piot, 2009)

L'adsorption et la désorption d'eau entrainent un changement d'état (de vapeur à liquide ou inversement) qui entraine respectivement une perte ou un gain de chaleur appelée chaleur de sorption. Les quantités d'eau sous forme vapeur et liquide peuvent donc varier dans les échanges de masse, ou avec un bilan de flux de matière nul.

Les transferts de masse, ainsi que les transferts de chaleurs dans les matériaux poreux sont régis par une équation générale de conservation sous la forme suivante :

$$\underbrace{\frac{\delta(\rho\phi)}{\delta t}}_{\boxed{1}} + \underbrace{\vec{\nabla}.(\rho\vec{V}\phi)}_{\boxed{2}} = \underbrace{\vec{\nabla}.(\Gamma\vec{\nabla}\phi)}_{\boxed{3}} + \underbrace{S_\phi}_{\boxed{4}} \tag{1.1}$$

Dans cette équation, le terme $\boxed{1}$ représente la variation dans le temps de la valeur physique (température, teneur en eau), le terme $\boxed{2}$ correspond au terme convectif. Le terme $\boxed{3}$ est le terme diffusif et le terme source est le $\boxed{4}$.

1.2 Dispositifs expérimentaux d'étude des transferts thermiques et de masse dans l'enveloppe du bâtiment

Un nombre croissant d'études s'intéresse aux transferts couplés de chaleur et de masse dans l'enveloppe du bâtiment. Si les études numériques permettent de décrire les phénomènes physiques et de simuler le comportement de l'enveloppe du bâtiment, les études expérimentales permettent en amont d'observer les phénomènes physiques en jeu et en aval de valider les résultats des modèles numériques. Ces études s'intéressent à plusieurs échelles allant du matériau constructif au bâtiment entier.

Ici seront exposés les plus importants dispositifs expérimentaux existants et étudiant les transferts de chaleur et de masse (Kedowide et al., 2012). Ces dispositifs sont de deux types : ceux exposant les objets d'études à des conditions contrôlées, et ceux les exposant à des conditions réelles. Les premiers ont pour avantage une meilleure maitrise des conditions physiques auxquelles sont exposés les éléments étudiés, quand les seconds mettent ces éléments dans des conditions plus réalistes d'utilisation.

1.2.1 Dispositifs d'expérimentation en conditions contrôlées

Les dispositifs expérimentaux en conditions contrôlées de laboratoire sont une première étape importante dans la compréhension des phénomènes physiques qui entrent en jeu dans les transferts couplés de chaleur et de masse. Les conditions aux limites, maitrisées, peuvent être stationnaires ou variables.

Les dispositifs destinés à étudier les transferts de chaleur à l'échelle de la paroi sont en majorité conçus sur le modèle de la boite chaude gardée ou calibrée, décrite dans la norme NF EN ISO 8990. Le modèle de la boite chaude calibrée consiste en deux chambres climatiques aux ambiances différentes entre lesquelles sont ajustés les éléments de paroi à étudier. Ces systèmes pour permettre l'étude de transferts couplés de chaleur et de masse sont améliorés en ajoutant une régulation en humidité dans chacune des chambres climatiques. Des capteurs autour et dans les éléments étudiés permettent de connaitre leur température et leur teneur en humidité.

(Vinha, 2007) utilise un dispositif basé sur le principe de la boite chaude calibrée. Ce dispositif permet d'étudier des parois ayant des dimensions maximales de 1,2 × 1,2 m pour une épaisseur de 60 cm. Le dispositif est placé dans une chambre froide avec des conditions de températures constantes (Figure 1.3). Il a permis d'étudier 64 combinaisons d'assemblages de parois différents, la plupart correspondant à des assemblages généralement rencontrés dans les pays nordiques. L'objectif était de connaitre les conditions pour que les parois à ossature bois aient les meilleures performances, en termes de prévention de moisissures préjudiciables à l'assemblage. Les résultats ont mis en évidence le fait qu'un pare-vapeur coté intérieur avec sa très forte résistance à la diffusion de vapeur offrait de bonnes performances, mais n'était pas indispensable, à condition que le reste de la paroi soit bien isolée thermiquement et très perméable à la vapeur.

(Kilpelainen et al., 2000) utilise le même dispositif pour étudier une singularité : la jonction du plancher entre deux étages et un mur extérieur dans une maison. Cette partie du bâtiment présente une discontinuité dans la pose du pare vapeur à l'intérieur. Les résultats expérimentaux, ainsi que des résultats de simulations numériques de l'expérience montrent des teneurs en eau élevées en périodes froides et d'importants risques de moisissures et de dommage de la structure de l'enveloppe.

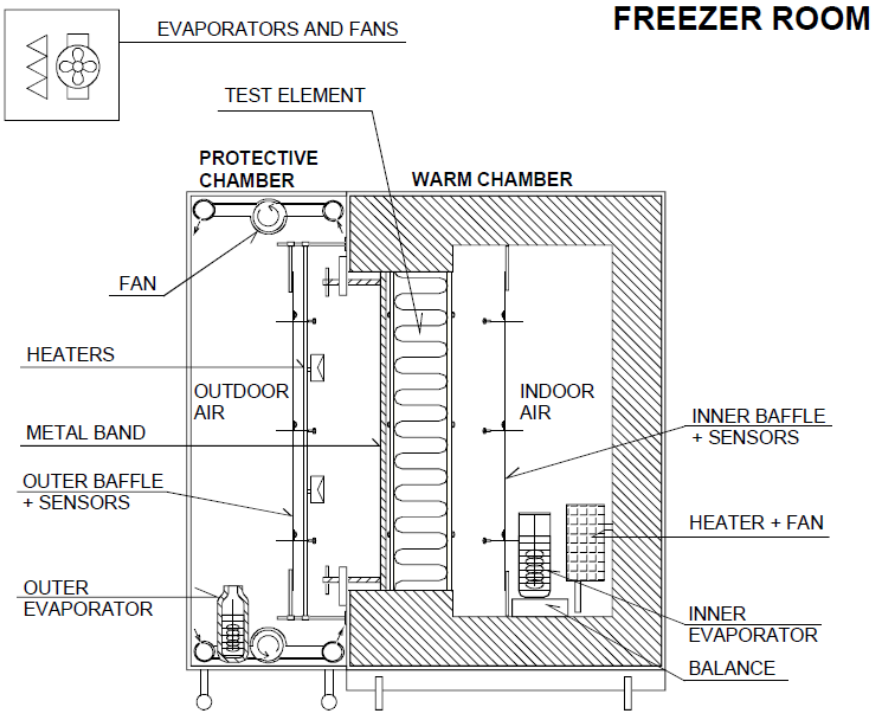


FIGURE 1.3 – Schéma de principe chambre climatique (Vinha, 2007)

Dans le cas de la boite chaude gardée, une boite plus petite est utilisée dans la chambre climatique coté "chaud". Cette boite est collée à la paroi à étudier, et maintenue à la température de la chambre climatique dans laquelle elle se trouve, la quantité d'énergie permettant de maintenir la boite à la bonne température permet de retrouver le flux de chaleur au travers de la paroi testée. En France, (Rafidiarison et al., 2015) utilise une double enceinte climatique du même type pour l'étude d'assemblages de parois composées essentiellement de matériaux à base de bois (Figure 1.4). Les résultats expérimentaux ont été comparés avec des simulations effectuées avec le code numérique *BuildingPore*, et les données expérimentales sont disponibles auprès des auteurs pour valider des modèles numériques de transferts couplés. Elles ont notamment été utilisées dans ce travail (Chapitres 3 et 4).

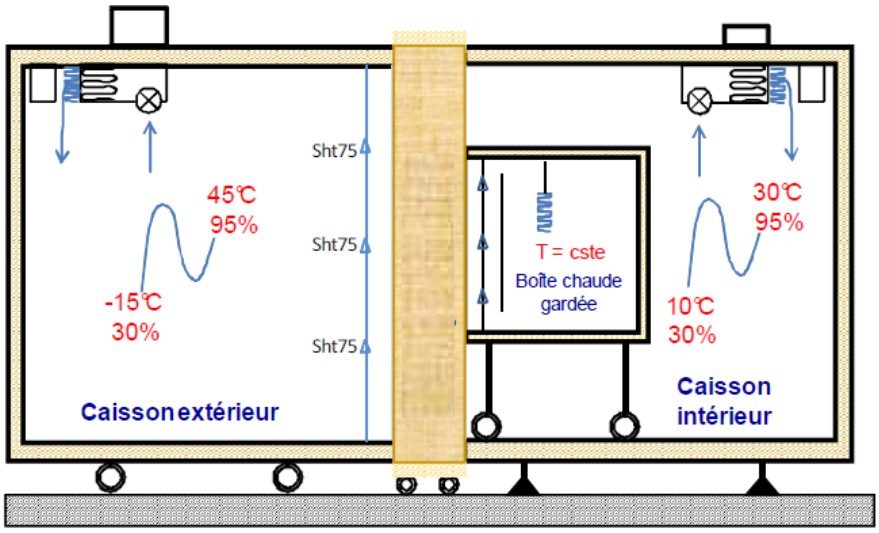


FIGURE 1.4 – Schéma de principe chambre climatique (Rafidiarison et al., 2015)

A l'université de Concordia (Canada), une double enceinte climatique de très grande dimension (4,1 × 6,7 × 7,2 m) permet des tests avec les deux techniques (Figure 1.5). Ce dispositif, décrit dans (Fazio et al., 1997) a aussi une plage de fonctionnement très étendue : -40°C à 50°C pour le coté froid et 4°C à 60°C pour la partie chaude, avec 10 à 90% d'humidité relative des deux cotés. Il est à noter qu'il permet aussi de tester dans la partie froide de la chambre des modules de la taille de petits bâtiments. Ce dernier cas est répertorié dans (Ge et al., 2014; Li et al., 2012; Yang et al., 2007, 2012) avec l'étude de la réponse des deux pièces à des sollicitations hygriques en fonction du type de parement intérieur utilisé, de la génération de vapeur à l'intérieur des pièces et du taux de renouvellement d'air. Le bâtiment testé est constitué de deux pièces superposées de 5 m de haut au total et plus de 8 m^2 de surface au sol.

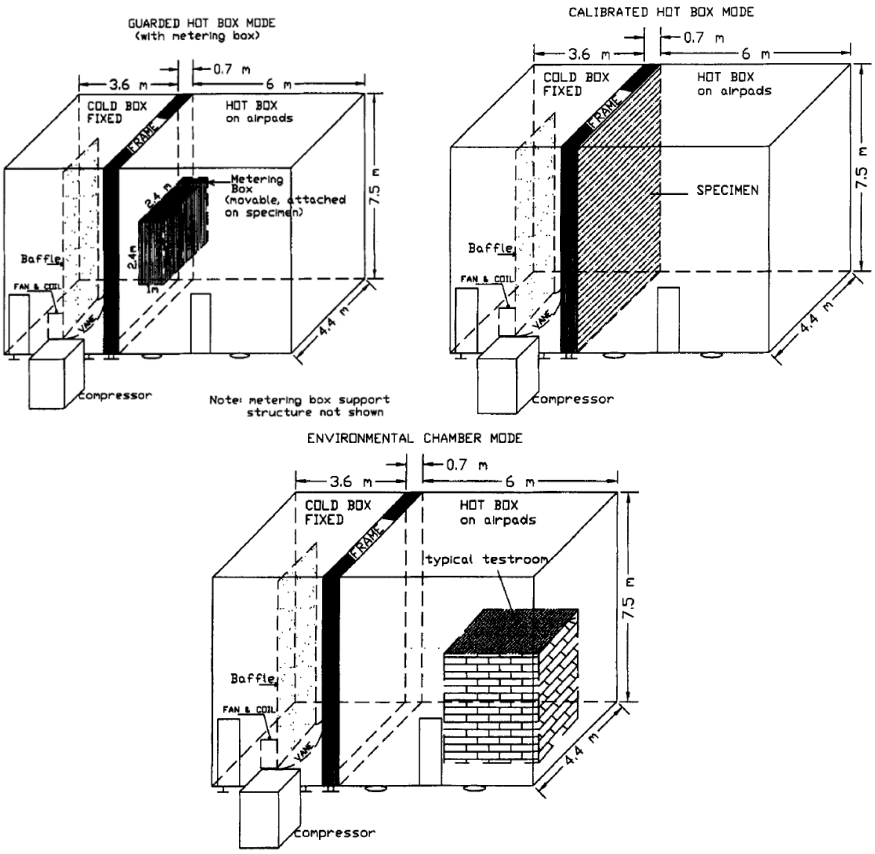


FIGURE 1.5 – Utilisation de la double enceinte climatique en mode boite chaude gardée (haut gauche), boite chaude calibrée (haut droite) et test de bâtiment grandeur nature (bas) (Fazio et al., 1997)

Les deux parements testés ont été le contre plaqué en bois et les plaques de plâtre. Les études ont montré la capacité de ces parements à absorber l'humidité lors de la génération de vapeur à l'intérieur des pièces, l'effet étant plus important pour le plâtre lorsque les fluctuations sont rapides. Cette capacité est néanmoins réduite lorsque le taux de renouvellement de l'air est augmenté.

Un dispositif similaire a été utilisé à l'université préfectorale d'Akita (Japon). Cette enceinte d'un volume de 38 m^3 a une plage de fonctionnement de 10°C à 40°C et 30 à 90% d'humidité relative. Il peut contenir un module de la taille d'une pièce d'habitation, comme c'est le cas dans (Yoshino et al., 2009) où il a servi à évaluer l'impact du tampon hygroscopique d'un parement intérieur en plâtre en fonction du renouvellement d'air. Cette étude a aussi servi à une tâche dans le cadre de l'annexe 41 de l'AIE (Rode and Woloszyn, 2007), où des modèles

numériques ont été comparés en simulant le comportement de la pièce lorsqu'elle est soumise aux sollicitations hygriques. Les résultats de simulation des différents modèles numériques testés sont similaires entre eux, mais il existe un écart notable entre les résultats numériques et expérimentaux dans certaines configurations.

Enfin, peut être aussi cité le dispositif expérimental de l'Institut de Recherche en Construction du Canada (IRC-NRC), nommé EEEF (Envelope Environmental Exposure Facility). Cette chambre climatique peut accueillir une paroi grandeur nature (2,43 × 2,43 m) qui peut être testée sur une plage de fonctionnement de -47 °C à 48 °C de température pour 10 à 100% d'humidité relative. En outre, elle dispose d'instruments permettant de simuler une pluie ou le rayonnement du soleil, et surtout d'un système de pesée de la paroi testée pour évaluer en temps réel la teneur en eau de celle ci. Ce dispositif est donc particulièrement adapté aux tests de séchage, comme il a été le cas dans (Maref et al., 2002, 2004) avec des assemblages de parois préalablement immergées, ou dans (Maref et al., 2007) où des tests se rapprochant de la réalité avec des séquences pluie - soleil ont été effectués.

1.2.2 Dispositifs d'expérimentation en conditions réelles

Les tests en conditions climatiques réelles ont pour avantage de prendre en compte les dynamiques et les phénomènes difficilement reproductibles en conditions contrôlées, comme la pluie et l'ensoleillement. Cet avantage les rend nécessaires et complémentaires aux tests en conditions contrôlées, bien que les conditions aux limites extérieures ne soient pas maitrisées.

Les études en conditions réelles sont aussi très variées, avec des échelles allant d'une simple paroi à l'échelle bâtiment. Il peut aussi s'agir de bâtiments entièrement dédiés ou de mesures in situ sur des bâtiments habités.

Le laboratoire de physique de bâtiment de l'université catholique de Louvain (KU Leuven, Belgique) dispose d'un bâtiment nommé VLIET (VLaams Impulsprogramma voor Energie Technologie : Programme d'Impulsion Flamande de l'Énergie) pour des études en conditions réelles d'éléments de l'enveloppe du bâtiment (Figure 1.6). Ce bâtiment de 25 m de longueur pour 7,2 m de large et 4,3 à 7,9 m en hauteur est orienté Nord Est – Sud Ouest. Il a servi dans (Desta et al., 2011; Langmans, 2013) à l'étude d'assemblages de parois à ossature bois en conditions réelles. Pour ces parois, une membrane étanche (à l'eau et à l'air) extérieure limite grandement les transferts de vapeur dans les parois, sauf dans le cas où les parement intérieurs sont perméables à la vapeur. Dans ce dernier cas la teneur en eau des parois se trouve uniquement liée à l'humidité relative intérieure. Dans le même ordre, ce bâtiment a aussi servi à l'étude de façades modernes intelligentes, comme dans (Saelens and Hens, 2001; Saelens et al., 2004) qui s'intéresse aux façades double peau avec contrôle adaptatif de la ventilation dans la paroi.

Ce dispositif a aussi permis dans (Vereecken et al., 2010) de tester la réponse d'une pièce à des sollicitations hygriques internes en fonction du mobilier et de la ventilation. D'autres éléments de l'enveloppe du bâtiment peuvent aussi y être étudiés, comme la comparaison de toitures compactes et ventilées dans (Hens et al., 2003). Enfin des études ont été aussi effectuées pour mieux appréhender les conditions aux limites réelles. A l'extérieur, des erreurs d'estimation de la quantité et de la répartition de la pluie battante lors de sa modélisation numérique ont été mis en évidence dans (Abuku et al., 2009). Alors, (Blocken and Carmeliet, 2005) a constitué une base de données expérimentales de mesures de pluie battante, disponible pour une validation de modèles numériques.

FIGURE 1.6 – VLIET Building (Blocken and Carmeliet, 2005)

Un dispositif similaire a été construit à Trondheim (Norvège) avec un bâtiment orienté Nord - Sud et aux dimensions intérieures de 10,7 × 3,45 × 3,5 m (Figure 1.7). Ce bâtiment a permis de tester simultanément et pendant 3 années 16 compositions de parois différentes, la plupart à ossature bois (Geving and Uvslø kk, 2000). Il a aussi permis de tester 8 compositions de toitures dans le même temps. Durant toute la longueur des tests l'ambiance intérieure a été maintenue à une température de 23 °C et une humidité relative de 50 %. L'objectif de ce programme commun à l'institut norvégien pour la recherche dans le bâtiment (NBC) et le département de l'ingénierie du bâtiment de l'université norvégienne de science et de technologie (NTNU) était d'une part de tester des compositions de parois et de toitures innovants, et d'autre part d'avoir une base de données conséquente pour des comparaisons avec simulations numériques ultérieures. Cette base de données est disponible par contact aux auteurs.

FIGURE 1.7 – Bâtiment test de l'institut norvégien pour la recherche dans le bâtiment (Geving and Uvslø kk, 2000)

Le laboratoire de physique du bâtiment de l'institut Fraunhofer (IBP, Holzkirchen, Alle-

magne) dispose quand à lui de deux pièces de 20 m^2 exposées à l'extérieur par une fenêtre chacune (Figure 1.8). Ces deux pièces ont servi à l'étude de la réponse de deux parements intérieurs à des sollicitations hygriques, une des pièces servant de témoin. Les deux parements faits de plâtre, l'une nue et l'autre peinte ont mis évidence une meilleure capacité du parement en plaque de plâtre nue à servir de tampon hygroscopique, la peinture atténuant complètement cet effet. Des simulations ont été effectuées dans le cadre de benchmarks pour l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie, et leurs résultats comparés aux résultats expérimentaux obtenus (Holm and Lengsfeld, 2007; Lengsfeld et al., 2007). Les résultats montrent des réponses assez proches pour les modèles numériques entre eux, mais une différence avec les résultats expérimentaux pour le cas du parement intérieur en plaque de plâtre nue.

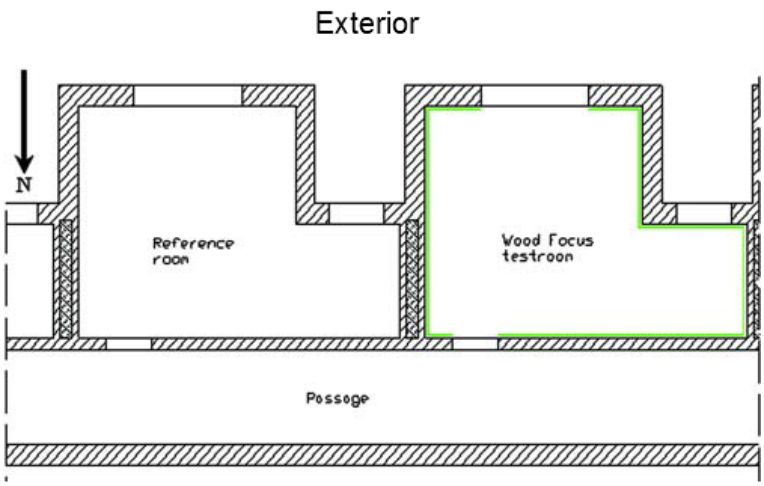


FIGURE 1.8 – Schéma de principe des cellules test de l'IBP, Fraunhofer (Lengsfeld et al., 2007)

Dans la catégorie modules extérieurs, c'est à dire des petits bâtiments entièrement dédiés à l'étude de parois, deux cas récents sont connus en France. Il s'agit en premier lieu de la cellule développée au CSTB Grenoble dans le cadre du projet ANR OPTIMOB (Figure 1.9). Cette cellule de la taille d'une pièce d'habitation (4,56m × 4,55m × 2,41m de dimensions intérieures) est à ossature bois, avec un parement extérieur en bois séparé du reste de la paroi par une lame d'air ventilée naturellement. La cellule a été instrumentée dans le volume de la pièce, dans les parois verticales mais aussi au plancher et au plafond. Elle a permis des tests sur plusieurs années de plusieurs compositions de parois par remplacement de parements intérieurs et d'isolations (Labat et al., 2015). Des confrontations avec un modèle développé dans (Piot, 2009) et amélioré dans (Labat, 2012) ont mis en évidence la difficulté à simuler la lame d'air entre le bardage et le reste des parois instrumentées.

FIGURE 1.9 – Cellule OPTIMOB à proximité de la station météo dédiée (Piot, 2009)

Dans le même ordre d'idées, 5 cellules ont été construites à Epinal dans le cadre du projet ANR TRANSBATIBOIS. Chacune des cellules a une composition de parois unique. Elles sont toutes constituées à majorité de bois, allant des ossatures bois avec isolation en fibre de bois à des madriers empilés et rondins (Rafidiarison, 2012). Ici, les besoins en chauffage ont été mesurés d'une part, et simulés d'autre part avec un logiciel thermique, et les résultats ont montré une surestimation de ces besoins thermiques par les calculs numériques.

Enfin il existe des bâtiments de type maisons à usage d'habitation qui ont été partiellement dédiés à l'étude des transferts dans des enveloppes. C'est le cas d'une maison expérimentale développée par l'institut de recherche en construction (IRC, Canada) (Maref et al., 2010). Cette maison dispose sur sa façade Ouest d'emplacements pour parois amovibles où peuvent être testées jusqu'à 3 parois différentes simultanément. Il est aussi à noter que ce bâtiment est entièrement instrumenté et dédié à des tests sur les ambiances intérieures. Elle est de ce fait inhabitée.

Dans le cas des maisons habitées lors de tout ou partie des tests effectués, peut être cité un bâtiment situé à Leito (Finlande). Ce bâtiment de 107 m^2 habitables, dont la façade coté Sud a été entièrement instrumentée est une maison à ossature bois. Les résultats obtenus ont été utilisés pour consolider ceux obtenus dans les tests en conditions contrôlées de (Vinha, 2007).

Une maison finlandaise à basse consommation d'énergie (76 $kWh/m^2/an$ contre 120 $kWh/m^2/an$ en moyenne dans le pays), a été aussi utilisée dans le cadre de tests de parois dans (Simonson, 2000). Son enveloppe est composée de bois (ossature, isolation, parement extérieur), avec un parement intérieur en plaques de plâtre. Une pièce de cette maison a été instrumentée, ainsi que deux façades de cette pièce. En plus du fait que le bâtiment ait été occupé pendant la durée des tests, le bâtiment a la particularité d'être ventilé naturellement et de ne pas disposer de pare vapeur dans son enveloppe. Les résultats montrent un taux de renouvellement de l'air faible, mais une qualité acceptable de l'air intérieur. En outre, les performances hygriques de l'enveloppe sont intéressantes, et montrent la possibilité de se passer de pare vapeur sans risque de dommages dûs aux moisissures dans les climats froids et humides.

1.3 Projet HYGROBAT et Positionnement du travail

Les nombreuses études menées sur les transferts couplés de chaleur et de masse dans l'enveloppe du bâtiment, ont relevé des écarts récurrents entre mesures expérimentales et résultats numériques, surtout quand cette enveloppe est composée de matériaux hygroscopiques. C'est dans ce cadre que le projet HYGRO-BAT a été lancé, financé par l'ANR dans le programme HABISOL 2010. Ce projet a pour objectif de traiter toutes les étapes allant de la caractérisation du matériau à la prise en compte dans l'enveloppe du bâtiment. Le projet rassemble plusieurs laboratoires et centres de recherche (LASIE, LMDC, LGPM, TREFLE, CETHIL, LERMAB, LOCIE, CEA-INES, CRITT-Bois, CSTB) et des industriels (LIGNATEC, NR GAÏA et EDF R&D). Les travaux du projet ont été subdivisés en quatre grandes tâches :

- La première tâche se consacre à la caractérisation de matériaux. Ces matériaux, choisis pour leur forte hygroscopicité, sont des matériaux bien connus des partenaires du projet et fréquemment utilisées dans le bâtiment. Il s'agit de matériaux composés essentiellement fibres végétales, avec une prépondérance de matériaux à base de bois ;

- La seconde tâche se consacre à l'étude d'assemblages de parois dans des conditions contrôlées d'utilisation. Ces assemblages de parois ont été faits avec les matériaux caractérisés dans

la première tâche ;

- La troisième tâche se consacre à l'étude des mêmes assemblages de parois exposés à des conditions réelles d'utilisation. Le dispositif expérimental décrit dans cette thèse est au cœur de cette tâche ;

- La quatrième tâche se charge d'une intégration des résultats obtenus des tâches précédentes pour une intégration à l'échelle du bâtiment.

L'investigation des origines des écarts souvent observés entre résultats numériques et expérimentaux en humidité dans le cas de matériaux hygroscopiques est le principal objectif visé. Ainsi un intérêt particulier est porté à la fiabilité des mesures expérimentales, et à une caractérisation fine des matériaux étudiés en amont des montages expérimentaux.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre sont décrits les matériaux poreux dans leur généralité, et sont introduits les concepts de matériau hygroscopique et d'adsorption désorption lors des transferts de masse dans les milieux poreux. Ensuite sont décrits des dispositifs expérimentaux dédiés à l'étude de ce type de matériaux. Ces dispositifs sont variés, et se distinguent en deux grandes classes : les dispositifs en conditions contrôlées et les dispositifs en conditions climatiques réelles.

La plupart des études sur l'enveloppe du bâtiment et les matériaux poreux hygroscopiques portent sur la prévention des dommages liés à des teneurs en eau élevées de manière prolongée : moisissures et détérioration de l'enveloppe. Ainsi la plupart des parois étudiées sont protégées à l'extérieur (pare pluie, pare vent) et à l'intérieur (pare vapeur). Cependant, certains cas de parois constituées dans leur épaisseur de matériaux hygroscopiques, sans pare vapeur intérieur montrent des performances intéressantes et une bonne prévention des dommages. Cela constitue une piste intéressante à explorer.

Certaines études portent sur l'impact des certains éléments de l'enveloppe sur le confort intérieur. Ainsi un parement intérieur de bâtiment en matériau hygroscopique, non peint, constitue un régulateur hygrique intéressant des fluctuations de l'humidité relative intérieure, dans des conditions de renouvellement d'air pas trop importantes.

Des modèles construits à partir d'équations générales de transferts de chaleur et de masse sont construits pour prédire le comportement hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment, afin de prévenir les risques liés à la condensation (Kari et al., 1992) ou le gain en énergie dû à l'utilisation d'éléments de l'enveloppe innovants (Ouldboukhitine et al., 2011). Si certaines solutions aux modèles sont analytiques (Abahri et al., 2011; Liu and Shun, 1991; Qin et al., 2006, 2008), les modèles numériques sont plus souvent adaptées pour des conditions plus complexes comme les conditions expérimentales en climat réel. Cependant la plupart des résultats de simulations numériques comparés aux résultats expérimentaux, montrent des écarts dans l'estimation de la réponse des matériaux hygroscopiques. Au même moment, lors de comparaison de résultats numériques de différents modèles, les résultats sont généralement proches entre eux. Aussi, d'autres paramètres comme la pluie battante ou une lame d'air ventilée rendent encore plus compliquée la recherche des causes des écarts entre résultats numériques et expérimentaux.

Ce travail se focalisera sur ces écarts entre résultats numériques et expérimentaux. Pour cela le dispositif expérimental en conditions climatiques réelles mis en place dans ce travail met au point une solution pour se passer de lame d'air dans l'épaisseur de la paroi, et aussi de pare

vapeur. Sera donc utilisée une paroi avec une isolation thermique importante, et constituée essentiellement d'un matériau hygroscopique et perméable à la vapeur d'eau. Le dispositif et ses résultats sont détaillés dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Dispositif expérimental - Résultats

2.1 Description du dispositif expérimental

Cette partie décrit le dispositif expérimental utilisé lors de ces travaux. Ce dispositif est composé de deux cellules PASSYS (PASsive Solar Components and SYStems Testing, 1986–1992)(Jensen et al., 1989) construites dans le cadre du programme européen PASSYS. Ces deux cellules ont leurs ambiances intérieures contrôlées. Chacune des cellules permet de tester un assemblage de paroi soumis côté intérieur à l'ambiance contrôlée et de l'autre côté au climat extérieur. Chaque paroi à tester est donc assemblée séparément et fixée à la cellule grâce à un emplacement dédié. L'ensemble cellule - paroi est instrumenté, et une station météorologique située à proximité permet de relever les conditions aux limites extérieures. L'objectif ici est de tester des parois légères, très hygroscopiques et très perméables à la vapeur. Un maximum de matériaux composant les parois sera choisi parmi ceux utilisés dans la tâche 1 du du projet HYGROBAT [(Woloszyn et al., 2014)], afin d'avoir une continuité entre les différentes tâches qui le constituent. Les travaux de montage des parois testées ont démarré en Décembre 2012, et les mesures expérimentales vont d'Avril 2013 à Septembre 2014.

2.1.1 Présentation des cellules

Emplacement

Le site abritant le dispositif expérimental est celui du CEA - INES situé sur la technopole de Savoie Technolac au Bourget du Lac (Coordonnées : 05° 52' 29" E ; 45° 38' 34" N), Savoie. Le site est sur une plaine orientée Nord - Sud et encadrée à l'est par le Mont du Chat (1504 m d'altitude), à l'ouest par le mont Revard (1562 m d'altitude) et au Nord par le Lac du Bourget (Figure 2.1). Les vents ont donc pour direction principale la longueur de la vallée, avec un sens dominant Sud Est - Nord Ouest pendant la journée, et un sens inverse pendant la nuit (Brun, 2012).

FIGURE 2.1 – Emplacement de l'INES(Gauche, point rouge) ; Plan détaillé (Droite ; Plate forme INCAS encadré rouge ; Cellules PASSYS 1 et 2 cercles bleus)

Les détails sur l'ensoleillement et les précipitations durant la période expérimentale sont présentés dans la partie traitant des résultats expérimentaux.

Structure des cellules

Les cellules PASSYS ont été conçues dans le but de tester dans des conditions climatiques réelles des composants solaires passifs. Elles ont deux types d'usage possibles. Le premier est de tester l'influence de composants sur le climat intérieur, l'ambiance intérieure n'est généralement pas régulée dans ces cas. Le second usage possible est le test de composants entre deux ambiances, l'une extérieure et l'autre intérieure généralement régulée.

Les cellules PASSYS présentes sur la plate forme expérimentale du CEA - INES sont au nombre de quatre et conçues de la même manière. Deux d'entre elles sont fixes et sans centrales permettant la régulation de l'air intérieur, les deux autres sont sur des plates formes tournantes leur permettant d'être orientables et sont dotées de centrales de traitement d'air (CTA). Ce sont ces dernières qui sont utilisées pour nos études expérimentales.

Les cellules PASSYS ont une structure métallique, et chaque cellule comporte deux compartiments : la cellule expérimentale proprement dite et un local technique (Figure 2.2). Une porte isolante et étanche permet la communication entre les deux pièces.

La cellule expérimentale est isolée sur 5 faces, la 6ème étant l'emplacement réservé à l'élément à tester. L'isolation, faite vers l'intérieur est constituée de 40 cm en polystyrène extrudé et un panneau de particules en parement intérieur. Une couche de 8 cm de laine minérale dans les interstices de l'ossature et un parement fait de tôles d'acier complète le côté extérieur de l'enveloppe de la cellule PASSYS. La résistance thermique des 5 faces constituant l'enveloppe de la cellule expérimentale est inférieure à 0,1 $W/(m^2.K)$ (Jensen et al., 1989). Le volume intérieur de la cellule expérimentale est de 36,5 m^3.

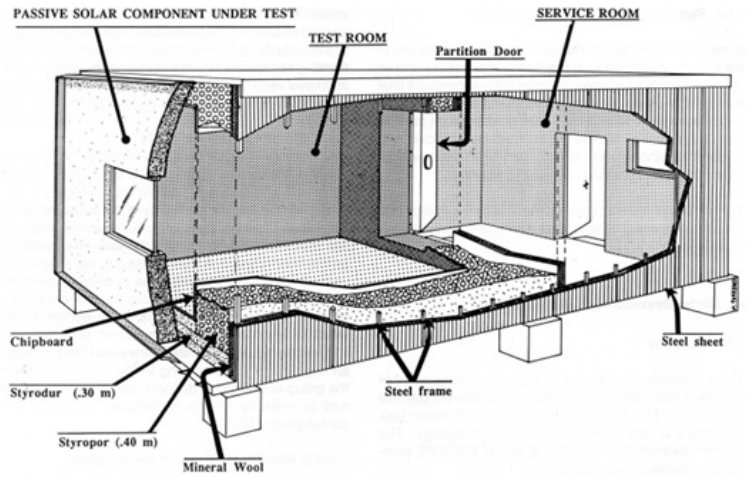


FIGURE 2.2 – Structure 3D d'une cellule PASSYS. Issu de (Jensen et al., 1989)

L'élément à tester, qui constitue la 6ème face de la cellule et qui referme cette dernière, peut avoir des dimensions allant jusqu'à 3,6 m de largeur et 3,27 m de hauteur. Par contre, à cause de l'épaisseur de l'isolation de la cellule, la surface de contact de l'élément à tester avec l'air intérieur de la cellule n'est que de 8 m^2. L'élément à tester est posé en applique sur la cellule, et un cadre métallique permet de le garder en place et bien fixé sur la cellule (Figure 2.3).

FIGURE 2.3 – Cellule PASSYS

Les cellules sont sur des plateformes orientables et à 50 cm du sol, il n'y a donc pas de contact entre la cellule et le sol et l'air circule sur toutes leurs faces. Il est aussi à noter que si les alentours immédiats des cellules n'ont pas de bâtiments dont l'ombrage les affecte, la présence d'un bungalow de maintenance de couleur blanche peut entrainer une différence de rayonnement global sur les parois testées de chacune des deux cellules, surtout lorsqu'elles sont orientées vers le Nord (Voir Figure 2.1).

Centrales de traitement de l'air intérieur des cellules

La régulation des propriétés physiques de l'air intérieur de chaque cellule est assurée par une centrale de traitement d'air (Figure 2.4). Les deux centrales de traitement d'air sont identiques.

FIGURE 2.4 – Centrale de traitement d'air d'une cellule PASSYS

Chaque centrale de traitement d'air (CTA) a un débit fixe de 900 m^3/h dont 500 m^3/h est dédié à la cellule. L'air traité de la CTA est injecté dans la cellule par des diffuseurs situés dans le faux plafond, et repris en partie basse par un conduit situé dans la cloison séparant la cellule du local technique. L'air repris est en partie rejeté, et en partie retraité dans le système pour revenir dans la cellule. Aussi, de l'air neuf peut être pris à l'extérieur et traité pour être injecté dans le système. Chaque centrale de traitement d'air (CTA) est équipée de :

- Trois batteries électriques dont deux de préchauffage et une de réchauffage
- Deux batteries de refroidissement alimentées par un groupe froid en eau glacée (Température de départ 1°C)
- un humidificateur d'air

La CTA est pilotée par un ordinateur d'où peuvent être fixés température, humidité relative et débit d'air neuf injecté dans le système. Les changements de consignes ne peuvent pas être automatisés et sont donc entrés manuellement par l'opérateur. La plage de fonctionnement de la CTA est de 15 à 35°C en température et de 6 à 14 g/kg d'air sec (Figure 2.5).

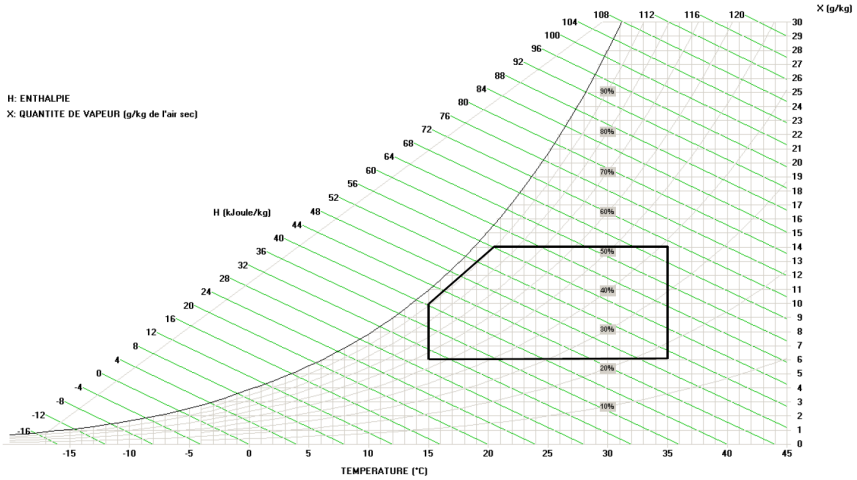


FIGURE 2.5 – Plage de fonctionnement de la CTA

La régulation par rapport à la consigne se fait grâce à des capteurs qui mesurent les propriétés de l'air repris. En régime permanent, l'air intérieur de la cellule est régulé avec une précision

de +/- 0,5°C et +/-3% d'humidité relative.

2.1.2 Parois testées et instrumentation

Composition des parois testées

Le choix des matériaux constituant la paroi ont été faits avec les partenaires du projet HYGROBAT (Woloszyn et al., 2014). Les matériaux caractérisés dans la tâche 1 du projet ont été les suivants :

- Bois massif : Épicéa
- Fibre de Bois
- OSB (Oriented Strand Board)
- Ouate de Cellulose

Compte tenu des objectifs fixés par le projet (Chapitre 1), le choix s'est porté sur une paroi à ossature bois et à l'isolation en fibre de bois (Figure 2.6). La composition de la paroi est complétée par un enduit minéral à l'extérieur servant à protéger la paroi des intempéries.

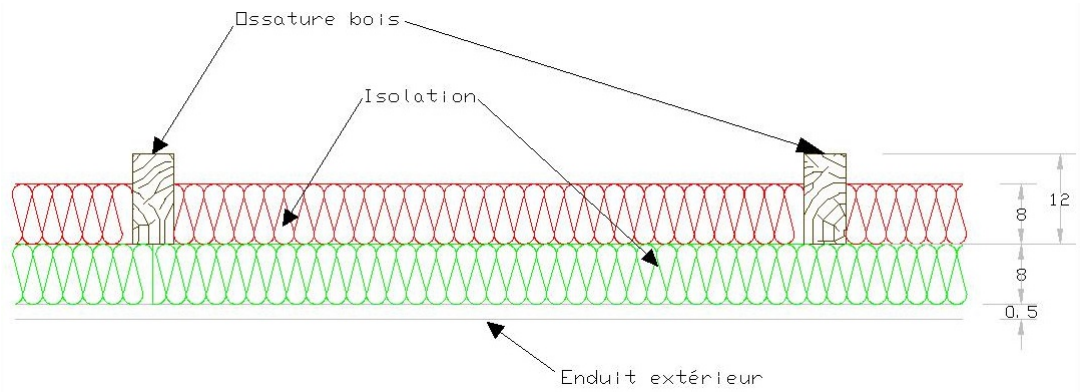


FIGURE 2.6 – Coupe de la paroi (Unité : cm)

Si le choix de l'ossature était évident, celui de l'isolation s'est fait compte tenu du mode de mise en œuvre plus simple pour la fibre de bois (panneaux plutôt que projection en vrac pour ouate de cellulose), une caractérisation moins difficile (densité de la ouate dépendant du mode constructif) et une meilleure tenue mécanique à long terme.
Une première phase des tests consistait à construire la même paroi sur les deux cellules. Cette phase de tests consistait à valider la fiabilité des mesures en mettant ces parois identiques dans les mêmes conditions, puis ensuite à les tester dans des orientations différentes. Durant la seconde phase de tests, une des parois a été modifiée, par l'ajout d'une couche supplémentaire de 4 cm d'isolant en fibre de bois et d'un parement intérieur fait de panneaux d'OSB (Figure 2.7).

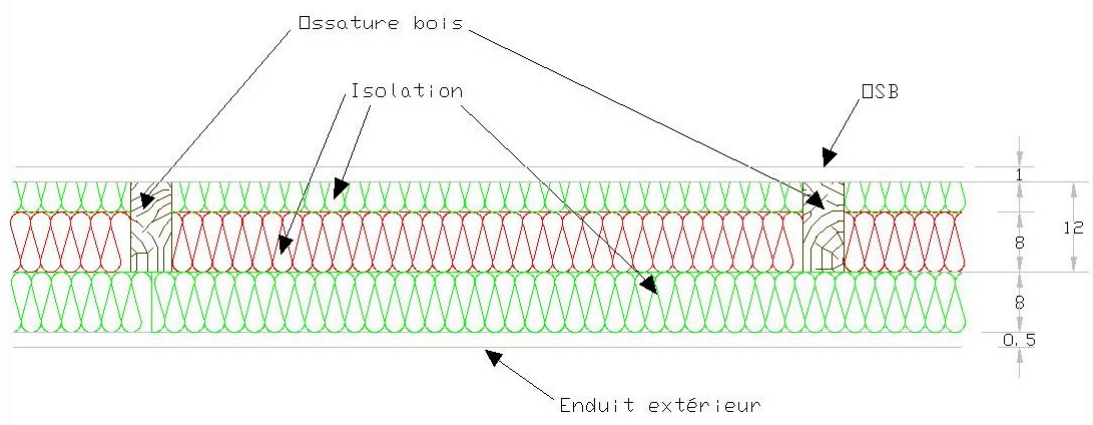


FIGURE 2.7 – Coupe de la paroi modifiée, Phase 2 (Unité : cm)

Mise en œuvre des parois

Le montage de la paroi a été effectué conjointement avec le partenaire du projet, CrittBois. Notre part consistait à la pose de l'instrumentation.

Le montage de la paroi a commencé par l'assemblage et la pose de l'ossature (Figure 2.8). Les deux couches d'isolant sont ensuite ajoutées. L'isolant est sous forme de panneaux de 8 cm d'épaisseur, et de tailles différentes permettant de combler l'espace de manière homogène. Une partie des panneaux, posés verticalement entre les axes de l'ossature constitue la première couche d'isolation. La deuxième couche est constituée de panneaux disposés horizontalement. Cette deuxième couche est fixée à la première et à l'ossature.

FIGURE 2.8 – Montage de la paroi : Ossature (Gauche), Deuxième couche d'isolant en cours (Droite)

Les parois sont ensuite achevées à l'extérieur par un enduit d'environ 5 mm d'épaisseur.Les principales propriétés recherchées pour cet enduit ont été une perméabilité minimale à l'eau liquide tout ayant une perméabilité maximale à la vapeur d'eau. L'enduit utilisé est un enduit minéral de la marque "Sto". Il est fait de quatre couches, respectivement deux de chacun des produits "StoLevell Uni" et "StoPrep Miral". Entre les deux premières couches et les suivantes a été posé un treillis en fibre de verre de 1 mm d'épaisseur(Figure 2.9).

FIGURE 2.9 – Structure de l'enduit

La partie basse du cadre métallique supportant les façades pouvant accumuler de l'eau pendant les précipitations, les parois montées doivent être imperméabilisées sur leur partie basse pour éviter les infiltrations. Dans notre cas un joint en silicone a été utilisé à la jonction entre le bas de la paroi et le cadre métallique.

La figure 2.10 montre la fin de l'installation du parement intérieur en OSB, lors de la deuxième phase des tests, fin 2013.

FIGURE 2.10 – Pose des plaques d'OSB

2.1.3 Instrumentation

L'instrumentation générale du dispositif expérimental est divisé en trois sections. La première mesure les conditions intérieures de la cellule, la seconde les conditions extérieures, et la dernière les propriétés de l'élément de paroi testé. Les deux premières sont permanentes.

Intérieur de la cellule

Chaque cellule expérimentale est instrumenté pour connaitre les propriétés physiques de l'air intérieur. Les mesures physiques relevées sont la température (ordinaire et opérative), l'humidité relative et la vitesse de l'air intérieur. Ces mesures sont assurées respectivement par des sondes platines (dont une dans un globe noir), un thermo-hygromètre, et un anémomètre. Les capteurs uniques se trouvent au centre du volume de la pièce(Figure 2.11, points rouges), et les autres sondes platines sont réparties dans le volume selon le schéma de la Figure 2.11, pour permettre de connaitre la distribution de la température dans toute la pièce.

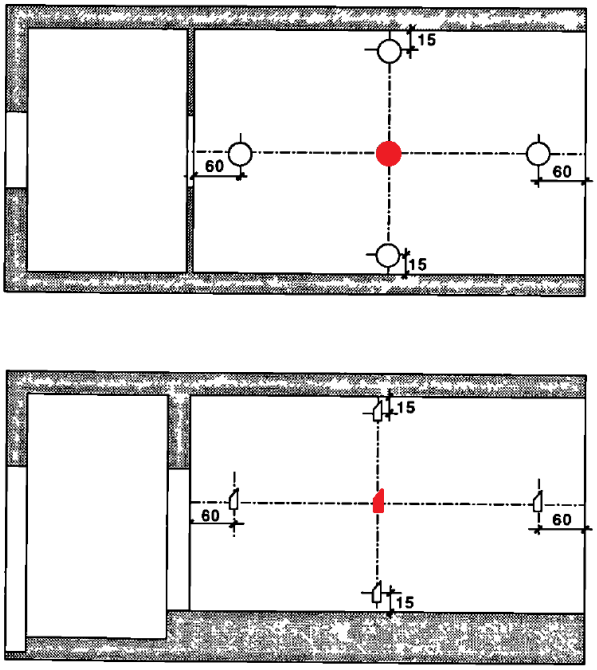


FIGURE 2.11 – Schéma de l'emplacement des capteurs d'air intérieur : Vue de haut (Haut), Vue de profil (Bas). Issu de (Jensen et al., 1989)

Le tableau suivant relève la précision et les plages de mesures des capteurs précités :

Grandeur mesurée	Type de capteur	Plage de mesure	Précision
Température	Sondes platines	[-50 ; 100] °C	+/- 0,1 °C
Humidité relative	Thermo-hygromètre	[-50 ; 100] °C [0 ; 100] % HR	+/- 0,1 °C +/- 0,8 %
Vitesse de l'air	Anémomètre	[0 ; 5] m/s	

TABLE 2.1 – Précision des capteurs à l'intérieur de la cellule

Conditions aux limites extérieures

Les mesures physiques des conditions extérieures sont quant à elles assurées par une station météorologique située à 50 m des cellules PASSYS. Les mesures physiques que nous y relevons pour les besoins de nos tests et les instruments correspondants se trouvent dans le tableau suivant :

Grandeur mesurée	Hauteur Capteur	Inclinaison	Type de capteur	Unité de mesure
Pression absolue	1,5 m	•	Baromètre	hPa
Rayonnement solaire direct	10,5 m	Suivi	Pyrhéliomètre	W/m^2
Rayonnement solaire global	12 m	0°	Pyranomètre	W/m^2
Rayonnement infrarouge	12 m	0°	Pyrgéomètre	W/m^2
Pluviométrie	1,5 m	•	Pluviomètre	mmH2O
Humidité relative	1,5 m	•	Hygromètre	$\%HR$
Température	1,5 m	•	Thermistance	°C
Direction du vent	10 m	•	Anémomètre	° (0 à 360, réf. Sud)
Vitesse de vent	10 m	•	Anémomètre	m/s

TABLE 2.2 – Données relevées par la station météo

Paroi

L'instrumentation des parois comporte un total de 74 capteurs par paroi test. Elle est composée de thermo-hygromètres (Figure 2.12), de thermocouples, de fluxmètres thermiques et de capteurs différentiels de pression. Les thermocouples sont de type T, les thermo-hygromètres sont des SHT75 du fabricant « Sensirion », les fluxmètres thermiques étant fournis par l'entreprise « Captec » et les capteurs différentiels de pression de marque « Furness Controls ».

FIGURE 2.12 – Thermo-hygromètre (Gauche), Thermocouple (Centre), Fluxmètre thermique (Droite)

L'emplacement des thermocouples et thermo-hygromètres est détaillé dans la figure 2.13 :

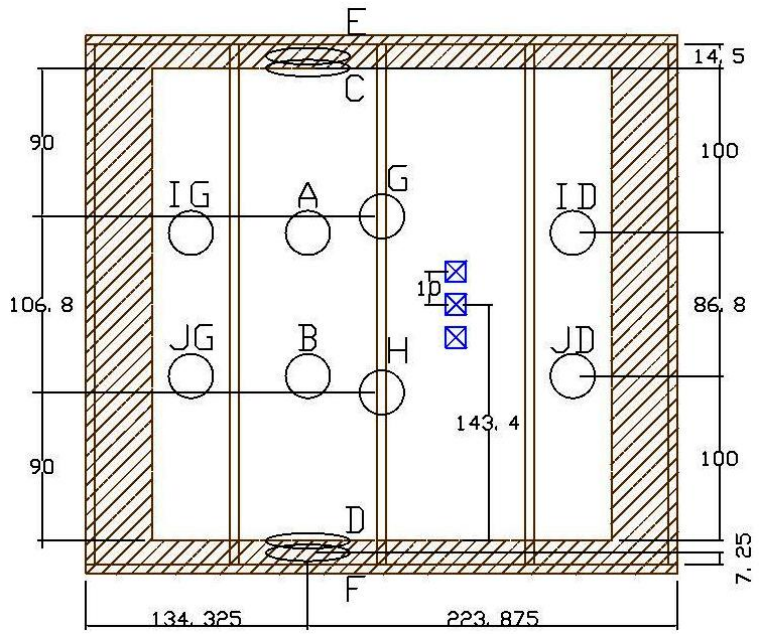


FIGURE 2.13 – Schéma des zones d'emplacement des thermocouples, thermohygromètres (voir Table 2.3) et fluxmètres thermiques (en bleu) ; Unité : cm.

En outre, à l'extérieur, sont installés un pyranomètre par façade pour connaitre le rayonnement global incident sur chaque façade (Figure 2.14).

FIGURE 2.14 – Pyranomètre posé sur la paroi testée

La répartition des capteurs dans les différentes zones est détaillée dans le tableau suivant :

Capteurs	Nombre par paroi	Zones correspondantes	Marque (Modèle)	Plage de mesure	Précision
Thermo-hygromètres	42	A B C D E F G H	Sensirion (SHT75)	[-20 ; 60] °C [10 ; 90] %	+/- 0,3 °C +/- 1,8 %
Thermocouples	36	B C D G H IG ID JG JD	Type T	[-20 ; 60] °C	+/- 0,5 °C
Fluxmètres thermiques	3		Captec (100 x 100 mm^2) mm^2)		0,06 W/m^2 + 0,003 % *(Valeur mesurée)
Différentiel de pression	1		Furness Controls (FC0332)		< 0,5 % *(Valeur mesurée)
Pyranomètre	1		Campbell Scientific (CMP11)	[285 ; 2800] nm	

TABLE 2.3 – Détails sur instrumentation de la paroi

Il est à noter que les données du tableau précédent sur la plage et la précision des mesures sont des données de constructeurs, mis à part celles des thermocouples soudés sur place, et calibrés à l'aide d'un bain thermostaté (Figure 2.15)dans un intervalle de mesure correspondant aux conditions réelles.

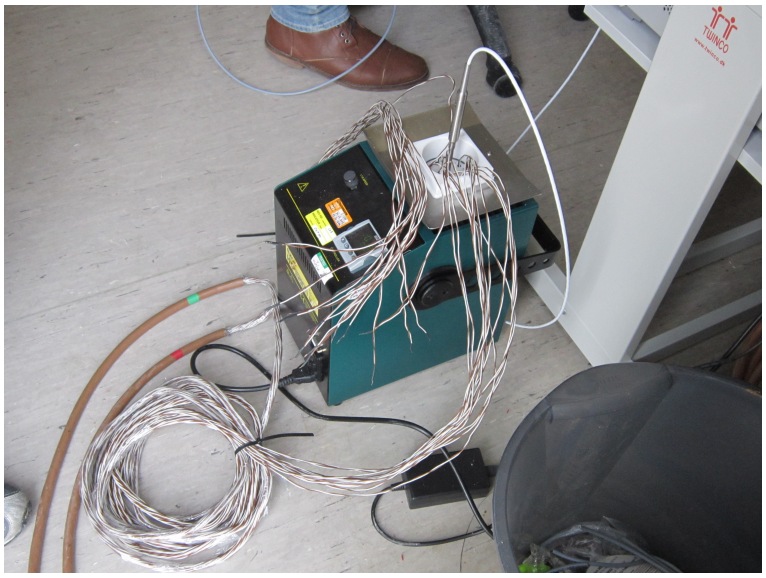


FIGURE 2.15 – Étalonnage des thermocouples

La calibration a consisté à plonger les thermocouples dans un bain réglé à une température fixe et à relever les valeurs de température relevées par chacun des capteurs. Cette opération est effectuée sur une plage allant de -20°C à 60°C, avec 10°C d'intervalle entre chaque série de mesures. Les valeurs relevées sont comparées aux températures relevées par une sonde PT100 à chaque palier. Ainsi pour chaque thermocouple, une équation permet de corriger les valeurs brutes relevées. Toutes ces équations sont utilisées lors du traitement des données expérimentales.

Dans chacune des zones les capteurs ont été posés tout au long de l'épaisseur (Figure 2.16), entre les différentes couches et au milieu des couches d'isolant dans certaines zones (B, C et D). Les capteurs dans la même zone ont été décalés en hauteur ou en largeur de 8 cm afin de ne pas perturber les phénomènes physiques. Les capteurs dans les zones B C et D et ne se situant pas à l'interface des différentes couches des parois ont été logés dans des trous percés latéralement dans les plaques d'isolant. Ces trous ont été rebouchés partiellement après l'insertion des capteurs.

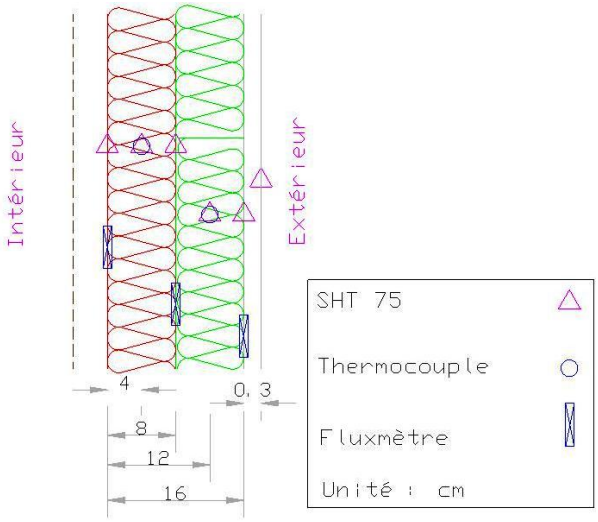


FIGURE 2.16 – Schéma de l'emplacement des capteurs dans l'épaisseur de la paroi

Les zones situées sur l'ossature des parois(G et H) ont aussi reçu un traitement particulier. En plus de la disposition des capteurs dans l'épaisseur comparable à celle des zones B, C ou D, des capteurs ont été placés autour (Thermo-hygromètres) et dans l'ossature (Thermocouples) pour connaitre le comportement de celle ci. Pour ces derniers capteurs des trous ont donc été aussi percés dans l'ossature, ayant pour diamètre l'exacte épaisseur des câbles. Ces trous n'ont donc pas été bouchés après la pose des capteurs.
Les thermo-hygromètres situés à l'interface enduit/isolant ou à la surface extérieure ont été particulièrement protégés pour éviter toute dégradation du au contact chimique entre l'enduit et ceux-ci. Ils ont donc été recouverts par un tube avec sur sa partie ouverte d'une membrane de type gore-tex perméable à l'air et à la vapeur mais imperméable aux liquides (Figure 2.17). Ce dispositif permet de protéger le capteur de l'enduit tout en lui permettant d'être en équilibre avec l'air des pores et prendre des mesures correctes. Une étude faite en interne au LITEN du CEA a permis de déterminer que ces protections n'ont pas d'incidence significative sur la fiabilité des mesures (Capelle, 2012).

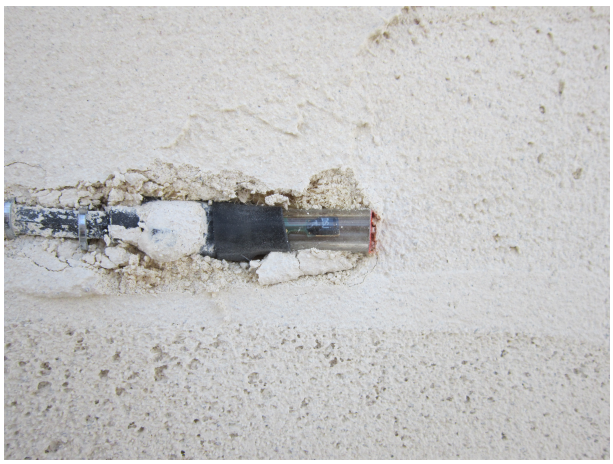


FIGURE 2.17 – Capteur protégé

Les fluxmètres ont été posés en partie courante, entre les couches de la paroi ainsi que à l'interface paroi/air intérieur. Les capteurs différentiels de pression, permettant de connaitre la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur de chaque cellule sont quant à eux reliés à deux tubes, l'un étant passé à l'extérieur et l'autre restant à l'intérieur.
Il est à noter que lors de la modification d'une des parois, des capteurs supplémentaires ont été posé en même temps que les couches supplémentaires d'isolants et de parement intérieur. Ils s'agit de thermo-hygromètres et de fluxmètres thermiques, posés en zones courantes (A et B) pour les premiers (Figure 2.18).

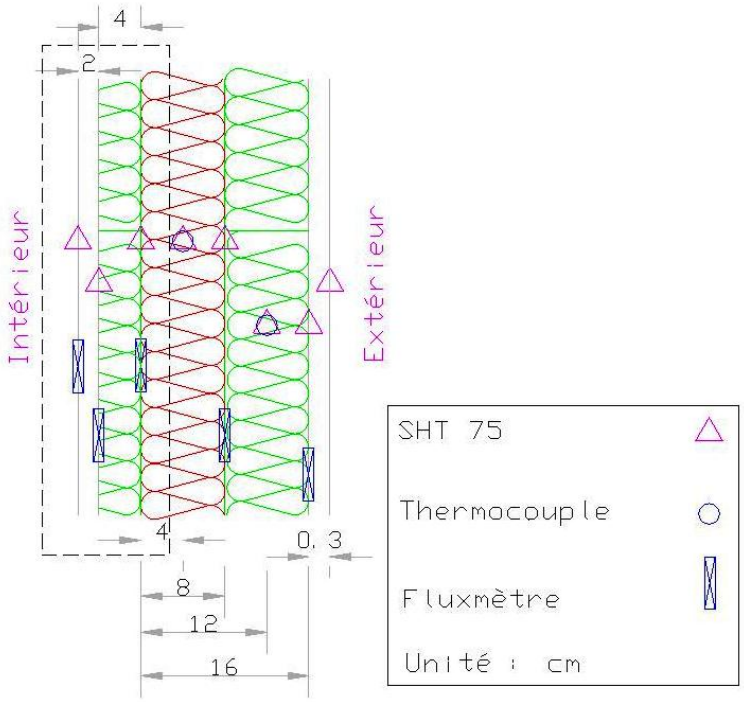


FIGURE 2.18 – Schéma de l'emplacement des capteurs supplémentaires après modification de la paroi (Encadré)

Les capteurs ne sont pas tous connectés au même système d'acquisition. Les thermo-hygromètres de chaque paroi ont un système d'acquisition particulier, développé et fourni par l'entreprise « STEP Automation & Test ». Ces capteurs sont câblés à des boitiers intermédiaires par groupes de 5 capteurs. Ensuite les boitiers sont regroupés à un multiplexeur spécifique et

connectés à un ordinateur, qui permet de les contrôler en temps réel.
Tous les autres capteurs utilisés sur la paroi où l'intérieur de chaque cellule sont connectés via une armoire propre à chaque cellule PASSYS à une centrale d'acquisition de type "Agilent", elle-même connectée aussi à un ordinateur.
L'ensemble des mesures est enregistrée avec une fréquence de 5 minutes. Néanmoins les systèmes d'acquisition étant différents les mesures ne sont synchronisées que pour les capteurs appartenant au même système d'acquisition ; il peut donc y avoir un décalage de 2 minutes entre l'acquisition des mesures de thermocouples et de thermo-hygromètres, les deux ayant des systèmes d'acquisition séparés. Les mesures de la station météorologique sont elles faites séparément, et leur fréquence d'acquisition est de 1 minute. L'horloge par contre est centralisée pour toutes les mesures quel que soient le système d'acquisition, et correspond à l'heure GMT.

Précision spatiale des capteurs La précision spatiale des capteurs peut jouer un rôle important dans l'interprétation des données expérimentales. Dans ce sens, il est important d'en prendre en compte les détails.
Les capteurs posés en surface intérieure sont fixés sur la paroi par des agrafes ou un système de chevilles dans le cas du fluxmètre thermique. Un contact de l'élément sensible avec la paroi n'est pas toujours assuré, surtout dans le cas des thermo-hygromètres.
Les capteurs entre les deux couches d'isolant sont placés à l'exacte profondeur, puisqu'elles sont justes plaquées entre les couches.
Les capteurs sur les parties latérales de l'ossature peuvent ne pas être à l'emplacement exact souhaité en profondeur, avec un décalage probable allant jusqu'à 5 mm. Aussi, le capteur sensé mesurer les température et humidité relative au coin formé par l'ossature et l'isolation est légèrement enfoncé au dessous de cette dernière et pas laissé à l'air. En outre pour tous ces thermo-hygromètres, l'épaisseur du câble fait qu'ils pourraient mesurer les valeurs de l'air plutôt que les valeurs à l'interface latérale entre l'ossature et l'isolation.
Si les thermocouples dans l'ossature sont posés à l'emplacement exact recherché à cause du diamètre et de la profondeur très réduits des trous percés, il n'en est pas forcément de même pour les capteurs placés dans des trous faits dans l'isolation de fibre de bois. Ces derniers trous étant larges (1 cm) et souvent profonds (plus de 20 cm), il se peut qu'il y ait de légers biais. Ces effets ont néanmoins été limités par les précautions prises lors du chantier et les capteurs sont dans le pire des scénarios à +/- 1 cm de la position souhaitée en profondeur.
Enfin, les capteurs de surface extérieure ont été légèrement recouverts d'enduit pour qu'ils ne mesurent pas une température qui soit différente de la réelle température de surface, en surestimant les effets du rayonnement solaire.

2.2 Résultats expérimentaux

Dans cette partie sont décrits et analysés les résultats expérimentaux des tests effectués sur le dispositif décrit précédemment. Les analyses portent sur une période d'un an de tests. L'analyse est faite en deux parties, avec une première analyse globale sur le long terme, et une analyse approfondie sur le court terme. Pour cette dernière analyse des séquences spécifiques ont été sélectionnées.

2.2.1 Repères

Les analyses étant faites sur les résultats représentés en une dimension (en fonction de l'épaisseur), le repère est l'interface entre l'isolant et l'air intérieur dans la première configuration de paroi, et les positions sont comptées positivement de l'intérieur vers l'extérieur (Voir figure 2.16).

2.2.2 Description générale

Les tests effectués sur les cellules PASSYS ont commencé en Avril 2013. La durée totale des tests présentée ici est de un an, et inclut donc les quatre saisons. La figure 2.19 montre la chronologie des tests effectués durant la période étudiée :

		11-Apr-13	24-May-13	31-May-13	21-Jun-13	11-Jul-13	25-Jul-13	31-Jul-13	13-Aug-13	23-Aug-13
PASSYS 1	T	25°C						16°C		
	HR	40%	70%	40%	70%	40%		70%	40%	70%
	Orientation	Nord								
	Comp. paroi	16 cm FdB*								
PASSYS 2	T	25°C						16°C		
	HR	40%	70%	40%	70%	40%		70%	40%	70%
	Orientation	Nord					Sud			
	Comp. paroi	16 cm FdB*								

		06-Sep-13	16-Sep-13	27-Sep-13	09-Oct-13	18-Nov-13	08-Dec-13	18-Dec-13	03-Feb-14	13-Mar-14
PASSYS 1	T	20°C								
	HR	70%		60%		40%				60%
	Orientation	Nord			Sud					
	Comp. paroi	16 cm FdB*						20 cm FdB*	20 cm FdB* + OSB	
PASSYS 2	T	20°C								
	HR	70%		60%				40%		60%
	Orientation	Sud								
	Comp. paroi	16 cm FdB*								

FIGURE 2.19 – Chronologie de tests effectués (FdB* :Isolant en fibre de bois)

Les premiers tests ont été effectués pour valider les mesures et leur répétabilité. Ainsi du 11 Avril au 11 Juillet 2013, les deux façades ont la même composition et sont toutes deux orientés plein Nord. Après une période stable (25°C et 40% d'humidité relative), un échelon en humidité relative intérieure est effectué afin d'étudier la réaction des façades à une sollicitation de ce genre. L'échelon est repris quelques semaines plus tard, en laissant plus de temps après le passage à 70% pour atteindre un régime relativement permanent avant un retour à 40%.

La période estivale est marquée par l'orientation de la façade de la PASSYS 2 plein Sud, afin d'avoir une exposition maximale à l'ensoleillement, tout en gardant l'autre au Nord comme témoin. Les températures étant élevées pendant cette période, avec une moyenne proche de la température de consigne intérieure, un passage en mode climatisation a été décidé. Ce passage a été fait en cherchant à maintenir la pression de vapeur constante, ce qui a nécessité une augmentation simultanée de la consigne intérieure en humidité relative. L'échelon effectué dans les jours qui suivent est effectué avec le même objectif que les deux premiers.

Les tests de la suite sont effectués toujours dans le même objectif : celui de modifier les conditions dans une cellule en gardant l'autre comme témoin. Ainsi la PASSYS 1 est elle aussi orientée plein Sud, et un échelon est effectué dans cette cellule quand les conditions sont considérés comme stables en comparaison avec l'autre cellule. La structure de la paroi testée sur la PASSYS 1 est ensuite modifiée, et la séquence hivernale qui suit est marquée par un nouvel échelon dans les deux cellules, la PASSYS 2 servant de témoin par rapport à ce qui se passe dans la PASSYS 1.

L'impact principal des changements d'orientation lors des tests est la variation du rayonnement global reçu par chaque paroi (Figure 2.20) :

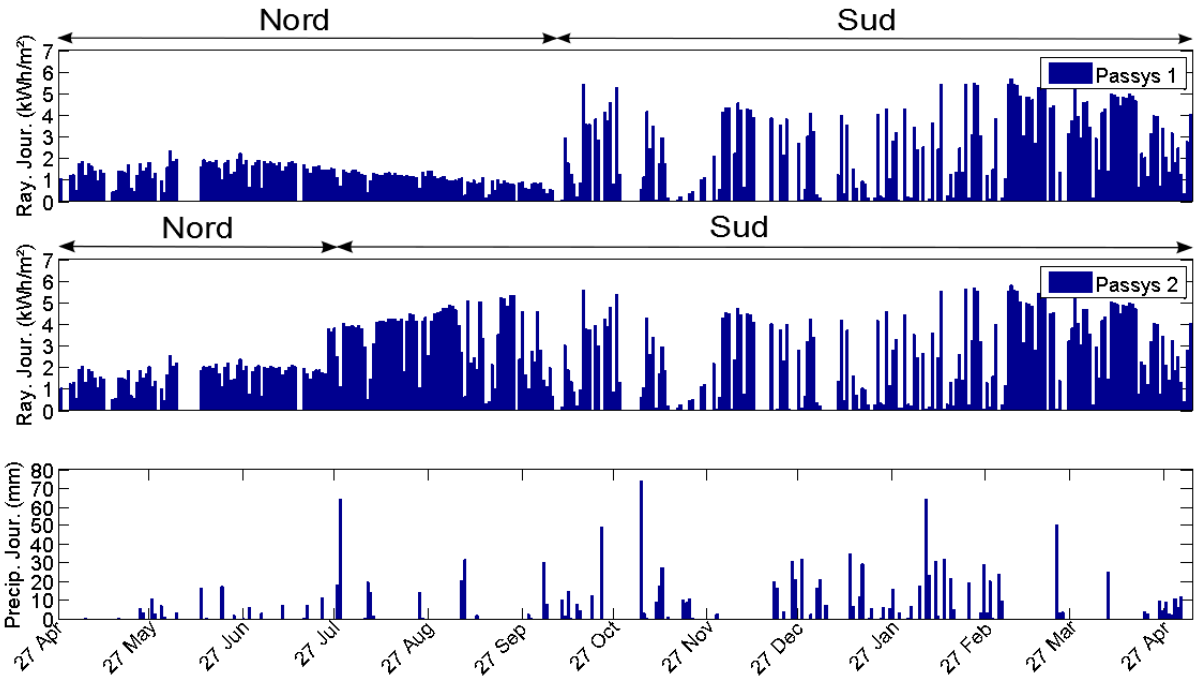


FIGURE 2.20 – Cumuls journaliers des rayonnements sur chacune des façades (Source : Pyranomètres de façades) et de la pluviométrie sur le site (Source : Station météo)

La figure 2.21 montre les mesures des propriétés physiques (température et humidité relative) de l'air aux limites intérieures et extérieures des deux parois testées :

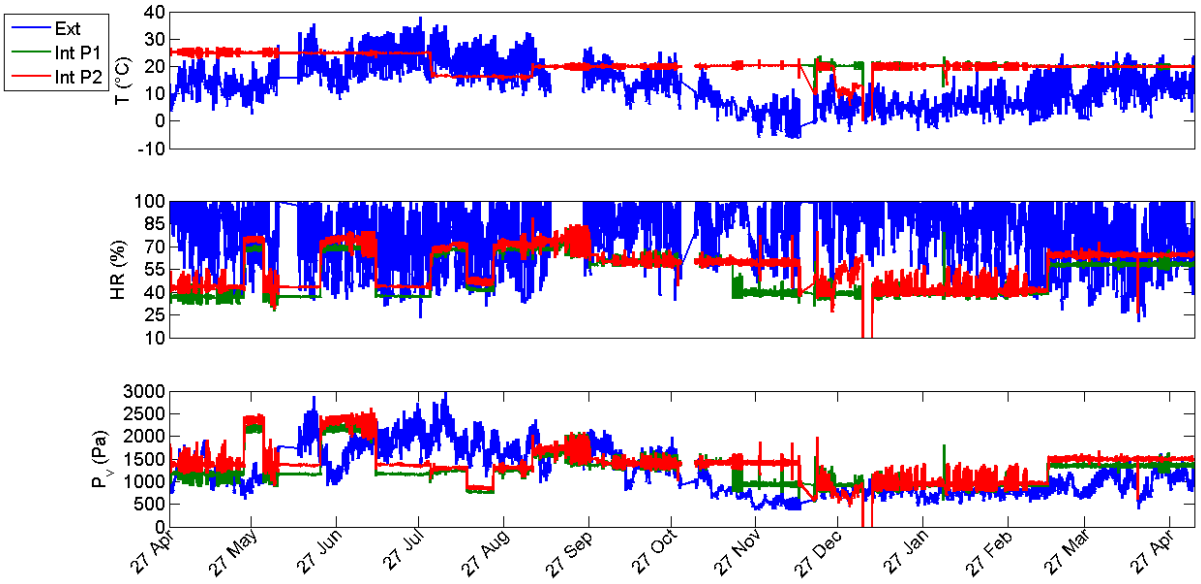


FIGURE 2.21 – Valeurs réelles des conditions intérieures et extérieures durant les tests

On peut observer que les deux CTA n'ont pas une réponse identique aux consignes données, ce qui conduit à une différence d'humidité relative dans les deux cellules. En effet elles atteignent les points de consigne avec une précision de 0,5 °C +/- de température et +/- 3% d'humidité relative. Une tentative de correction de cet effet a été effectuée en donnant des consignes légèrement différentes de manière à avoir des réponses identiques, à partir d'octobre 2013.

Beaucoup de bruit dans le contrôle de l'humidité relative a également été constaté. Ces évènements correspondent aux moments où les pressions de vapeur de l'air intérieur et extérieur sont très proches.

2.2.3 Qualification des mesures

L'étude des résultats expérimentaux passe par une validation préalable de ces mesures. Vu que les comparaisons porteront sur deux façades identiques, les comparer lorsqu'elles sont dans des conditions identiques permet de fixer le cadre pour les autres comparaisons où l'une servirait de témoin à l'autre.

Une sélection de deux jours a été choisie pour effectuer cette validation. Ces deux jours sont issus de la période où les deux façades sont orientées plein Nord, avec des conditions de température et d'humidité relative intérieures identiques et stables. Les points de comparaisons sont situés dans les parties courantes (zones A et B, Figure 2.13).

La figure 2.22 montre la comparaison des mesures de température entre PASSYS 1 et 2 aux points correspondant à l'interface entre les différentes couches des façades (8, 16 cm) et à l'interface entre les façades et l'environnement intérieur et extérieur (0 cm, Surface extérieure) :

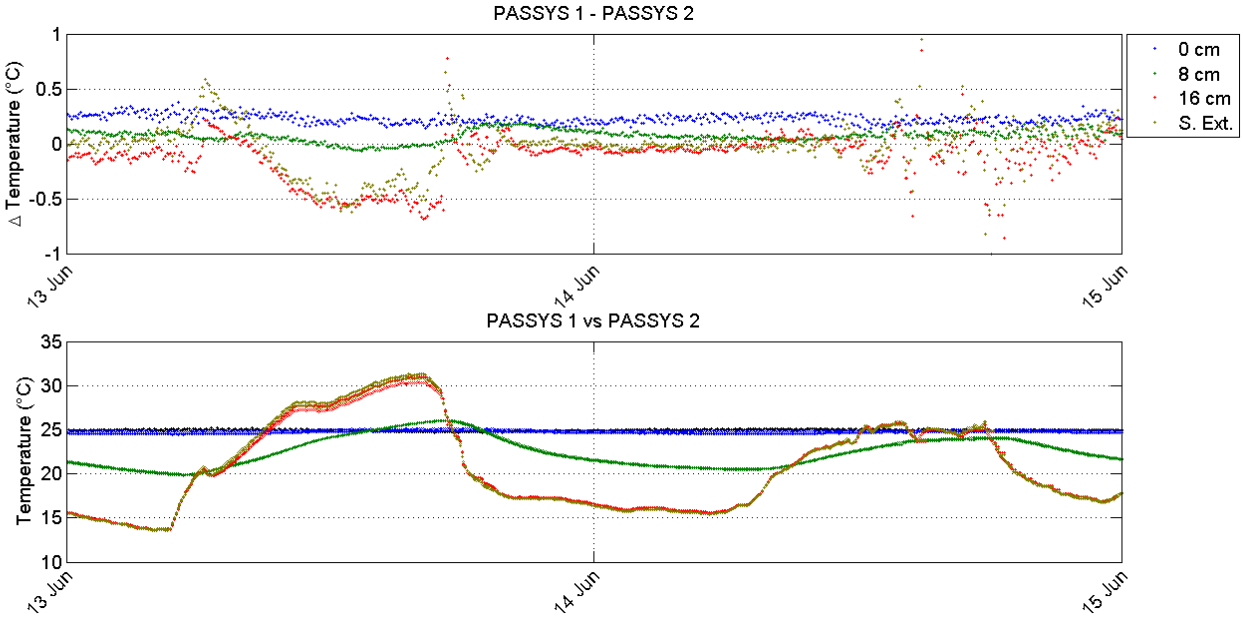


FIGURE 2.22 – Comparaison des températures relevées, zone A

Les écarts observés entre les mesures sont globalement inférieurs à l'intervalle de confiance des capteurs dont les mesures sont comparés (SHT75). Néanmoins des écarts au delà de 0,5°C sont observés dans la première journée, aux positions proches de l'extérieur (Surface extérieure et 16 cm). Cet écart peut s'expliquer par une différence entre les rayonnements reçus sur chaque façade ce jour là (Figure 2.23). La proximité de la PASSYS 2 à un bungalow de couleur blanche sur le site, entraine la réception d'un rayonnement solaire réfléchi par celui ci, ce qui est à l'origine de ces différences lorsque les deux façades sont orientées plein Nord.

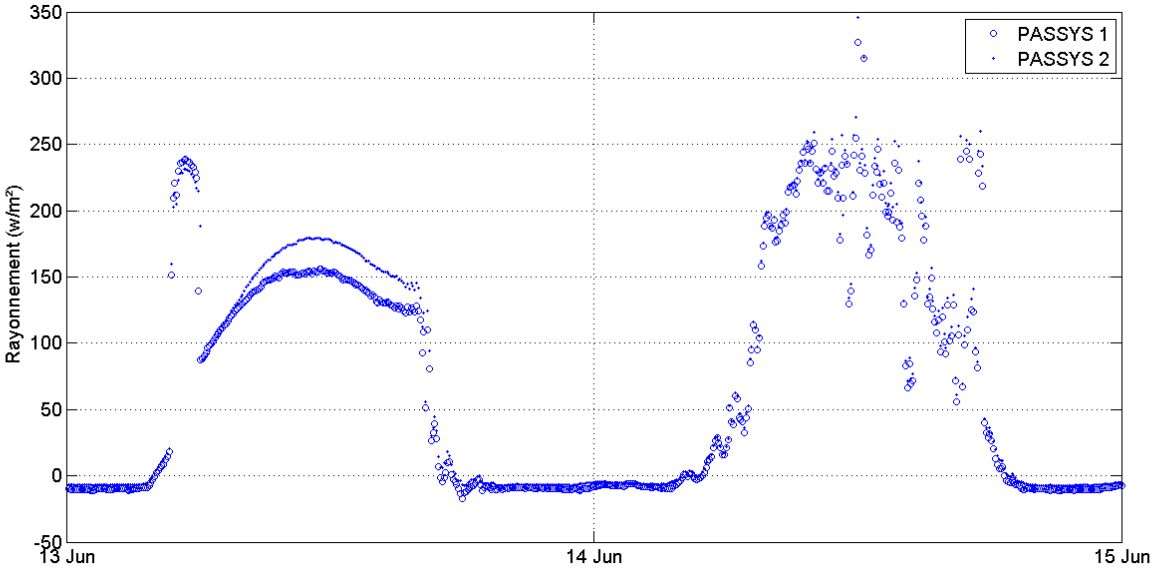


FIGURE 2.23 – Comparaison des rayonnements sur les façades

La Figure 2.24 permet une comparaison des températures aux points situés au milieu de chacune des deux couches d'isolant. Si les mesures à 4 cm sont correctes, celles à 12 cm montrent une différence. L'observation de la différence montre qu'elle découle du positionnement des capteurs (2.1.3. Instrumentation). Un biais existe donc dans une des façades, ce qui fait que le capteur concerné n'est pas à 12 cm. Des simulations numériques effectuées en prenant uniquement en compte les phénomènes thermiques ont permis de désigner le capteur concerné (PASSYS 2) et de connaitre sa position exacte (13 cm plutôt que 12).

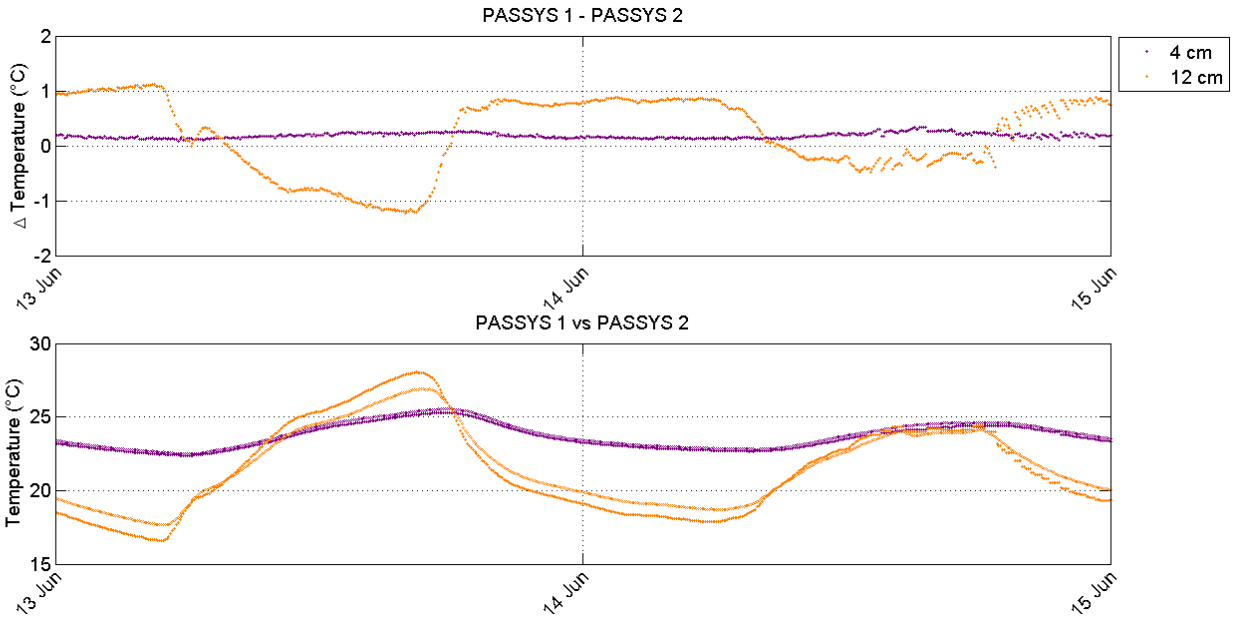


FIGURE 2.24 – Comparaison des températures relevées, zone B

La comparaison des mesures en humidité relative est faite au niveau de la figure 2.25 pour les mesures aux interfaces et 2.26 au milieu des couches d'isolant. Des différences sont relevées au niveau des humidités relatives intérieures des cellules, de près de 5% (Courbes en noir sur

figure 2.25), ce qui entraine un écart à 0, 4 et 8 cm. Cette effet s'estompe à 16 cm. Quant aux mesures à 12 cm et en surface extérieure, elles sont les conséquences des phénomènes expliqués en température, respectivement le positionnement du capteur en PASSYS 2 et le rayonnement global plus important sur la façade de cette même cellule.

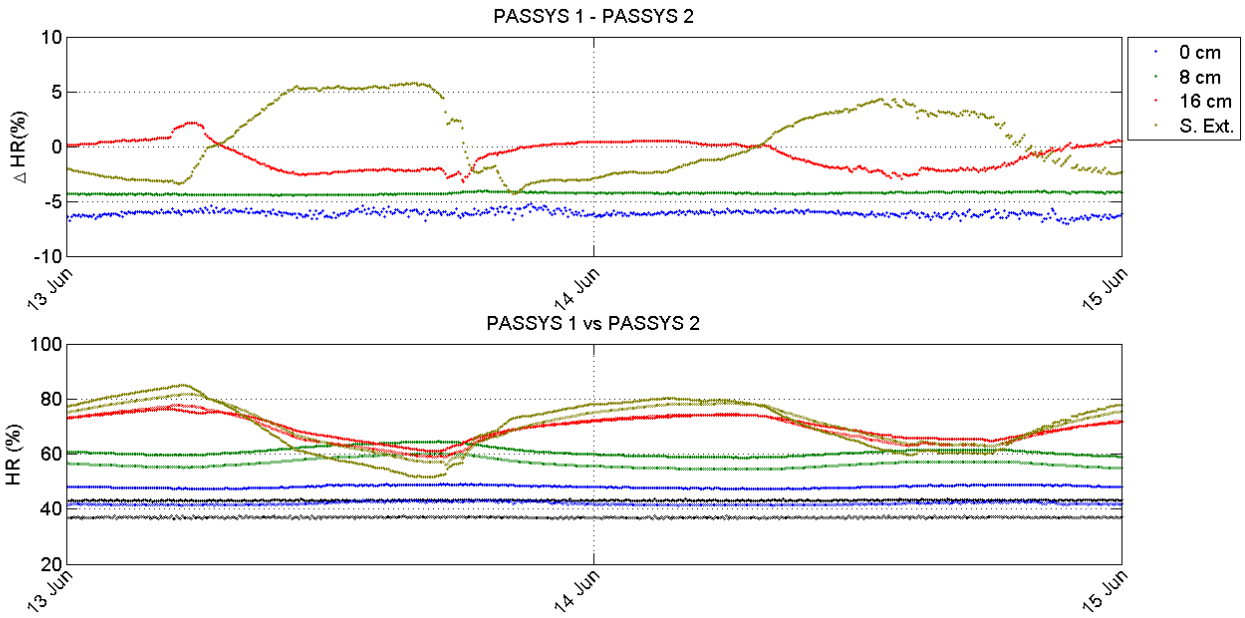


FIGURE 2.25 – Comparaison des humidités relatives relevées, zone A

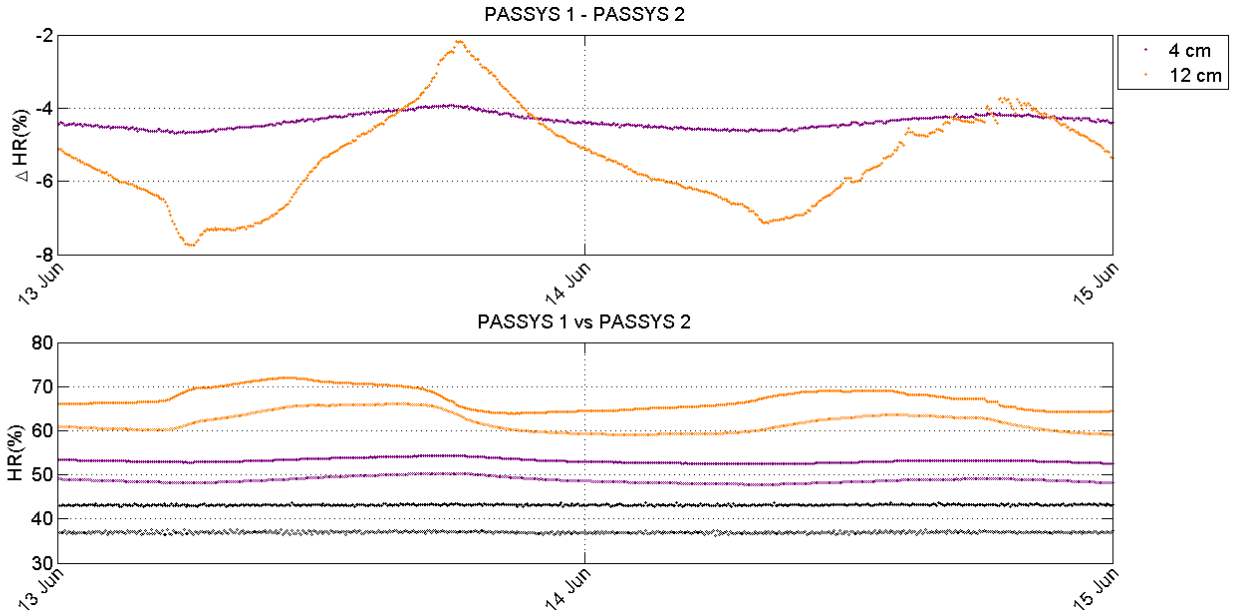


FIGURE 2.26 – Comparaison des humidités relatives relevées, zone B

Si les mesures en général sont correctes, les différences constatées devront être prises en compte lors du reste de l'analyse des résultats.

2.2.4 Analyse des résultats expérimentaux

Analyse à long terme

Les figures 2.27 et 2.28 montrent les moyennes journalières de la température et l'humidité relative en partie courante (zone A) des parois testées. La température moyenne extérieure varie entre 0 et 25°C, les valeurs maximales (entre 20 et 25°C) correspondent à l'été. Les températures de consignes intérieures étant la plupart du temps entre 20 et 25°C, elles sont donc généralement au dessus de la température extérieure, sauf pendant la période où la consigne intérieure est de 16°C.

L'humidité relative extérieure évolue inversement avec la température, avec des valeurs entre 90 et 70%, et les minimales ($\approx$ 70%) pendant l'été. L'humidité relative intérieure est généralement à 40%, avec des valeurs maximales à 70% lors des échelons. Dans tous les cas, l'humidité relative extérieure est supérieure ou égale à l'humidité relative intérieure.

Les températures moyennes dans les parois sont réparties de manière générale comme suit : La température à 0 cm est presque égale à la température intérieure, et la température à 16 cm à celle extérieure. Les cas différents sont la période estivale où la température à 16 cm passe au dessus de la température extérieure surtout dans la cellule orientée plein Sud (PASSYS 2, Figure 2.27), et la période suite à l'ajout d'isolant et du parement intérieur dans la PASSYS 1. La température à 8 cm se situe généralement à mi chemin entre les deux autres.

Les humidités relatives moyennes intérieures dans à 0 cm suivent les valeurs intérieures dans les deux cellules, avec un écart régulier de 5%. Cet écart est bien sûr réduit lors des passages à 70%, les humidités relatives étant très proches entre l'extérieur et l'intérieur. Lors de l'ajout de l'isolation en du parement intérieur en PASSYS 1, cette observation n'est plus valable, l'humidité relative à 0 cm étant décorrélée à celle intérieure. Les valeurs moyennes à 16 cm elles suivent les valeurs extérieures, sauf dans la période estivale dans la cellule qui est orientée plein Sud. Les valeurs à 8 cm sont à mi chemin entre les valeurs à 0 et 16 cm, comme dans le cas des températures.

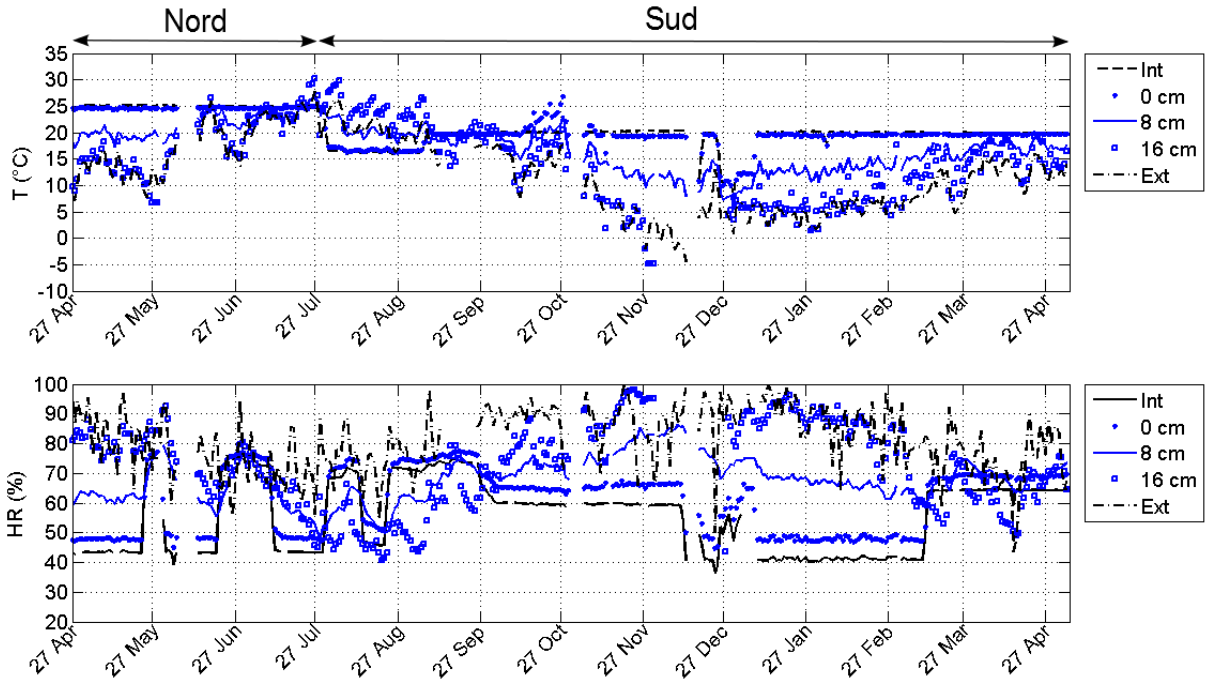


FIGURE 2.27 – Températures et humidités relatives moyennes journalières en zone A de la paroi sur PASSYS 2

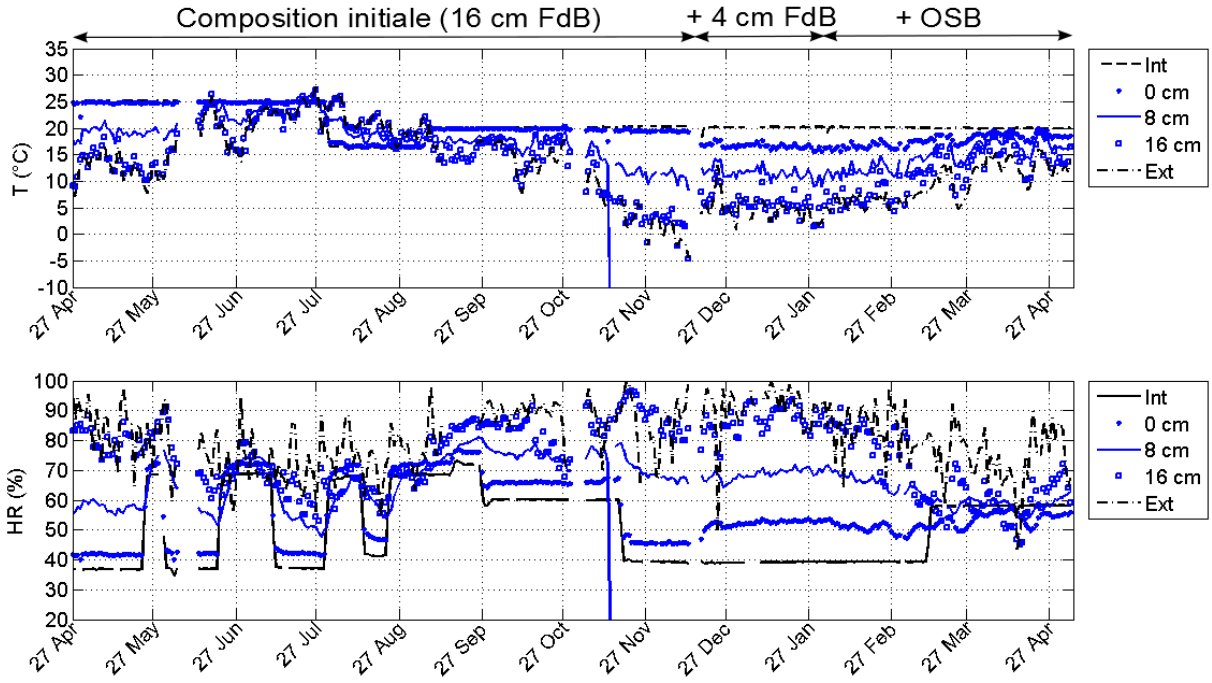


FIGURE 2.28 – Températures et humidités relatives moyennes journalières en zone A de la paroi sur PASSYS 1 (FdB : isolant en fibre de bois)

Les conditions aux limites extérieures ont donc un impact important sur le comportement de ce type de paroi. Les moyennes journalières des valeurs de température et d'humidité relative dans les parois sont influencées par celles de l'air extérieur. Le rayonnement solaire lorsqu'il est important a aussi un impact sur la valeurs journalières : une surchauffe est observée dans la paroi avec des températures plus élevées qu'aux limites, ce qui a pour conséquence directe une

humidité relative plus faible qu'aux limites aux mêmes points.

Les conditions intérieures ont un impact à plus long terme, et un effet du changement de l'humidité relative intérieure n'entraine un changement dans la paroi que dans les jours qui suivent. Cet effet à long terme est rapidement atténué après la pose du parement intérieur en OSB, qui sert d'important pare vapeur.

Analyse à court terme

Une analyse sur le comportement hygrothermique des parois à court terme est aussi nécessaire, pour mieux apprécier le comportement des parois testées en fonction de périodes identifiées. Pour cela des séquences ont été choisies, correspondant aux différentes combinaisons effectuées lors des tests, et consignées dans le tableau suivant :

Séquence	Composition de paroi	Orientation	Conditions intérieures	Valeur stable lors des échelons
Printemps 2013	Identique	Identique	Identiques	Température
Été 2013 (a)	Identique	Différente	Identiques	Pression de vapeur
Été 2013 (b)	Identique	Différente	Identiques	Température
Automne 2013	Identique	Identique	Différentes	Température
Hiver 2014	Différente	Identique	Identiques	Température

TABLE 2.4 – Séquences choisies et combinaisons correspondantes

Les résultats étudiés proviennent des mesures dans les parties courantes (zone B) des températures, humidités relatives et densité de flux thermique. Dans certains cas seront aussi comparées les pressions de vapeur, parce que l'humidité relative dépendant de la température ne permet pas toujours de bien apprécier les transferts d'humidité dans les parois. Pour rappel, la pression de vapeur est fonction de l'humidité relative et de la pression de saturation :

$$P_v = \frac{HR(\%)}{100} \times P_{sat} \tag{2.1}$$

et la pression de saturation est fonction de la température :

$$P_{sat} = 3,1848 \times 10^{13} \times (\frac{T + 273,15}{273,15})^{-4,8341} \times \exp(\frac{-24,6775}{(\frac{T+273,15}{273,15})}) \tag{2.2}$$

pour 0 < T < 60°C (Woloszyn, 1999).

Printemps 2013 Au cours de cette séquence, la température de consigne à l'intérieur des deux cellules est supérieure à la température moyenne extérieure, et les deux cellules sont orientés plein Nord. L'humidité relative à l'intérieur de la cellule, initialement à 40% est passée à 70% pendant sept jours avant d'être ramenée à 40% (Figure 2.29). Les résultats présentés ici sont ceux de la paroi de la PASSYS 1, les résultats pour cette période étant identiques sur les deux parois.

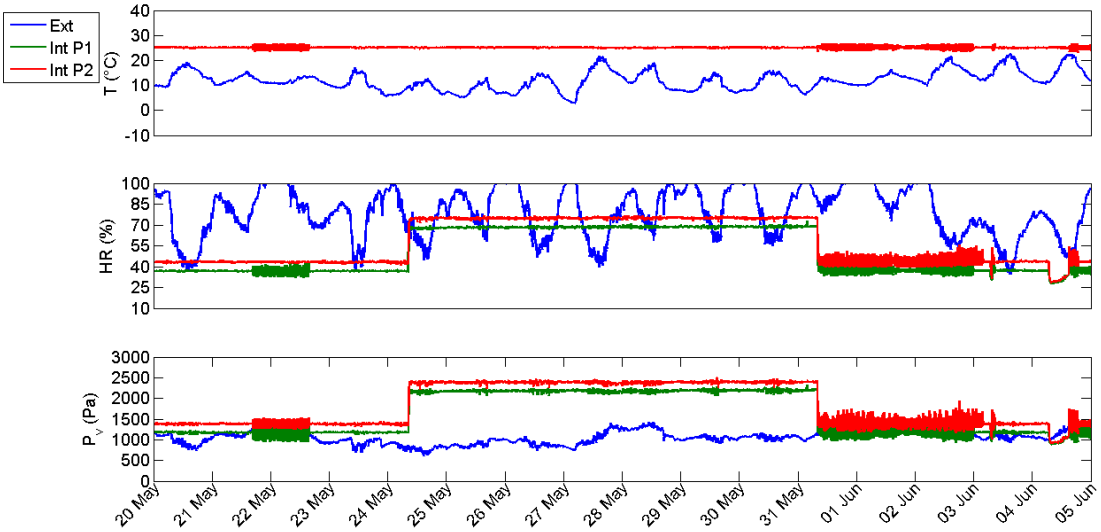


FIGURE 2.29 – Séquence de printemps 2013 : Conditions aux limites

Le passage de l'humidité relative de 40 à 70% entraine une redistribution de l'humidité dans la paroi, comme le traduisent les courbes de pression de vapeur dans la figure 2.30. Les variations les plus fortes sont logiquement dans les premiers centimètres de la paroi (0 à 8 cm), avec un effet qui s'estompe au delà de 12 cm. Dans la suite, les courbes d'humidités relatives laissent penser que le régime n'est pas stable avant le retour à 40% d'humidité relative intérieure, les valeurs à 4 et 8 cm continuant à croître à ce moment là.

La baisse de l'humidité relative intérieure de 70 à 40%, la répartition de l'humidité relative dans la paroi a tendance à revenir à l'état initial. Mais ce retour est plus lent, et la pente de la courbe d'humidité relative à 4 cm est plus douce lors de la baisse de l'humidité intérieure que lors de la montée. La baisse de l'humidité relative à 12 et 16 cm est aussi à relever, mais elle est la conséquence de la baisse de l'humidité relative extérieure.

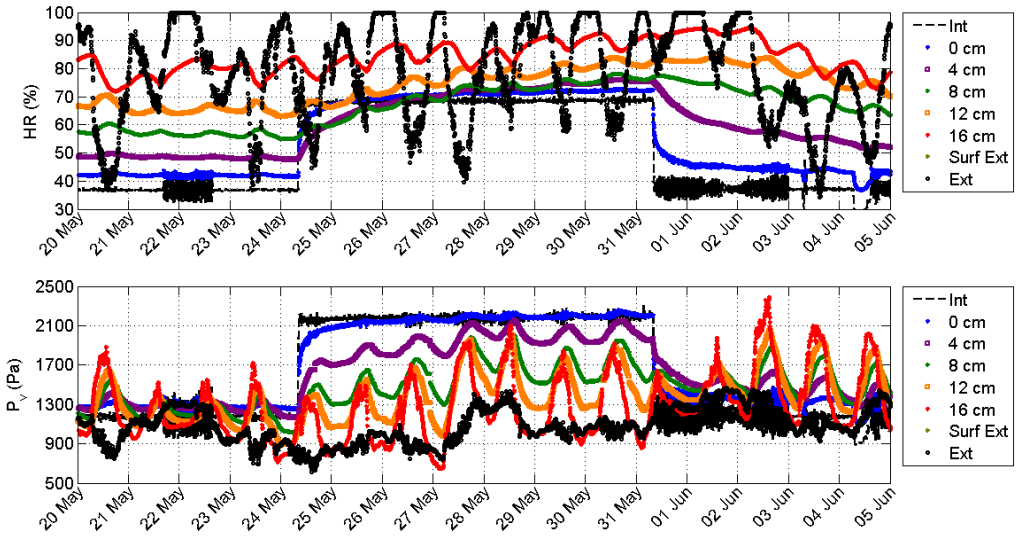


FIGURE 2.30 – Séquence de printemps 2013 : humidités relatives (Haut) et pressions de vapeur (Bas) en partie courante de la paroi sur PASSYS 1

La Figure 2.31 montre le saut de température à la surface et dans l'épaisseur de l'isolation simultané à l'échelon de l'humidité relative de l'air intérieur. Ce changement de température dû à la sorption/désorption de la vapeur est visible ici à 0 et 4 cm. Cet effet se confond à 4 cm avec la montée de température journalière lors de la sorption, après le passage de 40 à 70% d'humidité relative. Par contre lors du retour à 40% il est clairement visible grâce à la rupture sur la courbe de température.

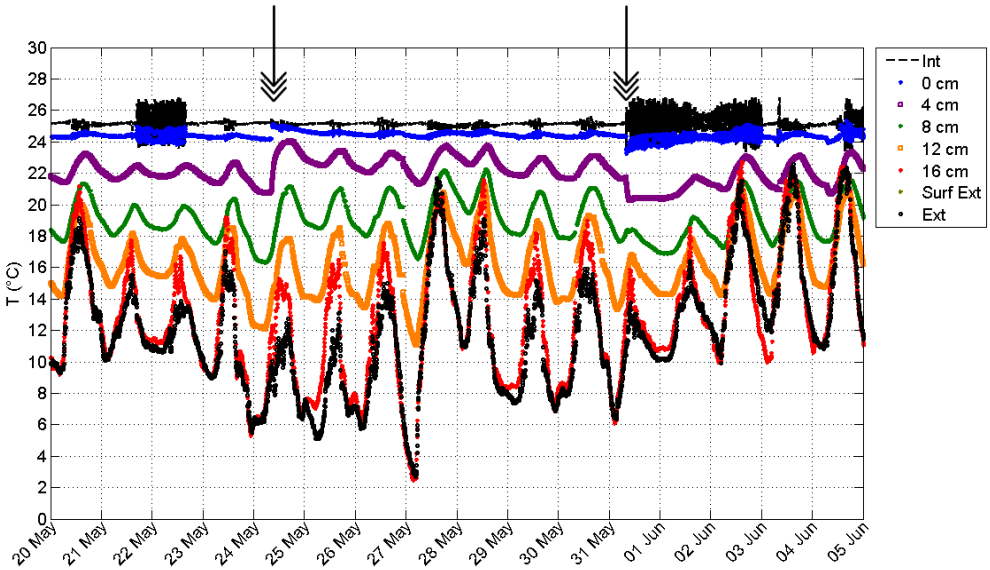


FIGURE 2.31 – Séquence de printemps 2013 : températures en partie courante de la paroi sur PASSYS 1

La superposition des effets induits par l'échelon et les variations journalières de température et de pression de vapeur nous amène à essayer un calcul de ratios pour rendre encore mieux visibles les effets dûs aux échelons. Ainsi, en prenant pour limites les limites de l'isolant, les ratios suivants sont calculés pour un point situé à x cm :

$$Ad_T = \frac{T_x - T_0}{T_{16} - T_0} \tag{2.3}$$

$$Ad_{Pv} = \frac{Pv_x - Pv_0}{Pv_{16} - Pv_0} \tag{2.4}$$

Étant donné que ces valeurs fluctuent énormément (température et pression de vapeur varient pendant la journée), des moyennes ont été effectuées sur des périodes stables, qui correspondent aux 3 heures les plus stables de la nuit.

La Figure 2.32 montre la distribution du ratio Ad_T calculé à partir de la température en fonction de la position dans l'épaisseur de la paroi. Toutes les parties indiquées sont dans le même matériau d'isolation. Ce résultats montrent que, dans l'état d'équilibre des rapports ont la même distribution (0,18 - 0,43 à 0,66, comme indiqué en noir). Le fait que la distribution des rapports n'est pas 0,25 - 0,50 à 0,75 peuvent provenir des imprécisions constructives expliquées dans le chapitre 1.

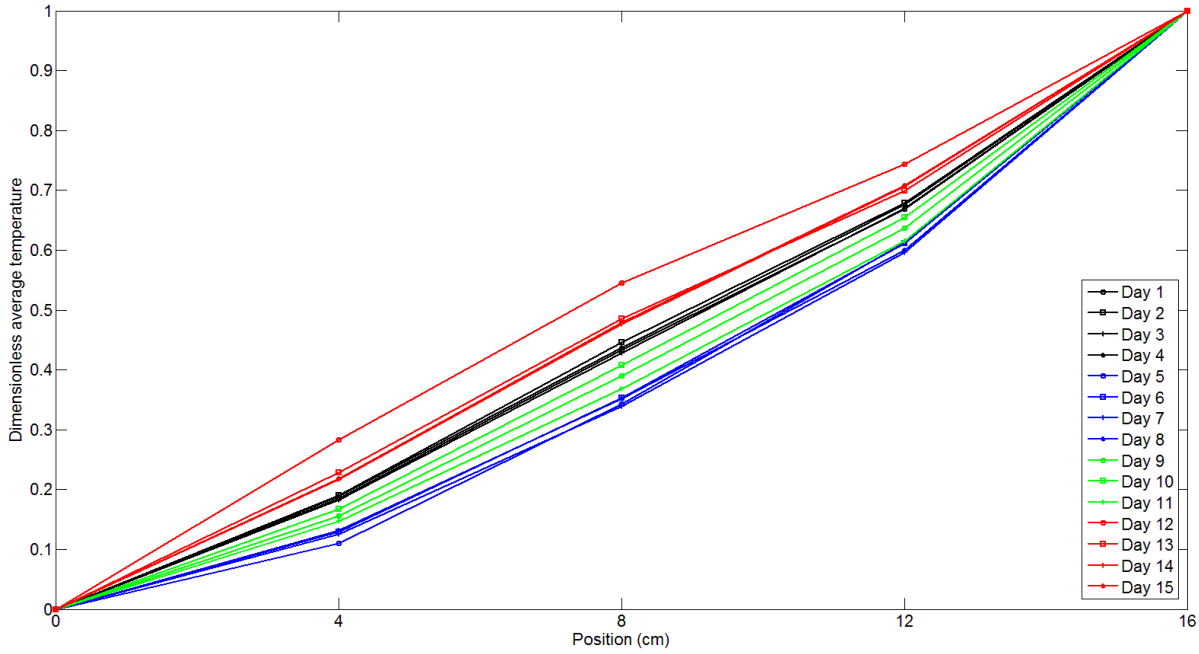


FIGURE 2.32 – Distribution de la température adimensionnelle pendant la séquence d'automne 2013

Le step en humidité relative effectué entraine un changement de la répartition de ces ratios et montre un régime transitoire. Les ratios reviennent à leur état initial après quelques jours, avant d'être pertubés lors du second step, les perturbations se faisant dans le sens opposé de celles lors de la sorption (Figure 2.33).

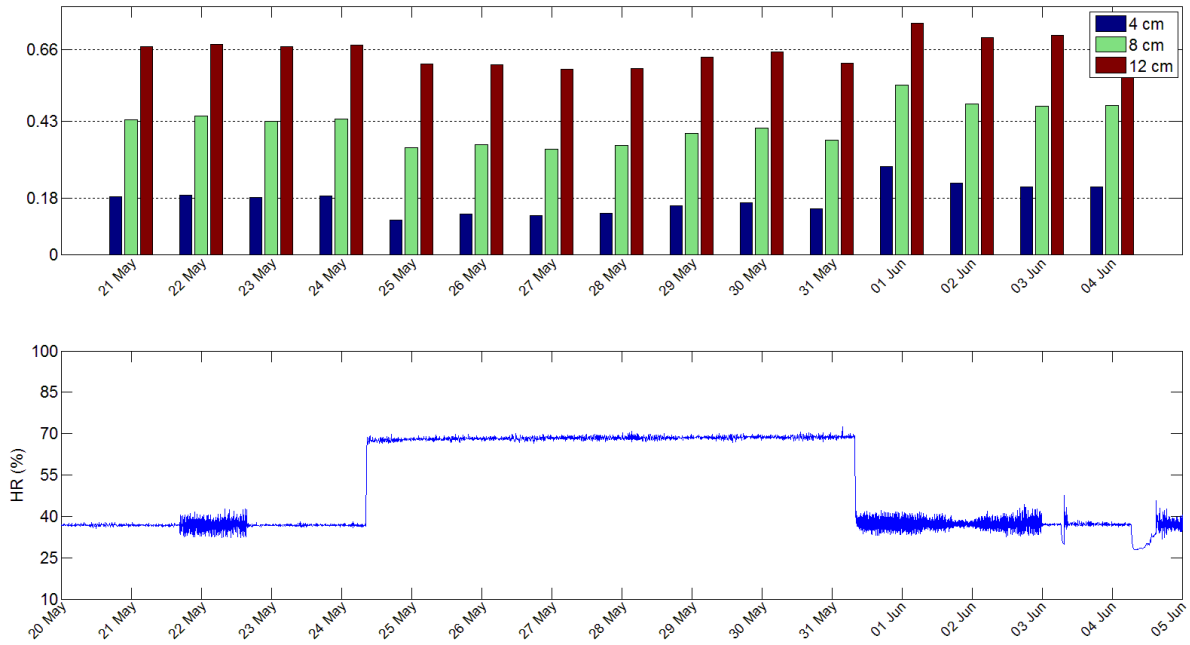


FIGURE 2.33 – Température adimensionnelle pendant la séquence de printemps 2013, Humidité relativé à l'intérieur de la cellule

Été 2013

Séquence (a) Cette séquence est la seule pendant laquelle la pression de vapeur intérieure est maintenue constante. La paroi de la PASSYS 2 est orientée plein Sud au début de l'été. La température a été baissée (25 à 16°C), et l'humidité relative a été modifiée dans le même temps(de 40 à 70%) pour garder la même pression de vapeur à l'intérieur.

Les températures moyennes intérieures et extérieures quotidiennes sont très proches avant la baisse de température intérieure. Ainsi deux fois par jour, les températures dans chacune des parois ont la même valeur (Figure 2.34), et le flux thermique s'inverse autant (Figure 2.35). La diminution de la température intérieure permet de maintenir un écart permanent entre les températures intérieure et extérieure. Il est à noter aussi que les températures sont plus élevées dans la paroi de la PASSYS 2 exposées plein Sud, et ces températures pour des positions allant de la surface extérieure à 12 cm de la surface intérieure ont des températures en journée qui dépassent très facilement celles de l'air extérieur, phénomène résultant du rayonnement direct très important dans cette direction (600 W/m^2 en milieu de journée).

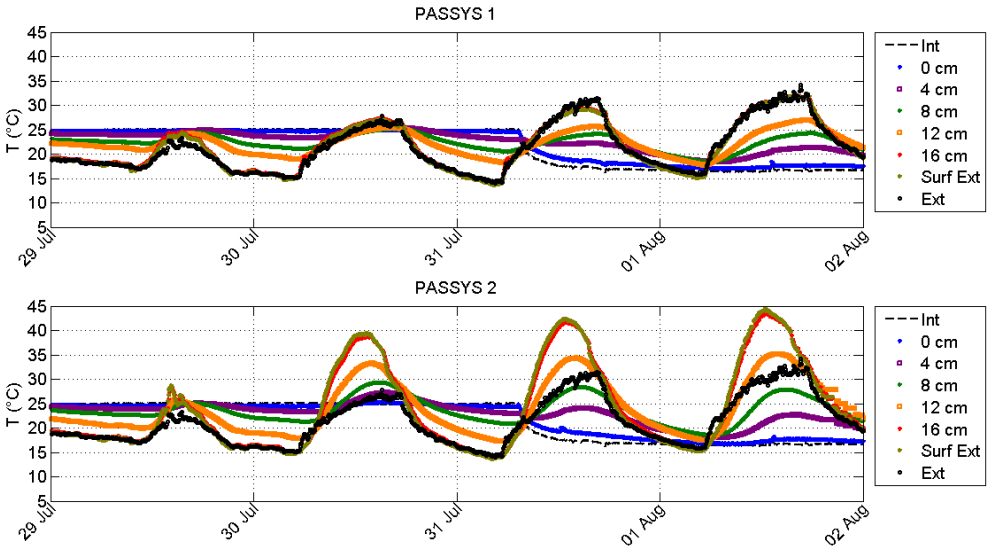


FIGURE 2.34 – Séquence d'été 2013 (a) : températures en partie courante des parois sur PASSYS 1 et PASSYS 2

Les densités de flux thermique sont très faibles et relativement proches de zéro, à l'exception du fluxmètre à proximité de la surface extérieure (16 cm, Figure 2.35). Elles sont aussi plus importantes dans la PASSYS 2, en particulier pendant les jours ensoleillés, confirmant le constat sur les conséquences du rayonnement direct sur la paroi de la PASSYS 2 plus important.

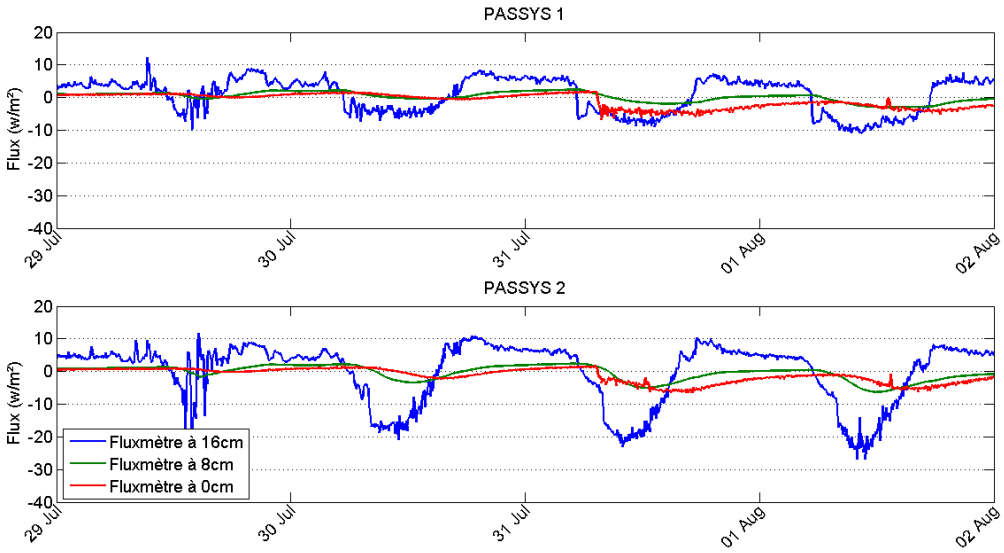


FIGURE 2.35 – Séquence d'été 2013 (a) : densités de flux thermiques de la paroi sur PASSYS 1 et PASSYS 2

Dans la paroi de la PASSYS 2 l'écart entre l'humidité relative à la surface externe et celle à 16 cm est plus important que dans PASSYS 1 (Figure 2.36). Les températures plus élevées sous le revêtement dans la paroi de la PASSYS 2 semblent en être les responsables.

Un déphasage de 12 h est également visible entre les courbes des humidités relatives autour de la couche (Surface extérieure et 16cm), et celles plus proches l'intérieur (12 cm). Spécialement dans la paroi de la PASSYS 2, les valeurs à 12 cm semblent être à une phase intermédiaire, c'est à dire décalées des autres de 6h.

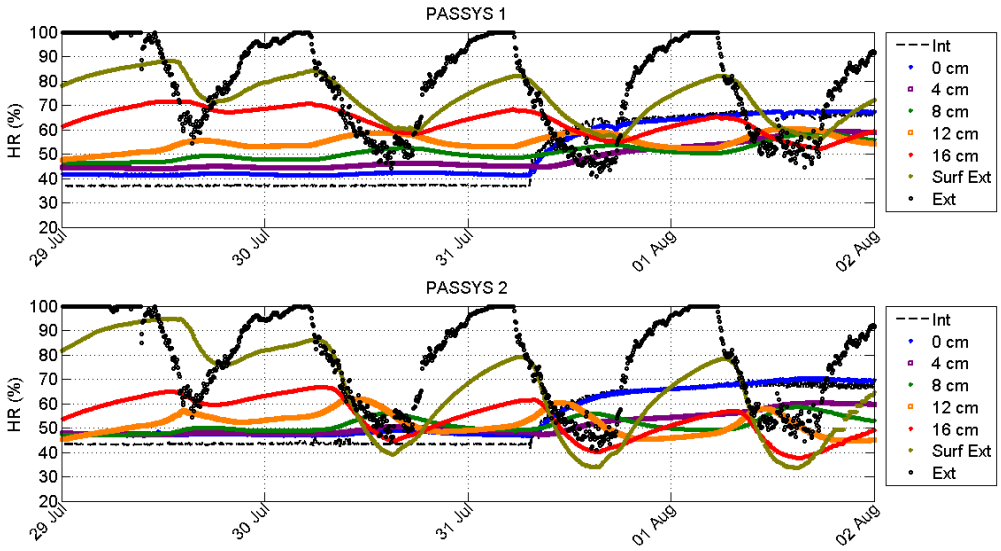


FIGURE 2.36 – Séquence d'été 2013 (a) : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 1 et PASSYS 2

Séquence (b) Cette séquence qui fait suite à la précédente présente une température dans les cellules toujours inférieure à la température moyenne extérieure (mode climatisation estivale), cette dernière ayant une très grande amplitude entre le jour et la nuit ($\Delta T = 15$ K). Contrairement au steps de la première séquence (printemps), les steps ici sont effectués dans le

sens inverse. L'humidité relative initiale intérieure est de 70% et elle est réduite à 40% pendant une dizaine de jours. Les deux cellules sont toujours orientés dans des directions opposées : Nord pour PASSYS 1 et du Sud pour PASSYS 2.

Sur la paroi de la PASSYS 1, l'humidité relative dans l'isolant (de 8 à 16 cm) est vraiment très proche de l'humidité relative à l'intérieur, au début et à la fin de l'expérience (Figures 2.37 et 2.38). Après le step, les humidités relatives à 8 et 12 cm semblent rester très proches, tandis que les valeurs proches de l'intérieur sont plus faibles. Comme dans la séquence précédente, les humidités relatives sont déphasés, et peuvent être séparés en deux groupes : un premier groupe de valeurs en phase avec l'extérieur (Surface extérieure, 16 cm) et un second groupe de valeurs de décalage de phase d'environ 12 heures (12 cm, 8 cm et 4 cm).

Cependant sur PASSYS 2, les valeurs d'humidité relative dans l'isolation sont inférieurs à l'intérieur avant le step. En raison du rayonnement plus important sur la paroi, l'humidité relative à la surface externe est plus faible et varie plus que sur la paroi de la PASSYS 1, conduisant à des valeurs inférieures à l'intérieur du reste de la paroi. Les valeurs à 8 et 12 cm ne sont plus proches comme dans la paroi de la PASSYS 1, elles ne sont même plus en phase. Le déphasage pour les valeurs à 12 cm (et aussi de 0 à 8 cm) est d'environ 6 heures.

L'effet de séchage de la paroi plus prononcé sur PASSYS 2 peut expliquer cette différence de comportement : avec des températures de surface et jusqu'à 12 cm dans la paroi bien au-dessus de la température de l'air extérieur, l'humidité relative diminue fortement, du fait d'une pression de saturation plus importante. La pression de vapeur augmente également dans ces couches en raison de la désorption de l'eau liquide contenue dans les pores du matériau isolant, cette différence de pression provoquant également un mouvement de vapeur vers l'extérieur. Ces phénomènes sont beaucoup moins prononcés dans PASSYS 1.

Néanmoins, il faut aussi ajouter que l'humidité relative intérieure dans la PASSYS 1 atteint 41%, tandis que celle de la cellule PASSYS 2 est de seulement 46%. Cela se traduira par une différence dans le comportement des cellules, bien que l'effet de l'orientation est dominant.

L'effet de la variation de l'humidité relative à l'intérieur de la température dans les premiers centimètres d'isolation de l'intérieur (de 0 à 4 cm) observé dans la première séquence (Printemps) est également visible dans cette séquence. Cependant, il est moins prononcé, d'une part parce que la variation de la pression de vapeur causée par le point de changement est plus faible (500 Pa contre 1.000 Pa dans la séquence du Printemps), et d'autre part parce que l'élévation de température au cours de la transition de 40 à 70% d'humidité relative a été masquée par la montée de température en journée.

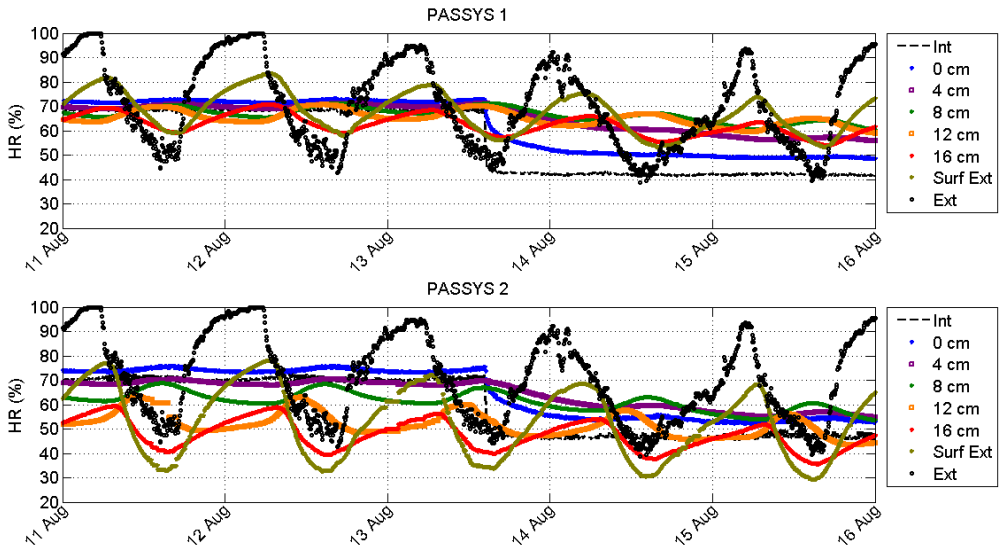


FIGURE 2.37 – Séquence d'été 2013 (b) : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 1 et PASSYS 2

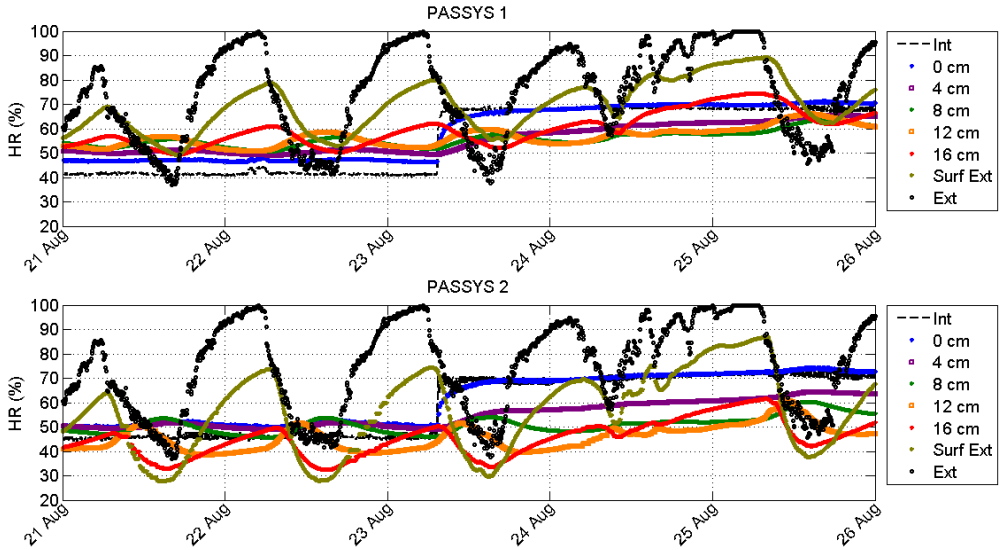


FIGURE 2.38 – Séquence d'été 2013 (b) : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 1 et PASSYS 2

Automne 2013 Les températures intérieures des cellules sont de 20 ° C au cours de cette séquence, alors que les températures extérieures varient de 10 à -5 ° C. Les parois des deux cellules sont orientées vers le sud, et ont toujours la même composition. Cependant, ils sont soumis à des scénarios différents : La PASSYS 1 voit sont humidité relative intérieure diminuent de 60% à 40% tandis que celle de la PASSYS 2 reste à 60%. La baisse de l'humidité relative dans la PASSYS 1 entraine une baisse et une redistribution de l'humidité dans l'ensemble de l'isolation de la paroi (jusqu'à 12 cm, Figure 2.39). Par contre il ne semble pas influencer l'humidité relative autour de l'enduit extérieur (16 cm et la surface externe), ces endroits là étant beaucoup plus influencés par les valeurs dans l'air extérieur.

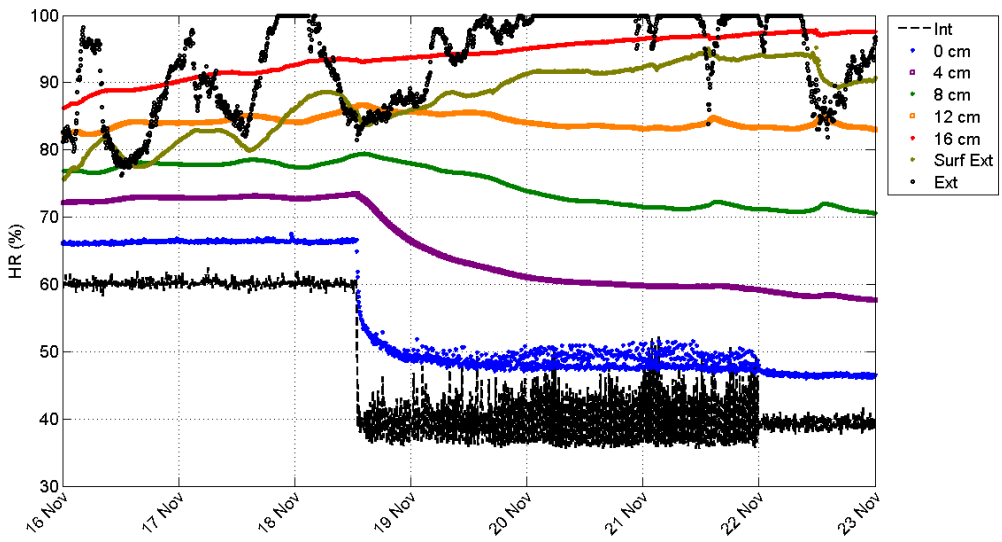


FIGURE 2.39 – Séquence d'automne 2013 : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 1

D'autres phénomènes observés dans les séquences précédentes, on trouve dans celle-ci, comme dans le changement brusque de température de surface côté intérieur et jusqu'à 4 cm en raison du step de l'humidité relative, et de l'effet prédominant de la température et de l'apport solaire extérieurs sur la distribution de la teneur en eau dans le mur à l'échelle de la journée.

Selon les calculs de ratios, la même distribution a été remarqué que pour le test de printemps, même si les conditions extérieures / intérieur ne sont pas les mêmes. La figure suivante (Figure 2.40) montre les rapports changent à l'étape.

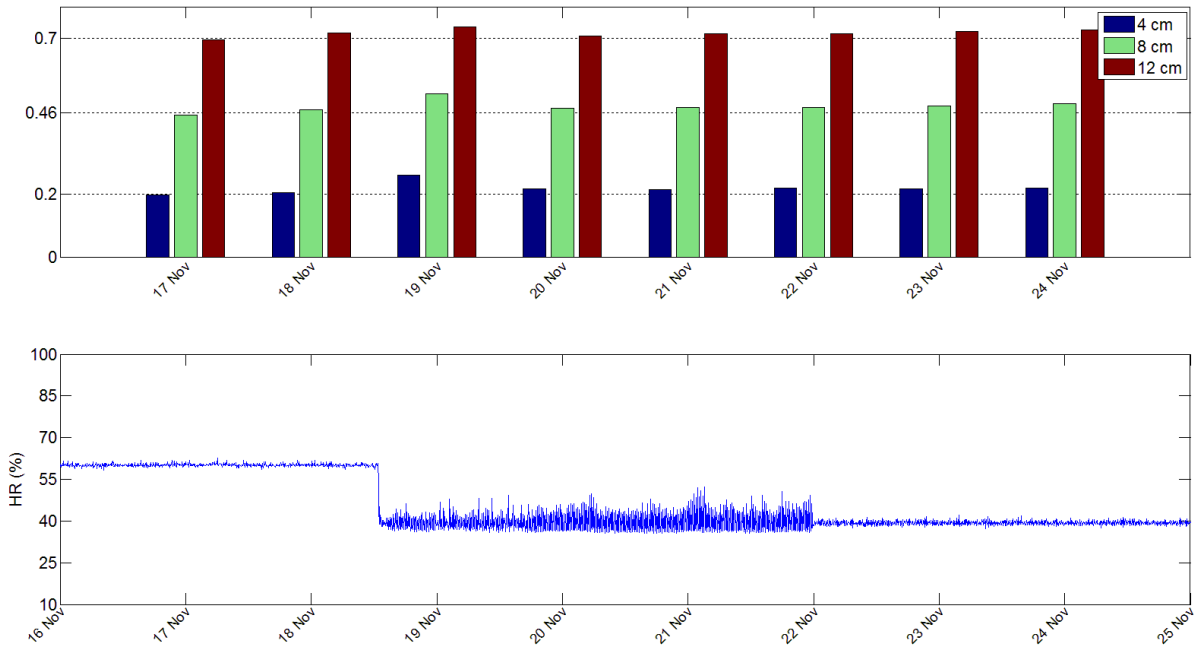


FIGURE 2.40 – Distribution de la température adimensionnelle pendant la séquence d'automne 2013

Nous pouvons conclure que l'impact de l'effet de sorption / désorption au changement de conditions aux limites est important, alors que l'effet de la teneur en eau de la matière sur la conductivité thermique l'est beaucoup moins. Cette dernière affirmation peut être confirmée par la moyenne conductivité thermique apparente calculés pour les mêmes périodes : à l'état d'équilibre, ils sont tout autour de 0,04 W/m^2/K (Figures 2.41 et 2.42).

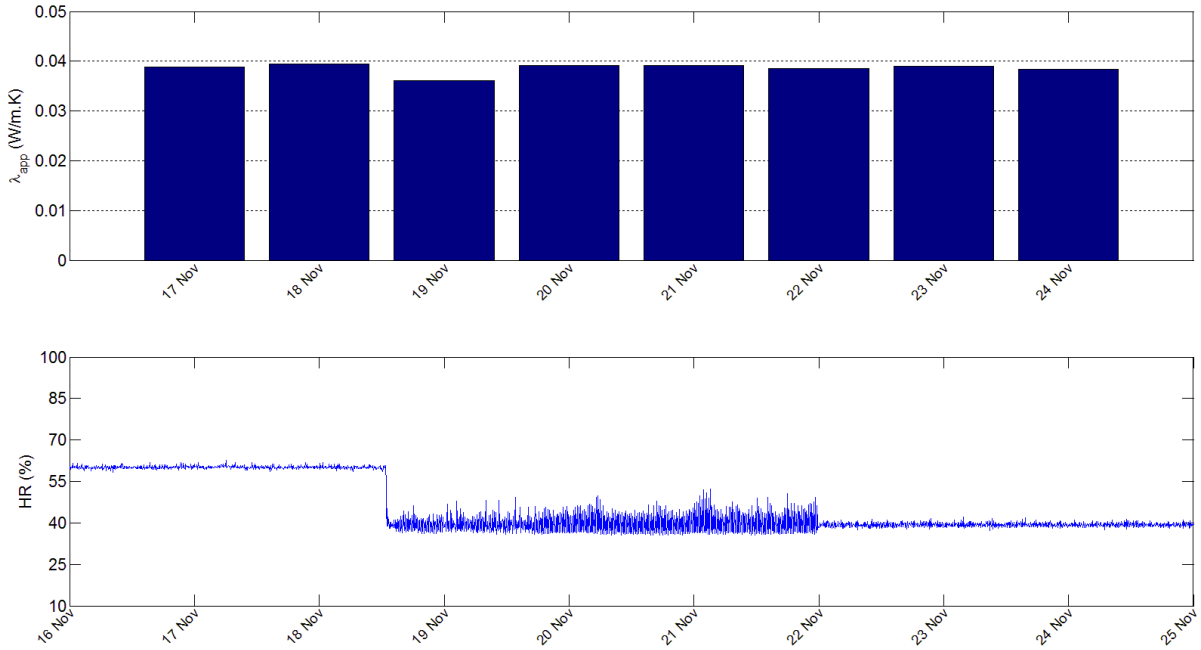


FIGURE 2.41 – Conductivité thermique apparente de la séquence d'automne 2013

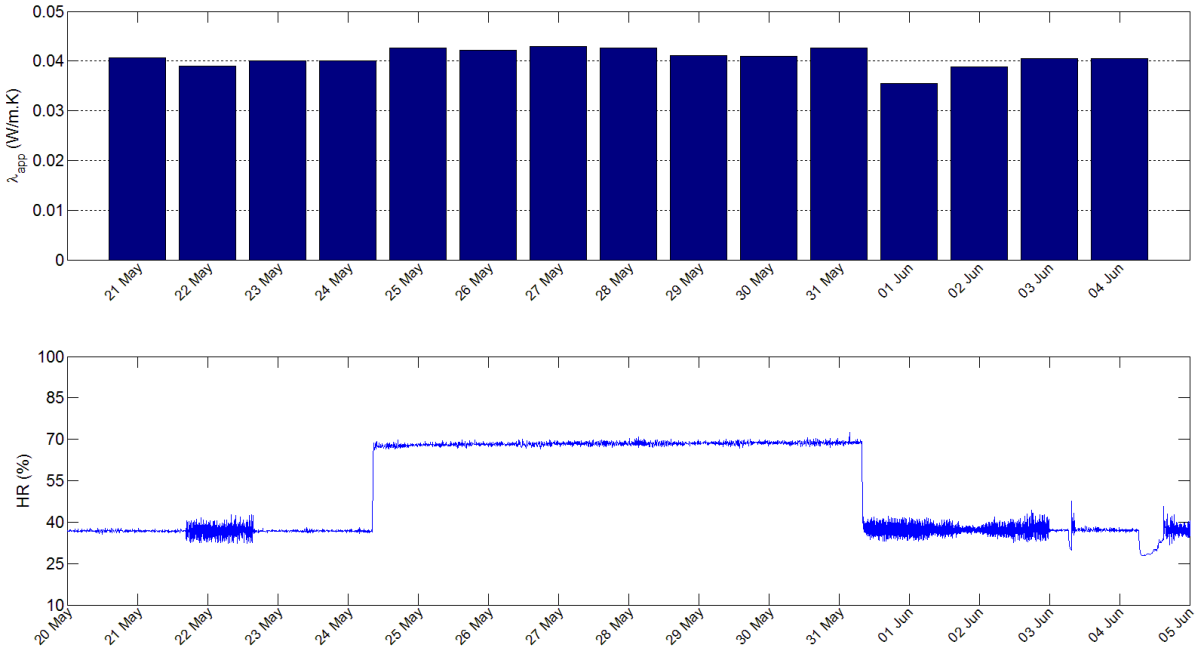


FIGURE 2.42 – Conductivité thermique apparente de la séquence du printemps 2013

Hiver 2014 Cette séquence hivernale est marquée par un échelon effectué en humidité relative dans la PASSYS 1, où un parement intérieur (OSB) a été ajouté. Si la conséquence de cet échelon devrait être le changement de l'humidité relative dans la paroi et une légère hausse de température comme cela a été le cas dans la séquence du printemps 2013 ou ici dans la PASSYS 2 (Figure 2.43, valeurs à 0 et 4 cm), le parement change la donne. Les humidités relatives ne varient que très peu hormis en surface intérieure, et l'effet n'est visible que après plusieurs jours (ΔP_v de 50 Pa après près de 5 jours, -4 cm Figure 2.44).

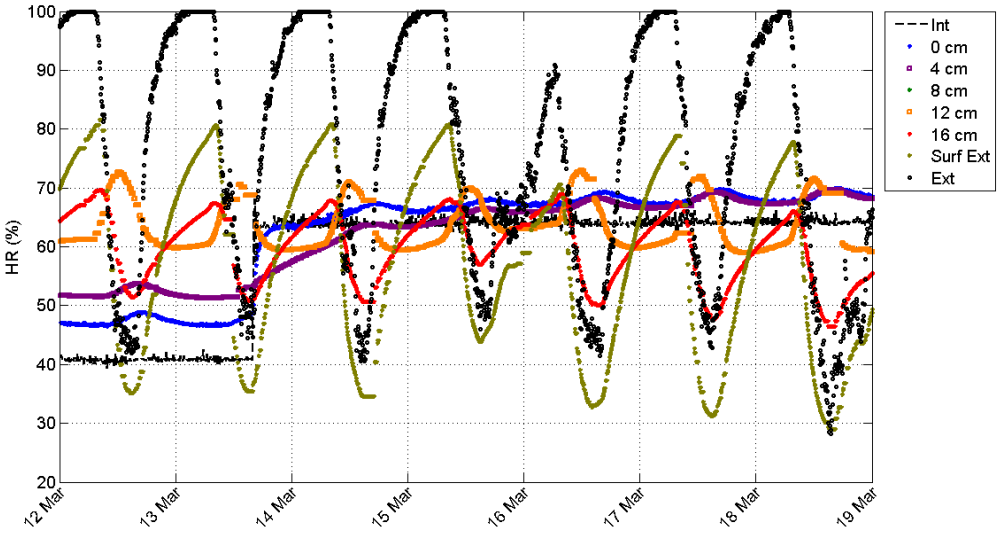


FIGURE 2.43 – Séquence d'hiver 2014 : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 2

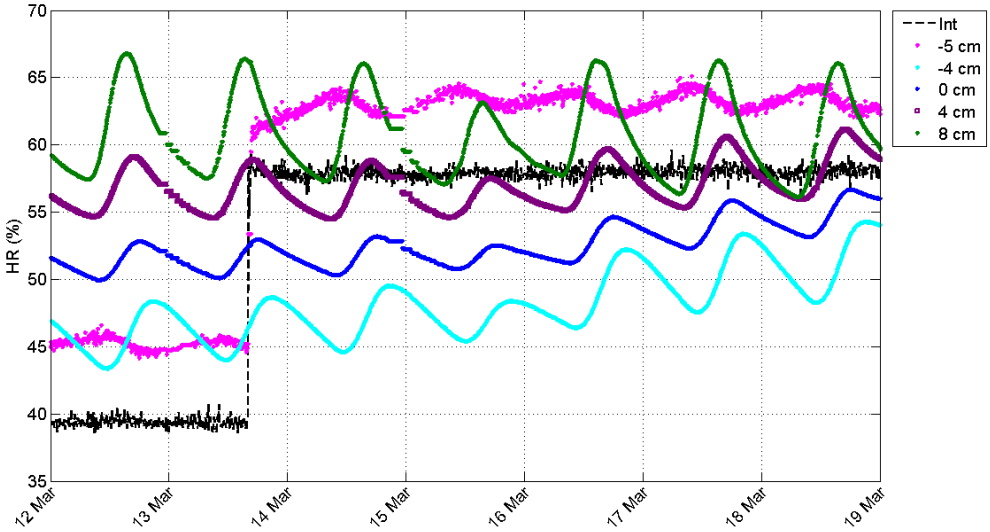


FIGURE 2.44 – Séquence d'hiver 2014 : humidités relatives en partie courante de la paroi sur PASSYS 1

2.3 Conclusion

Un dispositif expérimental, composé de deux parois posées chacune sur une cellule PASSYS à ambiance intérieure contrôlée a été mis en place. Les cellules PASSYS sont aussi orientables

à volonté.

Une même composition de paroi (16 cm d'isolation en fibre de bois + enduit minéral, le tout autour d'une ossature bois) a été choisie dans un premier temps pour les deux façades. L'une des deux parois a été modifiée quelque mois plus tard par l'ajout de 4 cm d'isolation supplémentaire à l'intérieur et d'1 cm de plaques d'OSB.

Les mesures sont assurées par 9 capteurs pour chaque ambiance intérieure (Sondes platines, Capteurs de vitesse d'air, Thermo-hygromètres), 74 capteurs pour chaque façade (Thermocouples, Thermo-hygromètres, Fluxmètres thermiques, Capteurs différentiels de pression, Pyranomètres), et une station météorologique à proximité pour les conditions aux limites extérieures. Les principales mesures effectuées sont la température et l'humidité relative, complétées par des mesures de rayonnement à l'extérieur et de différence de pression totale en extérieur et intérieur de chaque cellule PASSYS. Les fréquences d'acquisition sont de 5 minutes pour tous les capteurs des cellules et de 1 minute pour la station météorologique.

L'analyse des résultats montre plusieurs effets qui caractérisent les matériaux utilisés pour la construction des parois testées. Le caractère hygroscopique de l'isolant en fibre de bois montre des effets de sorption/désorption de la vapeur d'eau lors de fluctuations rapides des teneurs en eau aux limites. Ces effets de sorption se font dans les premiers centimètres à proximité des limites où les changements sont opérés, et sont suivis de changements temporaires de température dû aux échanges de chaleur de sorption de l'eau s'adsorbant ou se désorbant dans les pores de l'isolant. L'ampleur de cet effet ne dépend pas du changement en humidité relative mais de l'importance du changement en pression partielle de vapeur.

L'enduit externe est beaucoup moins hygroscopique que l'isolant, ce qui donne une fluctuation d'humidité relative à ses limites relativement proches et proches de celles de l'extérieur, sauf en cas de rayonnement direct important. Dans ce dernier cas, une opposition de phase entre les humidités relatives autour de l'enduit et dans le reste de l'isolant est remarquée.

Le parement intérieur en plaques d'OSB ajouté après 9 mois de test a un effet tampon considérable sur les variations des conditions intérieures, surtout hygriques. Du coup après modification de la paroi, les humidités relatives dans l'isolant sont plus corrélées aux fluctuations extérieures, et ne sont sensibles aux changements intérieurs que sur le long terme.

De manière plus générale, le dispositif nous montre l'efficacité hygroscopique des parois testées. En effet, la perméabilité à la vapeur des parois empêchent d'avoir des humidités relatives élevées et des condensations, alors que les flux de vapeur vont de l'intérieur vers l'extérieur. D'un autre côté, quand les flux s'inversent pendant l'été, il ya aussi une absence de risque de condensation vers l'intérieur, bien que l'atmosphère intérieure soit climatisée, contrairement à ce qui a été observé dans des assemblages classiques de parois comme dans (Carmeliet and Derome, 2012).

La distribution en humidité relative journalière dans les parois est très dépendante des températures (Kedowide et al., 2014). Ainsi, les phénomènes ayant une grande influence sur les températures, comme le rayonnement direct sur les parois, ont une incidence assez importante sur leur comportement hygrothermique, à court comme à long terme. Néanmoins cet effet disparait assez rapidement quand le rayonnement est moins important (Printemps ou Automne, Orientation plein Nord, Journées peu ou pas ensoleillées).

Les effets à long terme sur la paroi sont essentiellement dues aux valeurs aux limites des

températures et humidités relatives, notamment les valeurs des conditions intérieures. Les fluctuations de ces valeurs à l'extérieur sont elles beaucoup plus responsables des variations à l'échelle de la journée, même si leurs moyennes sur le long terme (échelle de la saison) ont aussi un impact sur la réponse des parois.

Tous ces effets décrits et expliqués ont donc besoin d'être quantifiés, d'où le besoin de simulations numériques pour les représenter au mieux. Ceci sera l'objet des chapitres suivants.

Chapitre 3

Descriptif du modèle numérique

Introduction

Dans ce chapitre, sera proposé une description des phénomènes physiques qui se produisent dans les parois hygroscopiques au travers d'équations qui serviront à la modélisation. Les matériaux utilisés pour la conception des parois étudiées sont poreux, et des transferts de chaleur et de masse s'y produisent et interagissent. Ensuite sera décrit l'outil de simulation utilisé pour la modélisation des phénomènes physiques observés.

3.1 Transferts de Chaleur

Les transferts de chaleur dans les matériaux poreux se font principalement par conduction dans la matrice solide. Il existe des transferts de chaleur par convection et rayonnement dans les matériaux, néanmoins ils sont difficiles à évaluer séparément lors de leur caractérisation ; ils sont donc inclus dans une conductivité thermique globale. La convection et le rayonnement sont pris en compte aux limites du matériau (Interfaces matériau/air).

Conduction

La conduction est un mode de transfert de chaleur assuré par "contact" entre particules de matière et sans déplacement de ces dernières, sous l'effet d'un gradient de température. Les transferts de chaleur par conduction sont régis par la loi de Fourrier. Ainsi d'après (Hens, 2007) :

$$q_{cd} = -\lambda \times \vec{\nabla}(T) \tag{3.1}$$

Où q_{cd} est une densité de flux de chaleur (W/m^2), λ la conductivité thermique du corps au sein duquel la chaleur se transmet ($W/(m.K)$) et T la température (K).

Convection

La convection est un transfert de chaleur par un déplacement de molécules, sous l'effet d'une différence de température. C'est le principal mode de transfert de chaleur dans les fluides, et à l'interface de ces derniers et de solides. Pour le second cas, le taux de transfert peut être écrit de la manière suivante (Hens, 2007) :

$$q_{conv} = h_c \times (T_{fl} - T_s) \tag{3.2}$$

T_{fl} désignant la température du fluide et T_s la température à la surface du solide. h_c est le coefficient de convection thermique en $W/(m^2.K)$.

Rayonnement

Le rayonnement est un mode de transfert de chaleur par émission d'ondes électromagnétiques. Tout corps ayant une température différente du zéro absolu émet un rayonnement vers son environnement, et ce rayonnement n'a pas besoin de support pour se propager. Toute surface reçoit alors aussi du rayonnement provenant son environnement. Une partie du rayonnement incident (q_{Ri}) est absorbée (q_{Rabs}), une autre réfléchie (q_{Rr}), et une dernière partie est transmise (q_{Rtr}). Les trois coefficients suivants permettent de les évaluer (Hens, 2007) :

- Absorptivité

$$\alpha = q_{Rabs}/q_{Ri} \tag{3.3}$$

- Réflectivité

$$\sigma = q_{Rr}/q_{Ri} \tag{3.4}$$

- Transmissivité

$$\tau = q_{Rtr}/q_{Ri} \tag{3.5}$$

Nous avons ainsi :

$$\alpha + \sigma + \tau = 1 \tag{3.6}$$

3.2 Transferts de masse en milieux poreux

Les milieux poreux permettent la circulation plus ou moins importante de masse, constituée généralement d'air, d'eau liquide et de vapeur dans le domaine du bâtiment. En se reportant à l'équation de conservation pour chacun de ces trois composants, le terme source est généralement nul. Le terme convectif de la vapeur (transport par l'air) représente un phénomène physique appelé advection.

En faisant l'hypothèse d'un effet de la gravité négligeable, le flux de matière total passant au travers d'un milieu poreux est la somme des flux de matières. Dans le cas du bâtiment cela correspond à la somme des flux d'air, d'eau et de vapeur d'eau, chaque flux étant fonction du gradient de concentration du fluide Φ_i et de la perméabilité du milieu poreux à ce fluide :

$$j^{w+v+a} = -\Sigma_i K_i^{\Phi}.\vec{\nabla}(\Phi_i) \tag{3.7}$$

Ici le choix a été fait de prendre les pressions comme potentiels :

$$j^{w+v+a} = j^w + j^v + j^a = K_w^P.\vec{\nabla}(P_w) + K_v^P.\vec{\nabla}(P_v) + K_a^P.\vec{\nabla}(P_a) \tag{3.8}$$

Eau liquide

L'eau sous forme liquide circule par capillarité dans le milieu poreux. Son flux dans le milieu correspond à l'opposé du gradient de pression capillaire P_c multiplié par la perméabilité à l'eau liquide du milieu poreux k_w :

$$j^w = K_w^P.\vec{\nabla}(P_w) = -k_w \times \vec{\nabla}(P_c) \tag{3.9}$$

La perméabilité à l'eau liquide d'un matériau donné dépend de plusieurs paramètres tels la viscosité de l'eau (qui dépend elle même de sa température, mais est relativement constante à température ambiante) et surtout de la teneur en eau du milieu.

Air

L'air "diffuse" aussi au travers du milieu poreux, et son débit est fonction du gradient de pression totale d'air P et de la perméabilité à l'air (appelée aussi perméabilité aux gaz) du milieu poreux notée k_a :

$$j^a = K_a^P.\vec{\nabla}(P_a) = -k_a \times \vec{\nabla}(P) \tag{3.10}$$

La perméabilité à l'air d'un matériau varie en fonction de la teneur en eau de ce matériau.

Vapeur d'eau

Lorsque l'air est immobile la vapeur d'eau se déplace uniquement par diffusion dans le milieu poreux , et cette diffusion est fonction du gradient de pression de vapeur P_v et de la perméabilité à la vapeur du milieu poreux usuellement nommée δ_v :

$$j^v = K_v^P.\vec{\nabla}(P_v) = -\delta_v \times \vec{\nabla}(P_v) \tag{3.11}$$

Comme les propriétés précédentes, la perméabilité à la vapeur d'un matériau donné dépend aussi beaucoup de la teneur en eau du milieu.

Dans les matériaux très poreux comme l'isolant fibre de bois l'air n'est pas immobile. Cet air n'est pas sec, il contient de la vapeur d'eau. Cette vapeur d'eau se déplace avec l'air, et ce mouvement est appelé **l'advection**. Il faut donc tenir compte de ce flux de vapeur lors des bilans de transfert de masse. Le flux total de vapeur correspond à l'addition du flux de vapeur par diffusion défini plus haut et du flux de vapeur par advection. L'équation 3.11 peut être remplacé par :

$$j^v = j^v_{dif} + j^v_{adv} \tag{3.12}$$

où

$$j^v_{dif} = -\delta_v \times \vec{\nabla}(P_v) \tag{3.13}$$

et

$$j^v_{adv} = HA \times j^a \tag{3.14}$$

HA désigne l'humidité absolue et est le rapport de la masse de vapeur d'eau sur la masse totale de l'air humide. En partant de la loi des gaz parfaits ($P \times V = \frac{m}{M} \times R \times T$) on obtient une relation qui permet de retrouver HA :

$$HA = \frac{P_v \times M_{H_2O}}{P \times M_{Air}} \tag{3.15}$$

Attention, la masse molaire M_{Air} est une approximation, car la masse molaire de l'air humide dépend de sa teneur en eau.
Le flux d'air sec peut être ainsi facilement retrouvé aussi :

$$j^{as} = \frac{P \times M_{Air} - P_v \times M_{H_2O}}{P \times M_{Air}} \times j^a \tag{3.16}$$

3.3 Transferts couplés de chaleur et de masse

3.3.1 Équations générales

Les bilans d'énergie et de masse se font sur le même principe : La somme de la variation temporelle de la quantité d'énergie ou de masse et des divergences de flux d'énergie (respectivement de masse) est égale à zéro. Cela nous amène aux équations suivantes :

– Energie

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla(q) + \nabla(j^w \times h^w) + \nabla(j^v \times h^v) + \nabla(j^{as} \times h^{as}) = 0 \tag{3.17}$$

– Masse (Eau)

$$\frac{\partial m_{w+v}}{\partial t} + \nabla(j^w) + \nabla(j^v) = 0 \tag{3.18}$$

– Masse (Air)

$$\frac{\partial m_{as}}{\partial t} + \nabla(j^{as}) = 0 \tag{3.19}$$

Dans l'équation 3.17 , U correspond à l'énergie interne de l'ensemble matériau poreux + fluides dans les pores. L'unique flux de chaleur pris en compte ici est la conduction, les autres phénomènes (convection et rayonnement) étant présents aux limites des domaines et seront donc développés séparément. Les autres termes de l'équation correspondent à l'enthalpie contenue dans la masse qui parcourt le milieu poreux.

Équation bilan d'énergie

Le développement de l'équation 3.17, élément par élément, doit nous conduire aux équations suivantes :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \times C_m \times T^* + \rho'_w \times (C_w \times T^*) + \rho'_v \times (C_{v_v} \times T^* + L_0) + \rho'_{as} \times (C_{v_{as}} \times T^*)) \tag{3.20}$$

Dans l'équation 3.20, l'énergie interne est la somme des énergies internes de la matrice solide et des fluides occupant les pores. ρ'_w, ρ'_v et ρ'_{as} sont les masses volumiques apparentes de la vapeur d'eau, d'eau liquide et d'air sec (kg/m^3), qui représentent la masse de chaque élément rapportée au volume de l'ensemble du matériau poreux. Elles diffèrent des masses volumiques normales qui sont un rapport entre la masse de chaque élément et son propre volume. Les termes $C \times T^*$ et $C \times T^* + L_0$ (T^* en °C) correspondent aux énergies internes des composants considérés, la référence étant prise à 0°C.

En considérant la vapeur d'eau et l'air sec comme des gaz parfaits, les relations suivantes permettent de retrouver les valeurs de masses volumiques apparentes :

$$\begin{aligned} P_v \times \epsilon \times V &= \frac{m_v}{M_{Vapeur}} \times R \times T = m_v \times r_v \times T \\ (P - P_v) \times \epsilon \times V &= \frac{m_{as}}{M_{Air}} \times R \times T = m_{as} \times r_{as} \times T \end{aligned} \tag{3.21}$$

ϵ étant la porosité du matériau. On a alors :

$$\begin{aligned} \rho'_v &= \frac{m_v}{V} = \frac{P_v \times \epsilon}{r_v \times T} \\ \rho'_{as} &= \frac{m_{as}}{V} = \frac{(P - P_v) \times \epsilon}{r_{as} \times T} \end{aligned} \tag{3.22}$$

Étant donné que dans le bâtiment les pressions totales varient peu, nous ferons l'hypothèse d'une pression totale constante et prendrons l'enthalpie du système à la place de son énergie interne, et les chaleurs massiques à pression constante à la place de chaleurs à volume constant pour les gaz (Vapeur d'eau, Air sec). L'équation 3.20 devient donc :

$$\frac{\partial U}{\partial t} \equiv \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \times C_m \times T^* + \rho'_w \times (C_w \times T^*) + \rho'_v \times (C_{p_v} \times T^* + L_0) + \rho'_{as} \times (C_{p_{as}} \times T^*)) \tag{3.23}$$

Ainsi, en prenant en compte tous les éléments développés et en séparant les termes de variation temporelle d'énergie interne et les divergences, nous obtenons une version développée de l'équation de bilan d'énergie :

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}(\rho_m \times C_m \times T^* + \rho'_v \times (C_{p_v} \times T^* + L_0) + \rho'_{as} \times (C_{p_{as}} \times T^*) + \rho'_w \times (C_w \times T^*)) = \\ -\nabla(-\lambda \times \vec{\nabla}(T)) \\ -\nabla((-k_w \times \vec{\nabla}(P_c)) \times C_w \times T^*) \\ -\nabla((-\delta_v \times \vec{\nabla}(P_v) - \frac{P_v \times M_{H_2O}}{P \times M_{Air}} \times k_a \times \vec{\nabla}(P)) \times (C_{p_v} \times T^* + L_0)) \\ -\nabla((-\frac{(P \times M_{Air} - P_v \times M_{H_2O})}{P \times M_{Air}} \times k_a \times \vec{\nabla}(P)) \times C_{p_{as}} \times T^*)\end{aligned} \quad (3.24)$$

Équation bilan de masse

Le développement des bilans de masse 3.18 et 3.19 peut également être effectué en séparant les termes de variation temporelle de masse et les divergences :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho'_w + \rho'_v) = -\nabla(-k_w \times \vec{\nabla}(P_c)) - \nabla(-\delta_v \times \vec{\nabla}(P_v)) - \nabla(-HA \times k_a \times \vec{\nabla}(P)) \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho'_{as}) = -\nabla(-k_a \times \vec{\nabla}(P)) \quad (3.26)$$

En prenant en compte l'hypothèse de pressions variant peu, l'équation bilan d'air sec peut être réduite à :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho'_{as}) = 0 \quad (3.27)$$

La masse de vapeur étant très faible en comparaison à la masse d'eau liquide, elle peut être négligée. Ceci conduit à :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho'_w) = -\nabla(-k_w \times \vec{\nabla}(P_c)) - \nabla(-\delta_v \times \vec{\nabla}(P_v)) - \nabla(-\frac{P_v \times M_{H_2O}}{P \times M_{Air}} \times k_a \times \vec{\nabla}(P)) \quad (3.28)$$

3.3.2 Discrétisation des équations de transferts couplés en 1D

Une discrétisation avec la méthode des différences finies a été choisie :

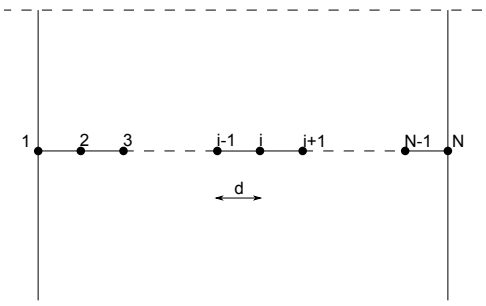


FIGURE 3.1 – Discrétisation 1D d'une zone à l'intérieur du matériau

Soit une maille de largeur d. d dépend du nombre de nœuds N et de l'épaisseur du domaine

étudié. Les équations 3.24 et 3.28, respectivement de bilan de chaleur et d'humidité deviennent :

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}(\rho_m \times C_m \times T^{*i} + {\rho'_v}^i \times (C^i_{p_v} \times T^{*i} + L_0) + {\rho'_{as}}^i \times ({C_{p_{as}}}^i \times T^{*i}) + {\rho'_w}^i \times ({C_w}^i \times T^{*i})) = \\ +\lambda^i \times (\frac{T^{i+1} - 2T^i + T^{i-1}}{d^2}) \\ +k^i_w \times (\frac{P^{i+1}_c - 2P^i_c + P^{i-1}_c}{d^2}) \times C^i_w \times T^{*i} \\ +(\delta^i \times (\frac{P^{i+1}_v - 2P^i_v + P^{i-1}_v}{d^2}) + \frac{P^i_v \times M_{H_2O}}{P^i \times M_{Air}} \times k^i_a \times (\frac{P^{i+1} - 2P^i + P^{i-1}}{d^2})) \times (C^i_{pv} \times T^{*i} + L_0) \\ +\frac{(P^i \times M_{Air} - P^i_v \times M_{H_2O})}{P^i \times M_{H_2O}} \times k^i_a \times (\frac{P^{i+1} - 2P^i + P^{i-1}}{d^2}) \times C^i_{p_{as}} \times T^{*i}\end{aligned} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}(\rho'_w) = \delta^i \times (\frac{P^{i+1}_v - 2P^i_v + P^{i-1}_v}{d^2}) + \frac{P^i_v \times M_{H_2O}}{P^i \times M_{Air}} \times k^i_a \times (\frac{P^{i+1} - 2P^i + P^{i-1}}{d^2}) \\ +k^i_w \times (\frac{P^{i+1}_c - 2P^i_c + P^{i-1}_c}{d^2})\end{aligned} \tag{3.30}$$

3.3.3 Conditions aux limites

Aux limites des domaines étudiés (contact entre matériau ou paroi et son environnement extérieur) les phénomènes pris en compte pour les transferts de chaleur et de masse ne sont pas les mêmes.

Si au niveau du transfert de chaleur dans les milieux poreux seule la conduction est prise en compte, aux limites la convection et le rayonnement sont les seuls pris en compte. Dans notre cas d'étude (voir chapitre 1) les parois étudiées sont en contact avec l'air intérieur et extérieur, il y a donc convection aux deux limites. Le rayonnement reçu par la paroi côté intérieur est négligeable (température intérieure homogène, chapitre 2). L'extérieur de chaque paroi est équipée d'un pyranomètre, ce qui nous permet de connaitre le rayonnement total par m^2 reçu par la paroi. En considérant les façades comme étant opaques ($\tau = 0$) et avec les mesures expérimentales de l'absorptivité, l'équation 3.3 permet de connaitre la quantité de chaleur absorbée.

Les échanges de masse aux limites concernent surtout la vapeur. Les transferts d'eau liquide aux limites (Pluie battante) ne sont pas pris en compte ici. Les transferts de vapeur aux limites se font aussi par convection, avec une équation similaire à celle de la convection thermique :

$$j^v = h_w \times (P_{v_{fl}} - P_{v_s}) \tag{3.31}$$

Ici h_w désigne le coefficient de convection massique. Il peut être retrouvé à partir d'équations de relations entre celui ci et le coefficient de convection thermique, comme celle de Chilton-Colburn (Rouchier, 2012; Tsilingiris, 2010).

3.4 Implémentation du modèle

3.4.1 Modèles existants

De nombreux modèles numériques consacrés aux transferts couplés de chaleur et de masse dans le bâtiment ont été développés ces dernières années. Les exercices communs comme celui

de l'annexe 41 de l'AIE permettent de faire une synthèse sur certains d'entre eux développés (Woloszyn and Rode, 2007). Ici sont cités quelques uns assez fréquents dans la littérature :

- WUFI/WUFI+ : est un logiciel commercial, permettant des simulations en 1D et 2D
- Ham-tools est développé par (Kalagasidis, 2004), et présente l'avantage d'être ouvert et gratuit, et développé dans l'environnement Matlab-Simulink.
- TransPore, permettant une simulation en 3D, initialement développé pour l'étude du séchage de bois (Perré and Turner, 1999). Il a été modifié afin d'en avoir une version plus adaptée aux transferts dans les parois de bâtiments, appelé BuildingPore (Rémond and Perré, 2008).
- DELPHIN, développé à l'Université Technologique de Dresde, permet d'effectuer des simulations en 2D
- HAM-BE, développé par (Li et al., 2009), permet des simulations en 2D
- HygIRC, développé et initialement testé dans (Maref et al., 2002), permet des simulations en 2D
- Domus, développé dans (Mendes et al., 2001), s'intéresse aux transferts à l'échelle du bâtiment.

A la recherche d'un code avec des outils disponibles et ouverts afin d'etre librement modifiés, notre choix ici a été d'écrire un modèle pas forcément original, mais dans un environnement avec des modules disponibles, et utilisables ultérieurement pour des simulations à l'échelle du bâtiment.

3.4.2 Outil de simulation : DYMOLA

DYMOLA (DYnamic MOdeling LAboratory) est un outil commercial offrant un environnement de modélisation développé par **Dassault Systèmes** [www.dynasim.se]. Il est basé sur le langage orienté objet **Modelica**. Ce langage est utilisé pour la modélisation de systèmes complexes électriques, électroniques, mécaniques, hydrauliques ou thermiques. L'environnement DYMOLA possède de nombreuses librairies d'objets utilisables pour la modélisation, et de nombreuses autres librairies spécialisées sont également disponibles librement sur des plates formes de partage comme www.modelica.org. L'une des librairies les plus utilisées dans le domaine de la physique du bâtiment est la librairie **Buildings** (Wetter, 2009a).

La possibilité d'utiliser des éléments provenant de nombreuses librairies, de les personnaliser suivant ses besoins, et aussi de pouvoir créer ses propres éléments ont orienté le choix de cet outil de simulation. Son mode de programmation modulaire permet en outre d'utiliser les éléments créés/personnalisés dans ce travail pour des simulations à plus grande échelle (bâtiment) et de pouvoir les publier afin de les partager avec d'autre membres de la communauté.

3.4.3 Structure du modèle

Une paroi multicouche a été modélisée en 1D. Pour ce faire, des nouveaux éléments ont été créés à partir d'éléments de la bibliothèque principale du logiciel. Les éléments créés ont été formés sur la base du module "transfert de chaleur par conduction" de la bibliothèque principale du logiciel. Un module a été créé par couche de matériau dans la paroi modélisée. Ces modules sont reliés entre eux par des noeuds, assurant la transition par des relations d'égalité. Pour l'adapter à notre volonté de modéliser des transferts couplés, le contenu du module a été entièrement modifié. Les équations de transferts couplés de chaleur et de masse discrétisés en 3.3.2 y ont été introduits, en choisissant pour chacun des éléments le nombre de mailles N. A chaque module a été ajouté des noeuds "transferts de masse", créés à partir des noeuds "transfert thermique"

existants dans la même bibliothèque. Ces noeuds ont la pression de vapeur comme potentiel et le flux de vapeur comme flux, en lieu et place de la température et le flux thermique (Figure 3.2).

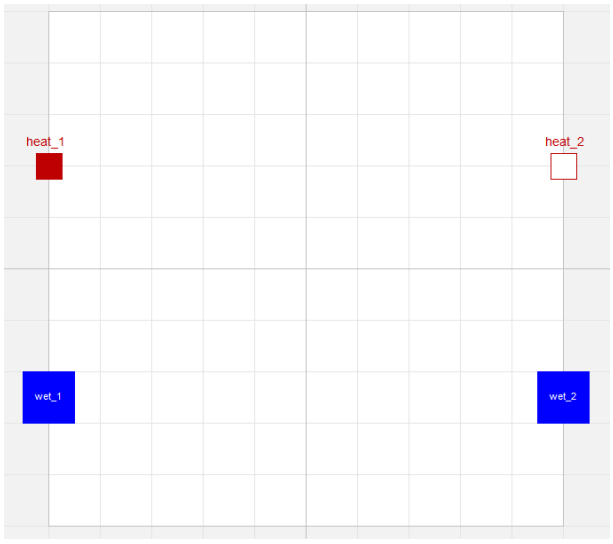


FIGURE 3.2 – Exemple de module développé, avec ports de transferts thermiques existants, et ports de transferts de masse créés

Pour les conditions aux limites, des modules ont aussi été créés à partir des modules "convection thermique" existants, pour les volumes d'air avoisinant la paroi (intérieur et extérieur) pour permettre de modéliser l'effet convectif.

La figure 3.3 présente la structure du modèle pour une paroi multicouche placée entre deux ambiances. Les modules constituant chacun une couche de matériau sont reliés entre eux en suivant la succession des couches. Pour finir, les conditions dynamiques aux limites sont ajoutées. Elles peuvent soit être sous des formes de fonctions simplement définies (steps par exemple) avec des outils existants dans les bibliothèques, soit être sous la forme de tableaux importés de conditions aux limites réelles mesurées, comme dans le cas de la figure.

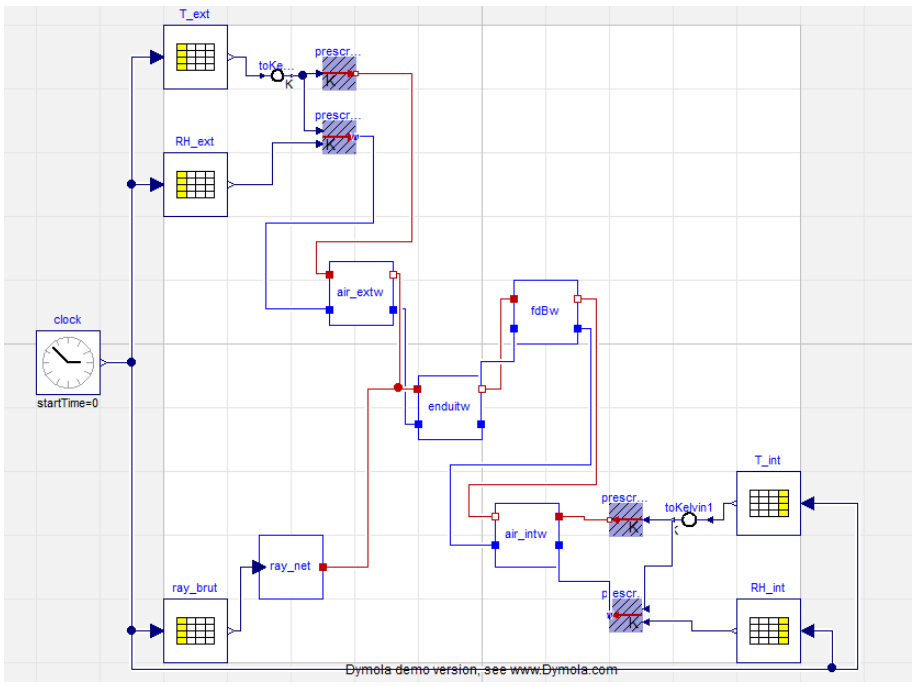


FIGURE 3.3 – Capture d'écran du modèle de paroi

3.4.4 Validation du modèle

La validation du modèle a été effectuée au travers d'un benchmark, dans le cadre de la tâche 2 du projet HYGROBAT. A ce benchmark ont participé des laboratoires partenaires au projet HYGROBAT, avec des modèles développés sur des plate formes différentes. Il s'agit de :

- le CETHIL avec un modèle développé sous COMSOL
- EDF R&D avec un code maison, SYRTHES-Bâti
- le LOCIE avec un code développé sur Matlab ((Rouchier, 2012))

L'objet de l'étude commune est une série de mesures expérimentales effectués en conditions contrôlées dans un laboratoire partenaire du projet HYGROBAT (LERMAB), et décrites dans (**?**). La paroi testée est une couche unique d'isolant de 8 cm, placée entre deux ambiances contrôlées, représentant respectivement l'intérieur et l'extérieur d'une pièce. Les tests se déroulent en deux phases : après une période se stabilisation où les conditions des deux côtés sont les mêmes, une première phase "hivernale" est effectuée, où la température représentant l'extérieur est maintenue à 5°C et son humidité relative à 75% durant trois semaines. Ensuite vient une seconde phase "périodique" où sur 24h les valeurs de température oscillent entre 6 et 14°C et celles d'humidité relative entre 52 à 70%. Pour mieux représenter l'évolution journalière de la température et humidité relative extérieure, les deux valeurs fluctuent en opposition de phase. Durant toute l'expérience, la température et l'humidité relative de consigne du côté représentant l'intérieur sont maintenues à 20°C et 60%.

Le matériau isolant est la fibre de bois, utilisée aussi lors des tests expérimentaux en conditions réelles, et présentée dans le chapitre 2. Pour s'affranchir des complications pouvant provenir des implémentations différentes de la convection dans les différents modèles, les conditions aux limites utilisées sont les valeurs (température et humidité relative) relevées expérimentalement à la surface de chaque côté de l'isolant. Les valeurs des propriétés des matériaux sont aussi harmonisées, de manière à ne comparer que les modèles en eux même. Les valeurs retenues sont dans le tableau 3.1 :

Propriété	Valeurs	Unité
Porosité (ϵ)	0,9	-
Masse volumique (ρ)	146	kg/m^3
Chaleur massique (C_p)	11,271 × T(°C) + 1103,1	J/kg.K
Conductivité thermique(λ)	0,28 × θ_m(%) + (0,108 × T(°C) + 38)	mW/m.K
Perméabilité à la vapeur (δ_v)	4,4 × 10^{-11} entre 4% et 50% 6,8 × 10^{-11} entre 86% et 50% soit 5,85 × 10^{-13} ×RH[%] +2,82 × 10^{-11} (Interpolation linéaire)	kg/(m.s.Pa)
Perméabilité à l'air (k_a)	4,16 × 10^{-13}	m^2
Isotherme de sorption	4,6 × 10^{-5} x^3 - 5,3 × 10^{-3} x^2 + 0,29 x + 2,92 × 10^{-4}	$\theta_m(\%)=f[RH(\%)]$

TABLE 3.1 – Propriétés physiques du matériau fibre de bois

Les simulations ont été effectuées dans ce travail avec 160 mailles, soit 2 mailles par mm.

Résultats

Après simulations, les résultats numériques sont comparés entre eux et avec les résultats expérimentaux. Les points de comparaison sont à l'intérieur de l'isolant, tous les 20 mm.
Les comparaisons des températures en phase "hivernale" (Figure 3.4) et en phase "périodique" (Figure 3.5) montrent des réponses très proches de tous les modèles utilisés, celui décrit dans ce chapitre portant l'indice "yk" (points de couleur mauve). Les réponses générales des modèles sont aussi relativement proches des mesures expérimentales. Il y a cependant des différences de près de 0.8°C en phase hivernale, et des écarts qui montent jusqu'à cet ordre de grandeur à certains moments de la phase périodique. Mais ces écarts restent limités au capteur situé en milieu de paroi (40 mm), et sont dûs à un probable problème de calibration du capteur.

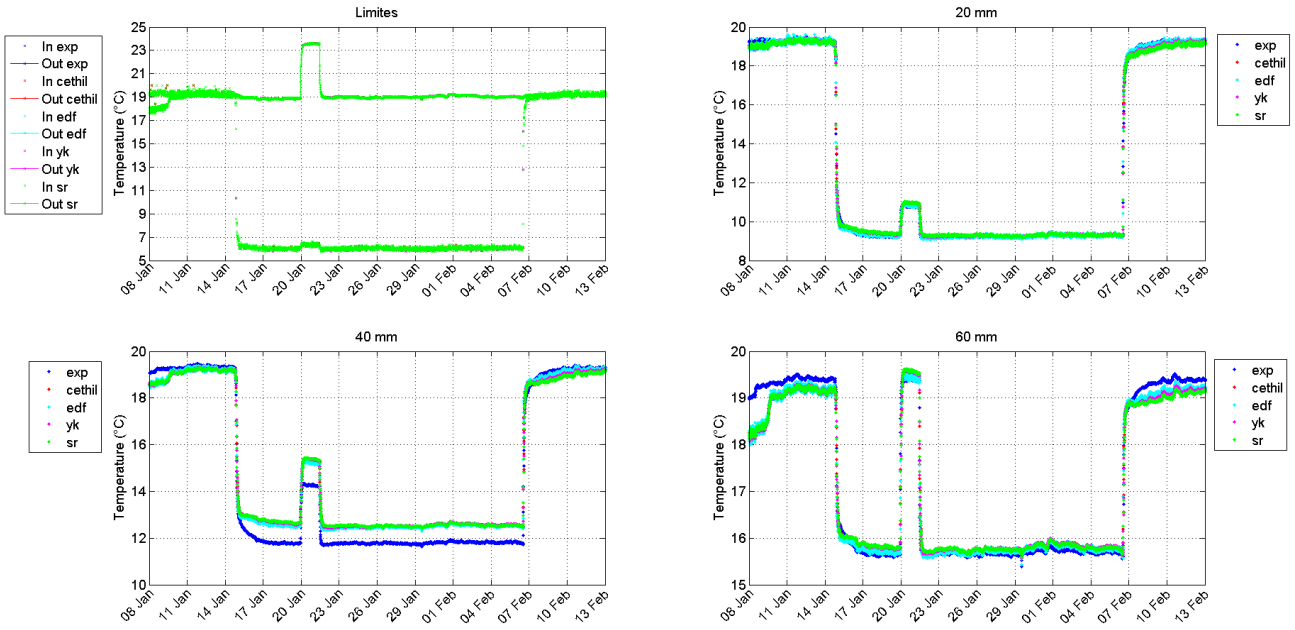


FIGURE 3.4 – Comparaison des températures simulées et expérimentales, phase "hivernale"

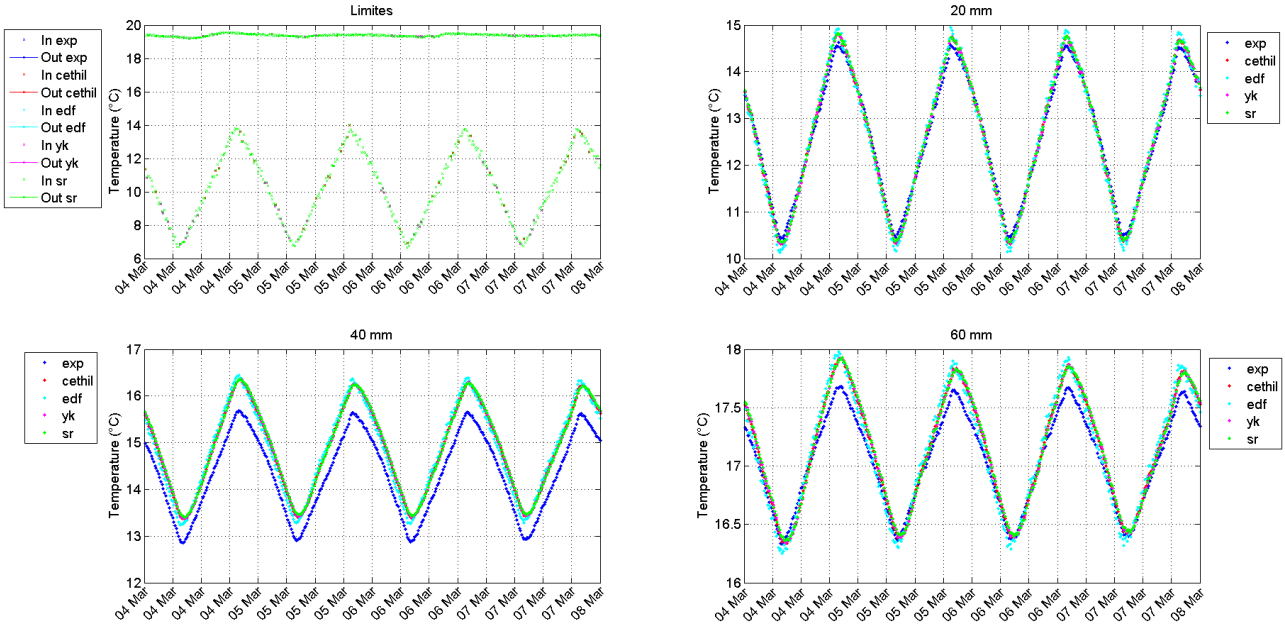


FIGURE 3.5 – Comparaison des températures simulées et expérimentales, phase "périodique"

La comparaison des humidités relatives donne un bilan bien différent (Figures 3.6 et 3.7). Les réponses entre modèles sont un peu moins proches, et toutes sont en déphasage avec les mesures expérimentales. Dans le cas des valeurs de la phase périodique, les réponses des modèles aux sollicitations en humidité sont toutes plus lentes et moins marquées que dans le cas expérimental. Ce retard peut atteindre 6 heures, quand les différences d'amplitudes vont jusqu'à +/- 2%. Les réponses des modèles restent quand même en phase en elles.

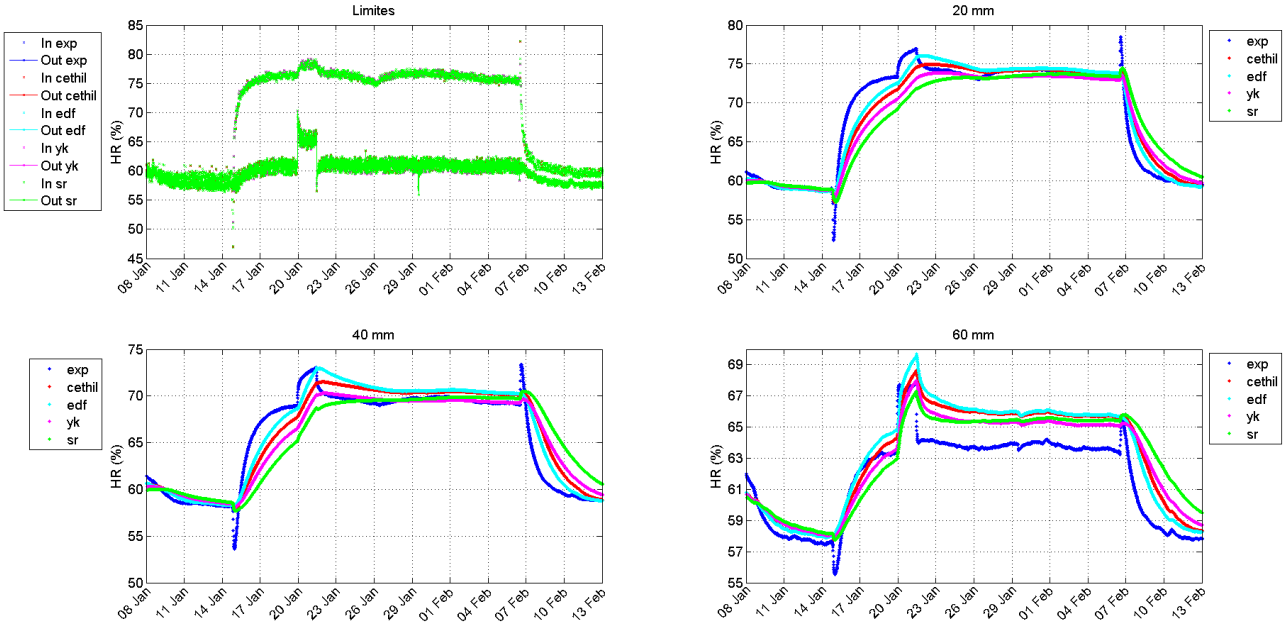


FIGURE 3.6 – Comparaison des humidités relatives simulées et expérimentales, phase "hivernale"

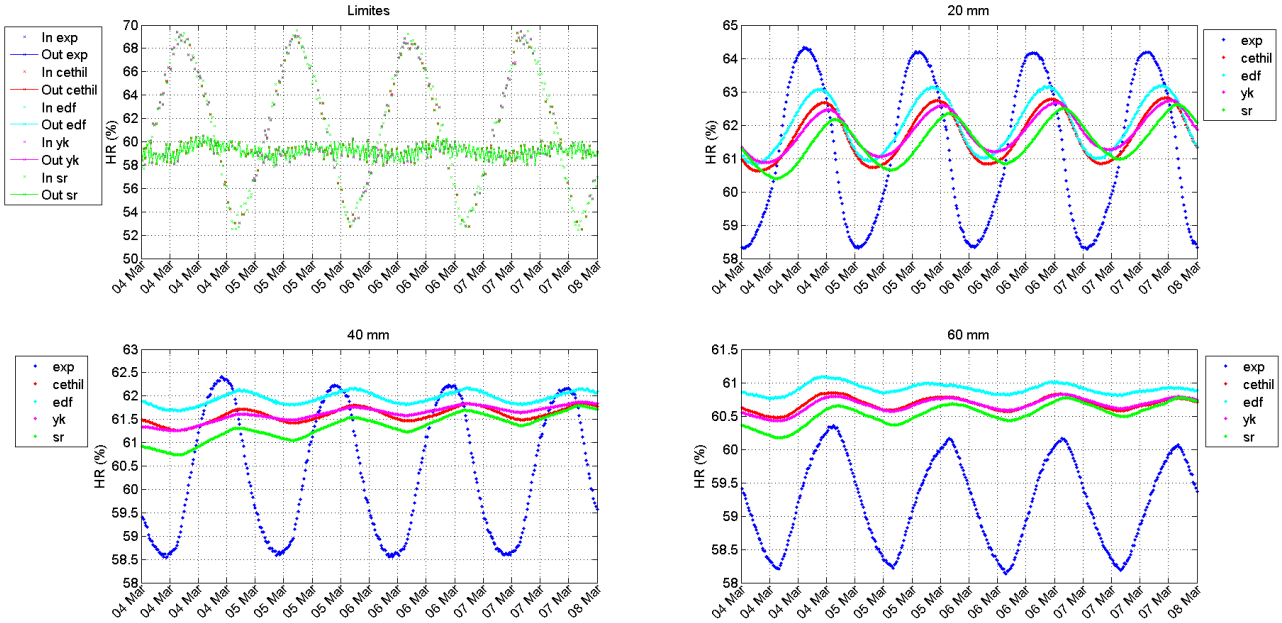


FIGURE 3.7 – Comparaison des humidités relatives simulées et expérimentales, phase "périodique"

Conclusion Un benchmark a été effectué pour simuler une expérience menée en conditions contrôlées, avec en jeu le principal matériau utilisé dans ce travail, la fibre de bois. Les résultats de simulation ont été comparés entre eux et avec les résultats expérimentaux. La comparaison entre résultats numériques a montré une bonne cohérence en température, et une relativement bonne cohérence en humidité relative.

Des écarts ont néanmoins été relevés lors de la comparaison des réponses des modèles aux résultats expérimentaux, en ce qui concerne les humidités relatives. La réponse des modèles numériques aux fluctuations d'humidité relative aux limites est beaucoup plus lente que sur les mesures expérimentales. Un constat similaire a été effectué dans (Kalamees and Vinha, 2003) lors de simulations avec trois logiciels commerciaux dédiés aux transferts couplés chaleur - masse : 1D-HAM, MATCH, et WUFI 2D.

Conclusion

Le modèle de transferts couplées de chaleur et de masse a été décrit dans ce chapitre. Il reprend en termes de chaleur les phénomènes de conduction dans le matériau, de convection et de rayonnement aux limites. En termes de masse, il prend en compte les phénomènes de diffusion de vapeur d'eau et d'eau liquide, ainsi que d'advection de vapeur avec l'air, le matériau étudié dans ce travail étant très poreux.

Ce modèle a été implémenté dans un environnement de simulation modulaire, DYMOLA. Le modèle a été testé sur un benchmark, avec des mesures expérimentales en conditions contrôlées et des simulations avec d'autres codes éprouvés. La comparaison des résultats a montré une bonne cohésion des résultats du modèle décrit avec ceux des autres modèles numériques, mais en retrait par rapport aux résultats expérimentaux, spécifiquement en humidité relative.

La cohésion des réponses du modèle décrit dans ce chapitre avec les réponses d'autres modèles déjà éprouvés montre qu'il peut être utilisé pour la suite de l'étude. Une investigation plus approfondie sur la raison des écarts entre mesures expérimentales et réponses numérique pourra être effectuée dans prochain chapitre.

Chapitre 4

Confrontation du modèle numérique et des résultats expérimentaux

Le chapitre précédent a permis la description du modèle construit afin de simuler en une dimension (1D) les interactions thermiques et hygriques à l'échelle d'une paroi. Ce modèle numérique a aussi été validé par une comparaison avec d'autres modèles, pour des simulations de tests effectués en conditions expérimentales contrôlées. Ce chapitre se consacre donc à l'exploitation du modèle développé pour des simulations de parois soumises à des conditions climatiques réelles.

Les expériences servant de base à l'exploitation du modèle numérique sont celles décrites dans le chapitre 2. Des simulations sont effectuées en choisissant des conditions aux limites issues des mesures expérimentales et les résultats de simulation sont confrontés aux résultats expérimentaux de points de mesures situés dans les limites choisies pour les simulations. Ces comparaisons permettront la mise en évidence de paramètres pouvant influer sur les écarts entre résultats expérimentaux et numériques, ainsi qu'une explication de ces écarts du point de vue physique.

La première partie de ce chapitre fait le tour des propriétés disponibles des matériaux impliqués dans les simulations et celles choisies pour les simulations dites de référence. Une seconde se consacre à des études où les paramètres physiques jugés les plus influents sont modifiés pour connaitre leur influence sur les résultats de simulation. Le domaine d'étude sur la paroi est d'abord simplifié, pour ensuite être élargi à la suite des conclusions des études paramétriques. Une séquence expérimentale de quelque jours est utilisée pour ces premières comparaisons. Après l'ajustement des paramètres, une extension de l'étude à d'autres séquences décrites dans les résultats expérimentaux est faite, avant un retour sur la simulation de validation effectuée dans le chapitre précédent.

4.1 Propriétés physiques

Le fonctionnement du modèle nécessite l'introduction de propriétés physiques relatives aux matériaux constitutifs de la paroi étudiée et aux autres éléments physiques pris en compte dans la définition des transferts (chaleur, air sec, vapeur d'eau). Les matériaux constitutifs de l'épaisseur de la paroi sont la fibre de bois et l'enduit extérieur, et dans un second temps l'OSB. Les propriétés de ces matériaux ont été caractérisés dans le cadre de la tâche 1 du projet HYGROBAT, avec les résultats d'un partenaire dans (Vololonirina et al., 2014) et une synthèse avec celle d'autres laboratoires disponible dans l'annexe D.

Parmi les résultats des différents laboratoires, certaines propriétés ont été choisies pour les premières simulations, qui seront nommées simulations de références ("ref" sur les figures des résultats). Dans le cas de la fibre de bois, les valeurs choisies l'ont été pour le benchmark ayant servi à la validation du modèle dans le chapitre précédent (Description du modèle numérique). Ces valeurs sont récapitulées dans le tableau suivant :

Propriété	Valeurs	Unité
Porosité (ϵ)	0,9	-
Masse volumique (ρ_m)	146	kg/m^3
Chaleur massique (C_m)	11,271 × T(°C) + 1103,1	J/(kg.K)
Conductivité thermique(λ)	0,28 × θ_m(%) + (0,108 × T(°C) + 38)	mW/(m.K)
Perméabilité à la vapeur (δ_v)	4,4.10^{-11} entre 4% et 50% d'HR 6,8.10^{-11} entre 86% et 50% d'HR soit 5,85.10^{-13} × HR[%] +2,82.10^{-11} (Interpolation linéaire)	kg/(m.s.Pa)
Perméabilité à l'air (k_a)	4,16.10^{-13}	m^2
Isotherme de sorption θ_m=$f(HR)$	4,6.10^{-5} × (HR[%])^3 - 5,3.10^{-3} × (HR[%])^2 + 0,29 × HR[%] + 2,92.10^{-4}	%

Table 4.1 – Propriétés physiques du matériau fibre de bois

Les propriétés physiques de l'enduit utilisées pour les simulations de référence sont les suivantes :

Propriété	Valeurs	Unité
Masse volumique (ρ_m)	1600	kg/m^3
Chaleur massique (C_m)	-5.10^{-2} × T(°C)^2 + 7 × T(°C) + 704,5	J/(kg.K)
Conductivité thermique (λ)	0,83	W/(m.K)
Perméabilité à la vapeur (δ_v)	4,12.10^{-11}	kg/(m.s.Pa)
Isotherme de sorption (θ_m=$f[HR]$)	2,11.10^{-09} × (HR[%])^5 - 4,59.10^{-07} × (HR[%])^4 + 3,78.10^{-05} × (HR[%])^3 - 0,0014 × (HR[%])^2 + 0,029 × HR[%] + 0,12	%
Émissivité (ε)	0,9	-
Absorptivité (α)	0,306	-

Table 4.2 – Propriétés physiques de l'enduit

Les valeurs des propriétés physiques de l'OSB sélectionnées pour les simulations sont les suivantes :

Propriété	Valeurs	Unité
Porosité (ϵ)	0,5	-
Masse volumique (ρ_m)	596	kg/m^3
Chaleur massique (C_m)	8,2174 × T(°C) + 1050,7	J/(kg.K)
Conductivité thermique(λ)	1,96 × θ_m(%) + 91	mW/(m.K)
Perméabilité à la vapeur (δ_v)	4,5.10^{-12}	kg/(m.s.Pa)
Perméabilité à l'air (k_a)	2,13.10^{-15}	m^2
Isotherme de sorption θ_m=$f(HR)$	9,55.10^{-11} × (HR[%])^5 - 2,09.10^{-8} × (HR[%])^4 + 5,66.10^{-5} × (HR[%])^3 - 6.10^{-3} × (HR[%])^2 + 0,3 × (HR[%]) - 9,89.10^{-3}	%

Table 4.3 – Propriétés physiques du matériau OSB

Certaines des valeurs utilisées ci dessus seront modifiées afin de faire des études paramétriques et approcher au mieux les résultats expérimentaux, si les résultats des simulations de référence sont pas satisfaisants.
Les principales propriétés des éléments physiques pris en compte (air + vapeur d'eau + eau liquide) pour nos simulations sont les suivantes :

Propriété	Valeurs	Unité
Chaleur massique air sec (Cp_a)	1006	J/(kg.K)
Chaleur massique eau liquide(Cp_l)	4180	J/(kg.K)
Chaleur massique vapeur d'eau (Cp_v)	1870	J/(kg.K)
Chaleur latente de l'eau à 0°C (L_v)	2500000	J/kg

Table 4.4 – Chaleurs massiques/latentes utilisées dans le modèle

Les chaleurs spécifiques sont celles correspondant le mieux possible à la plage de températures que nous rencontrons dans les conditions réelles (-10 à 60°C). Le choix de la chaleur latente de l'eau à 0°C vient du fait que nous prenons cette température comme référence dans le calcul de l'enthalpie (Cf Chapitre 3).

4.2 Simulation sur la 1ère séquence du printemps 2013

La première séquence étudiée et qui nous sert de base pour la suite est la première du printemps 2013. Cette séquence qui part du 21 Mai à 0h au 4 Juin 2013 à 23h59 a été décrite dans le chapitre 2 (2.4.2 Analyse à court terme - Printemps 2013). Durant cette séquence, la consigne d'humidité relative intérieure dans les deux cellules a été montée de 40 à 70% dans la journée du 24 Mai 2013 et ramenée à l'état initial 7 jours plus tard, le 31 Mai 2013. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la période allant du 21 Mai à 0h au 27 Mai à 23h59, phase pendant laquelle l'humidité relative intérieure à la cellule expérimentale est passée de 40 à 70%, le tout à une température de 25°C. L'opération effectuée sur cette séquence expérimentale est identique sur les deux parois (PASSYS 1 et 2), ainsi que leurs compositions et leurs comportements. Nous utiliserons donc uniquement à la paroi sur la PASSYS 1 pour cette partie de l'étude. Pour rappel, la paroi est composée de deux couches de 8 cm d'isolant en fibre de bois et d'un enduit en surface extérieure.

L'étude se fera en plusieurs parties. En premier lieu les simulations seront faites avec des conditions aux limites à l'intérieur du même matériau, ici l'isolant en fibre de bois. Les limites seront alors progressivement repoussées aux interfaces entre l'isolant et la matière adjacente, pour au final prendre toute la paroi en compte.

4.2.1 Étude dans l'isolant en fibre de bois, validation dans une couche uniforme

Afin de nous affranchir des effets des conditions aux limites de la paroi, des simulations ont été effectuées en utilisant comme conditions aux limites les mesures expérimentales à 4 et à 12 cm dans la paroi (Figure 4.1). En effet, les interfaces entre l'isolant et ses limites rajoutent des paramètres au modèle (coefficient d'échanges, résistances de contact) qui peuvent compliquer l'interprétation et l'exploitation des résultats.
Les résultats de simulation à 8 cm sont alors comparés avec les résultats expérimentaux. Un autre avantage est que ces conditions aux limites dans cette configuration se trouvent également dans le matériau ; il n'y a donc pas de doute sur la nature de la mesure effectuée, comme cela pouvait être le cas pour les valeurs à la surface intérieure de la paroi (Cf Chapitre 2).

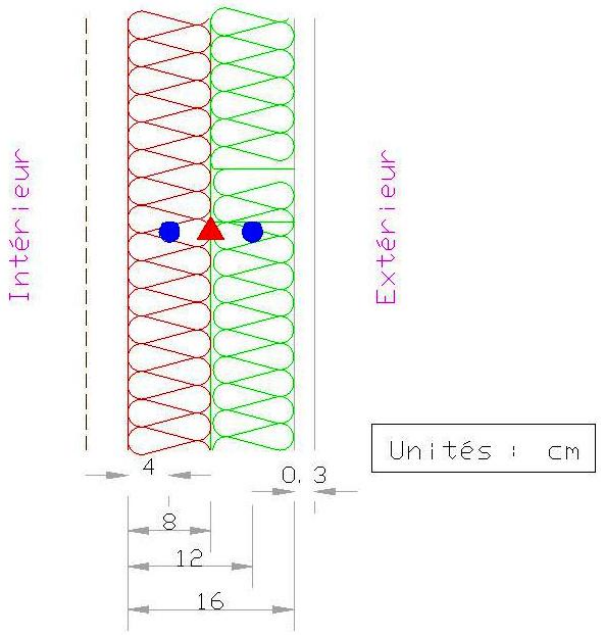


FIGURE 4.1 – Limites (cercles) et point de comparaison (triangle) dans l'isolant

Une première simulation été effectuée avec les propriétés dites "de référence". La figure 4.2 montre les résultats en température, humidité relative, pression de vapeur et flux thermique obtenus avec la simulation (en rouge). Ces valeurs peuvent être comparées aux valeurs expérimentales (en bleu), et les valeurs aux limites (en noir) nous permettent de nous repérer pour l'interprétation.
Les résultats montrent une bonne concordance des températures à 8 cm, même si un léger écart (0,3 °C) est constaté à partir du 25 Mai (Figure 4.3). Bien que cet écart a une valeur entrant dans l'intervalle de confiance de mesure des capteurs (la précision des thermohygromètres est de 0,3°C), le fait qu'il ne soit constaté qu'à partir de cette date et qu'il se reproduise tous les jours à partir de l'échelon le 24 Mai montre qu'il ne peut pas tout à fait être négligé. Des écarts sont aussi constatés au même moment pour les pressions de vapeur, à la différence qu'ils sont croissants (de 30 Pa entre le 24 et le 25 Mai à 100 Pa entre le 27 et le 28 Mai). Les transferts

de masse semblent donc plus lents dans le modèle numérique que dans la simulation expérimentale. Cette tendance est confirmée par les écarts en humidité relative, qui en plus montrent une reproduction plutôt médiocre de la dynamique journalière par le modèle numérique. Ces écarts en humidité relative lors du changement de la consigne intérieure (24 Mai) pourraient expliquer le léger écart constaté en température après cette date ; la dynamique étant plus lente en numérique, la quantité de vapeur s'adsorbant dans le matériau et libérant de la chaleur se trouvera être moindre dans le modèle numérique que dans les conditions expérimentales.

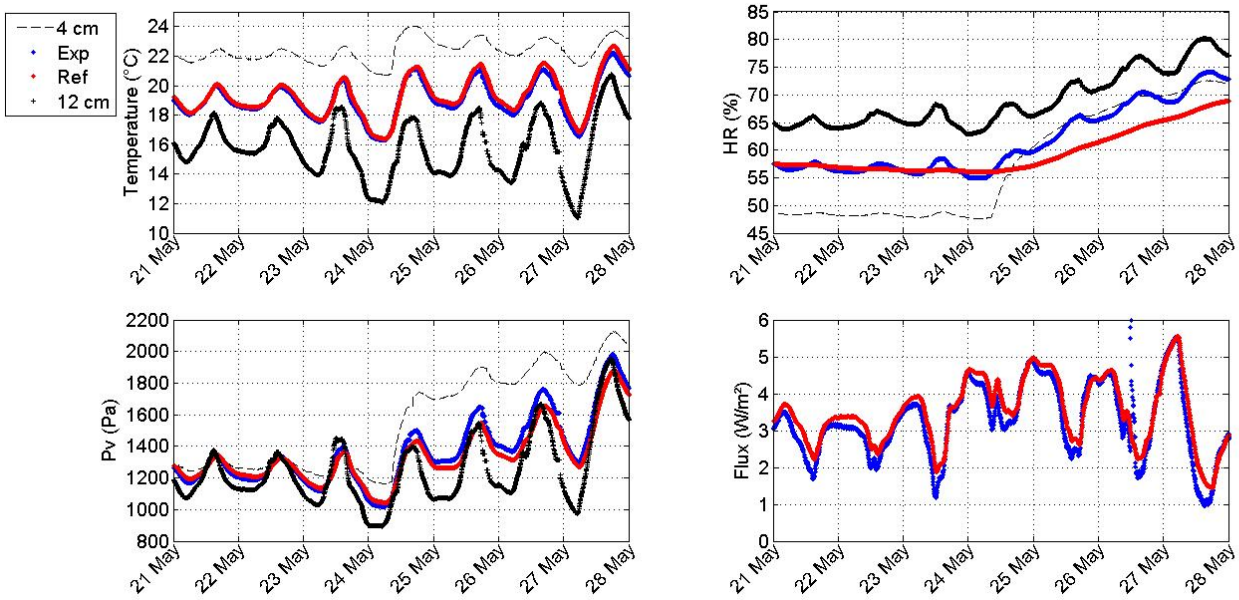


FIGURE 4.2 – Comparaison des résultats expérimentaux et de la simulation de référence à 8 cm

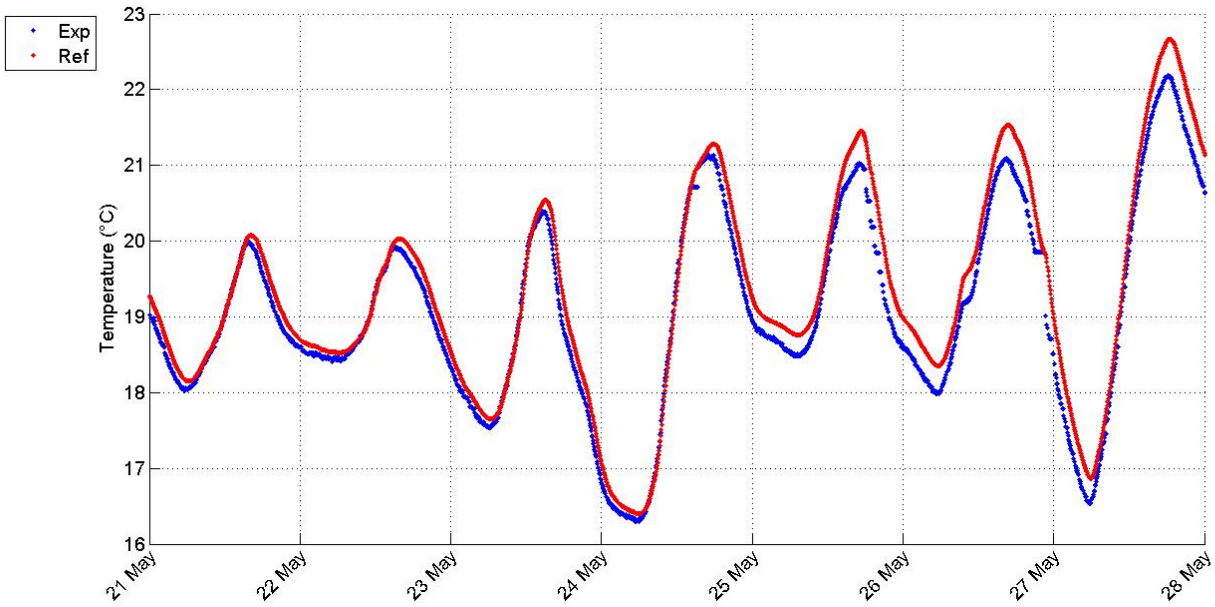


FIGURE 4.3 – Comparaison des résultats expérimentaux et de la simulation de référence à 8 cm : Zoom sur les températures

La dynamique de transfert de masse étant plus lente dans les simulations numériques, nous essayons donc de retrouver l'origine de cet écart en effectuant une étude sur les paramètres qui

influent le plus sur ces transferts de masse. Dans notre cas ces paramètres sont principalement la perméabilité à la vapeur et l'isotherme de sorption du matériau.

Perméabilité à la vapeur Lors de la tâche 1 du projet HYGROBAT portant sur la caractérisation des matériaux, plusieurs valeurs de perméabilité à la vapeur ont été mesurées. Ces valeurs dépendaient de la méthode utilisée, et surtout des conditions dans lesquelles elles étaient mesurées (conditions sèches ou humides). Les conditions sèches correspondant à un échantillon étant entre deux ambiances à 4 et 50% d'humidité relative, et les conditions humides correspondant à un échantillon entre deux ambiances à 50 et 80%. Dans la simulation dite de référence, une équation linéaire a été utilisée, en partant de la moyenne des humidité relatives des deux cas (sec et humide). Il est a noter que la perméabilité à la vapeur est plus importante dans le cas humide que le cas sec. Aussi les données expérimentales nous montrent que l'isolant est dans des conditions proches des conditions dites "humides" de caractérisation du matériau. Nous avons donc décidé pour notre étude paramétrique de prendre les valeurs de perméabilité à la vapeur en conditions humides en lieu et place de l'équation précédemment utilisée. Nous utiliserons ainsi les valeurs dans le tableau 4.5. Ces valeurs ont été mesurées en laboratoire par les partenaires du projet.

Propriété	Valeurs	Unité	Numéro
Perméabilité à la vapeur	7,9 * 10^{-11} (20°C, 86% – 50%)	kg/(m.s.Pa)	A
	6,8 * 10^{-11} (23°C, 86% – 50%)	kg/(m.s.Pa)	B
	6,6 * 10^{-11} (23°C, 86% – 50%)	kg/(m.s.Pa)	C

Table 4.5 – Valeurs de perméabilité à la vapeur de la fibre de bois en conditions humides

Le tableau donne aussi le détail des températures auxquelles ont été faites les caractérisations, et montre que celles faites à la même température donnent finalement des valeurs très proches. Les résultats présentés sur la figure 4.4 montrent un faible impact des modifications effectuées sur les résultats numériques. Ces derniers restent toujours à distance des résultats expérimentaux, même si celle de la perméabilité à la vapeur à 7.9 * 10^{-11} kg/(m.s.Pa) (essai numéroté A sur la figure 4.4) se détache légèrement des autres et est celle qui se rapproche le mieux des résultats expérimentaux en humidités relatives et pressions de vapeur.

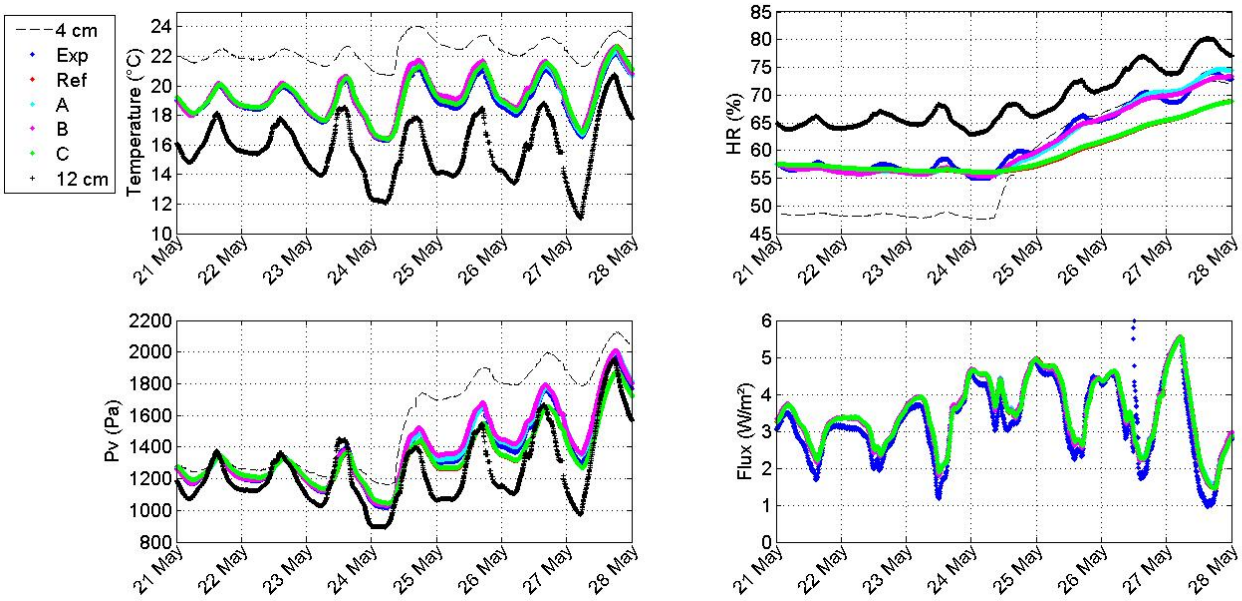


FIGURE 4.4 – Comparaison à 8 cm des résultats expérimentaux et des simulations avec perméabilités à la vapeur mesurées

Afin d'obtenir un effet plus important sur les résultats de simulations numériques, la variation de la perméabilité à la vapeur est poussée plus loin, cette fois-ci en sortant largement des intervalles de valeurs relevées jusqu'à présent lors de la caractérisation des matériaux. La valeur de perméabilité à la vapeur la plus élevée parmi celles utilisées précédemment est multipliée par 2 et par 5 (tableau 4.6).Ceci est inspiré par les discussions récentes sur l'interprétation des mesures de la coupelle formalisées par (Duforestel, 2015). Notons toutefois que la valeur la plus élevée de la perméabilité à la vapeur est supérieure à la perméabilité à la vapeur de l'air qui est de 1,80 * 10^{-10} kg/(m.s.Pa).

Propriété	Valeurs	Unité	Numéro
Perméabilité à la vapeur	2 * 7,9 * 10^{-11}	kg/(m.s.Pa)	E
	5 * 7,9 * 10^{-11}	kg/(m.s.Pa)	F

TABLE 4.6 – Valeurs de perméabilité à la vapeur de la fibre de bois utilisées en étude paramétrique

Ces changements ont un impact plus important sur les résultats, comme cela est visible sur la figure 4.5. Le fait de doubler la perméabilité à la vapeur donne des résultats qui sont très proches des résultats expérimentaux en pressions de vapeur, même s'ils ont encore du mal à reproduire la dynamique journalière en humidité relative. Cette dernière est mieux reproduite en multipliant la perméabilité à la vapeur par 5, mais une telle perméabilité à la vapeur ne reflète pas un cas réaliste, et entraine du côté des pressions de vapeur une dynamique plus importante que la dynamique expérimentale.

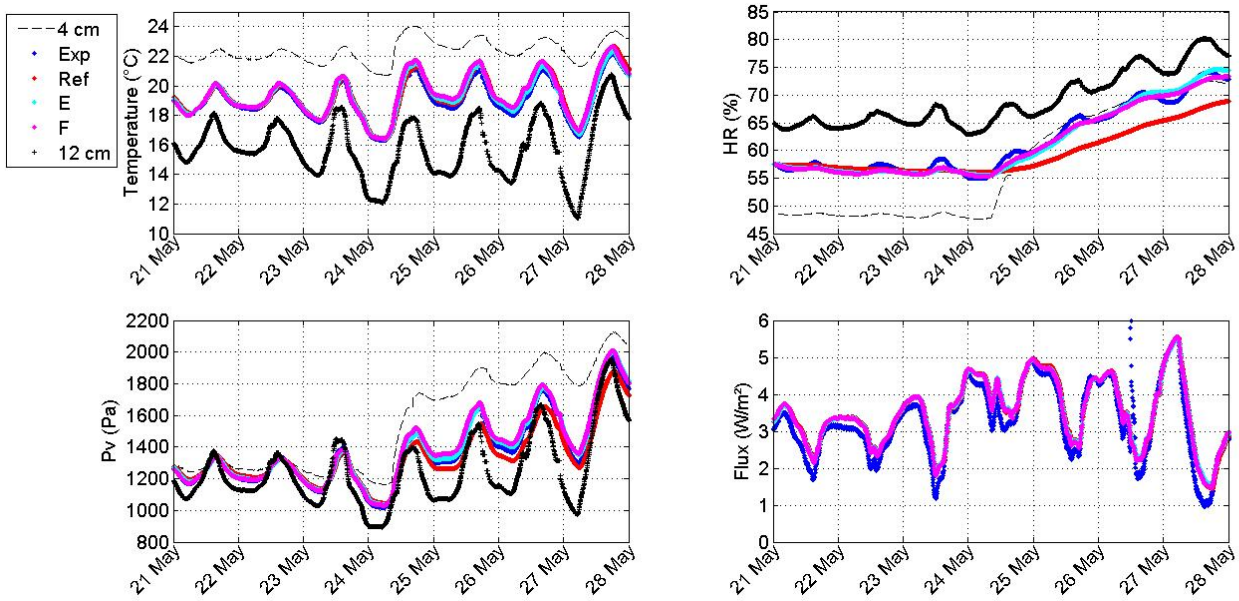


FIGURE 4.5 – Comparaison à 8 cm des résultats expérimentaux et des simulations avec perméabilités à la vapeur modifiées

Isotherme de sorption Le second paramètre principal pour la compréhension de la dynamique des transferts de masse en milieu hygroscopique est l'isotherme de sorption. Une autre manière d'influer sur les résultats numériques en humidité serait la modification de la pente de l'isotherme de sorption pour la plage d'humidité relative correspondant à notre environnement expérimental. Celle ci dans notre cas précis est régulièrement située entre 40 et 80%.

La dynamique des transferts de masse dans un matériau hygroscopique est caractérisée par un hystérésis entre les phases de sorption et de désorption de l'eau. Lors de la caractérisation du matériau, une sorption jusqu'aux valeurs les plus extrêmes est effectués (proche de 100% d'humidité relative) avant une désorption jusqu'aux valeurs extrêmes basses (proches de 0%). Les résultats pris tels quels ne prennent donc pas en compte les passages intermédiaires (par exemple sorption de 60 à 70% puis désorption) qui sont pourtant les plus fréquents en conditions réelles. L'idée d'une courbe intermédiaire dans l'intervalle de travail permettrait une estimation de ces passages. Afin de modifier cette pente, nous avons usé d'un artifice en faisant une linéarisation entre les courbes de sorption et de désorption dans les intervalles d'humidité relative que nous avons expérimentalement (Figure 4.6). Notons que la valeur de la perméabilité à la vapeur utilisées pendant ces tests est celle de la simulation de référence ("ref").

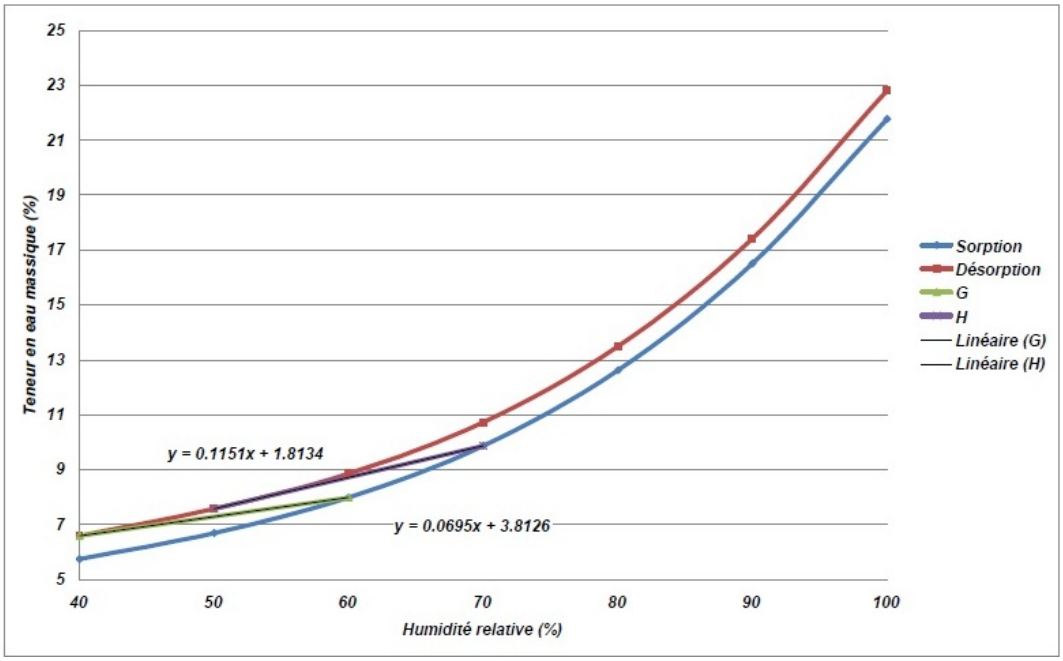


FIGURE 4.6 – Isothermes de sorption/désorption et courbes intermédiaires artificielles

Le tableau 4.7 nous permet de mieux appréhender les changements de pente de l'isotherme de sorption effectués :

Propriété	Valeurs	Numéro
Pente de l'isotherme de sorption	0,0695	G
	0,1151	H

TABLE 4.7 – Pente des courbes intermédiaires artificielles des isothermes de sorption

L'approximation sur l'isotherme de sorption, avec le changement de pente, montre une amélioration de la sortie du modèle, et son rapprochement des valeurs expérimentales (Figure 4.7). Ce rapprochement est d'autant plus important que la pente de l'isotherme de sorption est réduite (Courbe de G dans figure 4.7). Néanmoins les amplitudes de variations journalières en humidité relative sont toujours difficiles à reproduire, bien qu'on observe une amélioration par rapport au cas de référence.

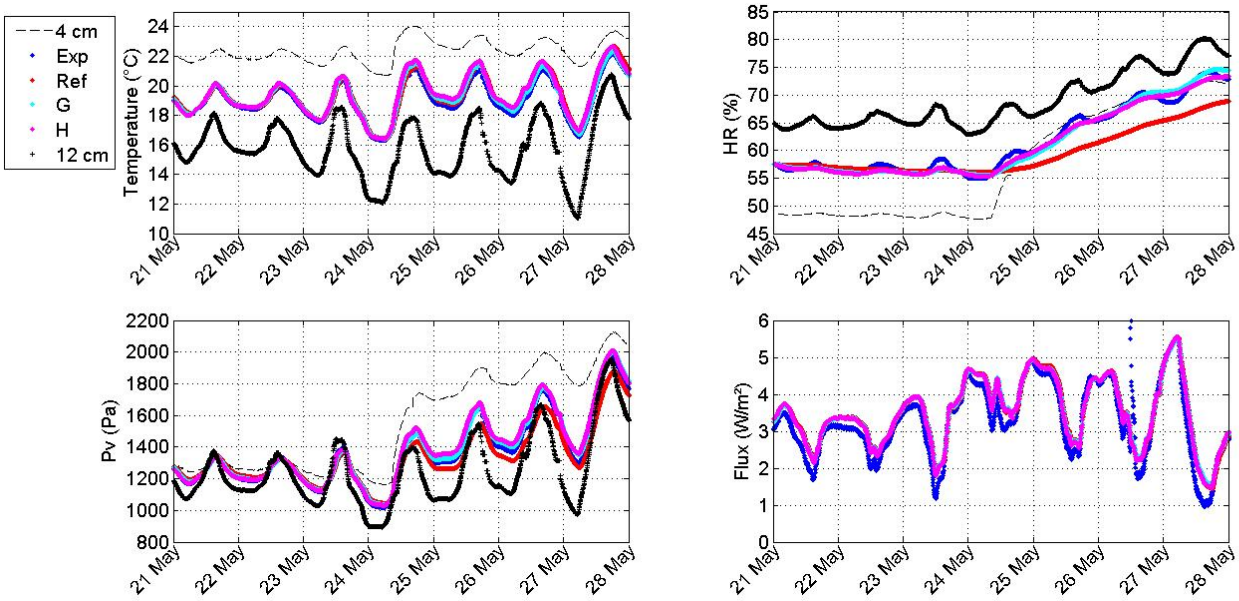


FIGURE 4.7 – Comparaison à 8 cm des résultats expérimentaux et des simulations avec pentes des isothermes de sorption modifiées

Récapitulatif Les modifications des éléments influant le plus sur les transferts de masse (perméabilité à la vapeur et isotherme de sorption) donnent quelques explications sur les écarts entre mesures expérimentales et simulations numériques. Concernant la perméabilité à la vapeur, les valeurs issues de la caractérisation des matériaux, même dans les valeurs les plus élevées, ne montrent pas de rapprochement significatif avec les résultats expérimentaux. On observe néanmoins de meilleurs résultats en doublant la plus grande valeur de perméabilité à la vapeur mesurée, l'essai en la quintuplant ne correspondant pas à un cas réel. Une linéarisation artificielle de l'isotherme de sorption donne aussi des résultats intéressants, qui se rapprochent des valeurs expérimentales au fur à mesure que la pente de l'isotherme est réduite.
Une tentative de combinaison des deux conclusions dans une simulation permet de retrouver des résultats relativement proches des résultats expérimentaux (Figure 4.8). Dans ce cas où la perméabilité à la vapeur est doublée (cas E) et la pente de l'isotherme de sorption à 0,1151 (cas H), nous obtenons des résultats intéressants, même si la dynamique journalière en humidité relative reste finalement plutôt mal reproduite. Il est à noter aussi que les remarques sont les mêmes autant dans la phase de sorption (passage de 40 à 70% d'HR) que dans la phase de désorption en fin de séquence (retour à 40% d'HR).

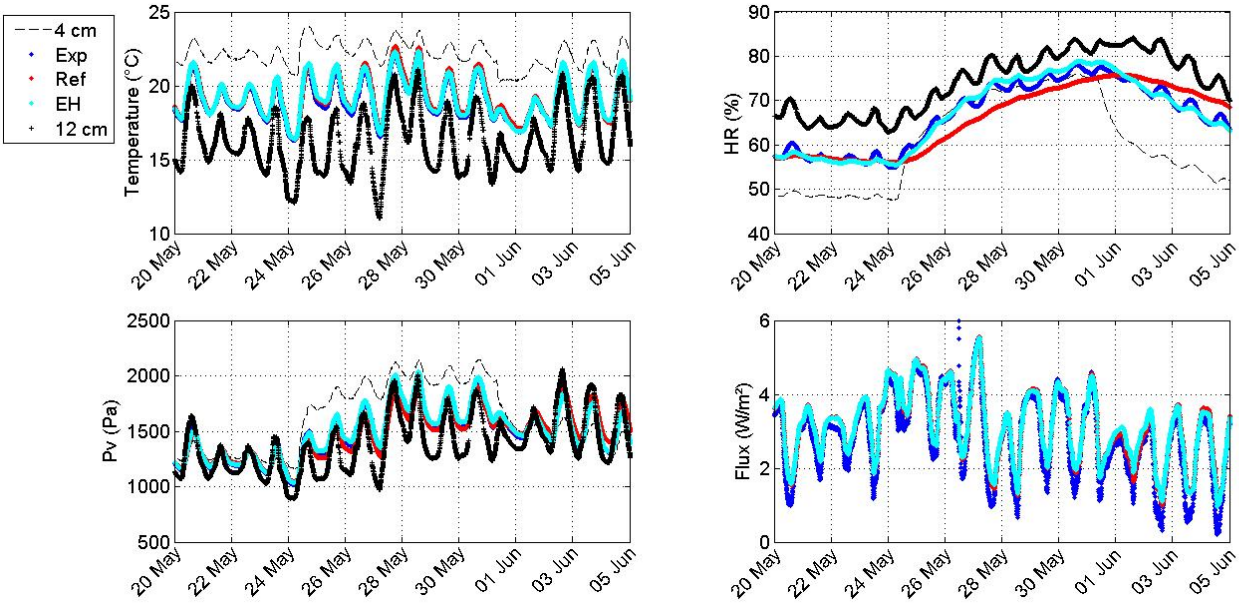


FIGURE 4.8 – Comparaison à 8 cm des résultats expérimentaux et des simulations avec perméabilité à la vapeur et pente de l'isotherme de sorption modifiés

Ces derniers ajustements seront utilisés dans la suite et porteront le nom de "EH" sur les courbes de comparaison des résultats.

4.2.2 Étude sur l'isolant en fibre de bois, validation aux limites de l'isolant

Les problèmes spécifiques à l'isolant en fibre de bois ayant été discutés, les limites du domaine d'étude sont repoussées aux bords de l'isolation. Les nouvelles limites pour la simulation sont donc l'interface isolant-enduit d'une part, et l'interface isolant-air intérieur d'autre part (Figure 4.9).

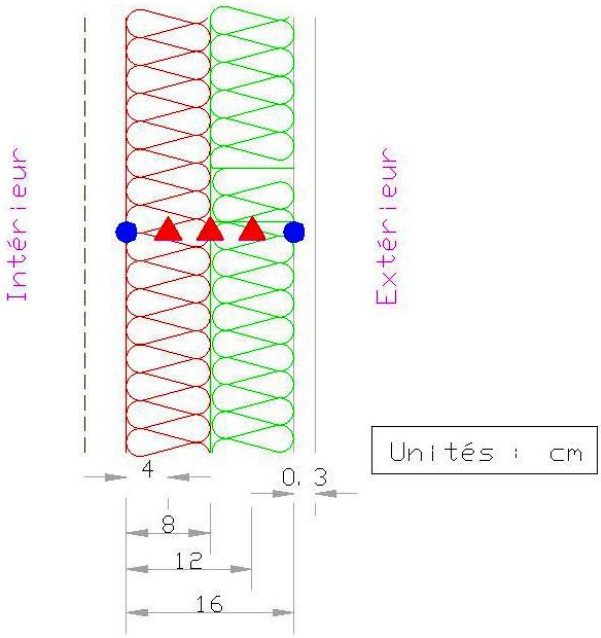


FIGURE 4.9 – Limites (cerles) et points de comparaison (triangles) dans l'épaisseur de la paroi

Des simulations sont effectuées en utilisant en premier lieu les propriétés des matériaux choisies en 4.1 (et notées "ref"), et ensuite en prenant en compte ces propriétés "optimisées" en 4.2.1 (notées "EH"). Les résultats de ces simulations confirment la tendance relevée dans la section précédente (4.2.1), avec de meilleurs résultats en humidité relative lorsque la perméabilité à la vapeur et la pente de l'isotherme de sorption sont modifiées (Figure 4.10). Les dynamiques journalières restent un peu différentes, avec un écart allant à 2% d'humidité relative au milieu de l'isolant (8 cm) et à 5% à 12 cm entre résultats numériques et expérimentaux. Ces écarts maximaux sont observés quand les valeurs d'humidité relative sont minimales avant l'échelon, et dans les jours qui suivent l'échelon ils sont observés quand ces valeurs sont maximales.

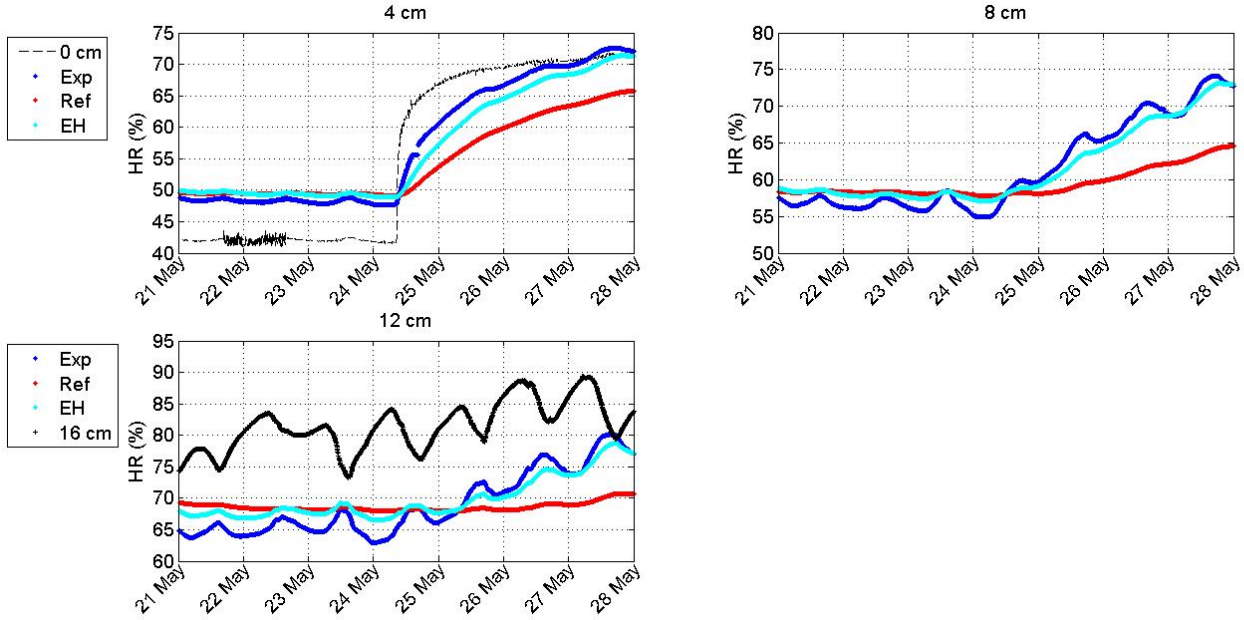


FIGURE 4.10 – Comparaison des humidités relatives dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH"

Le positionnement du capteur à l'interface isolant - enduit a été confirmé lors du démontage de la paroi à la fin des expériences (Chapitre 2) : Il est bien à l'interface malgré sa taille et la crainte qu'il soit entièrement dans l'enduit. Par contre le capteur à l'interface isolant - air intérieur pourrait ne pas mesurer les conditions à l'exacte interface. Un défaut de contact ou une mauvaise position de l'élément sensible du thermohygromètre lui ferait mesurer les valeurs de l'air à proximité de la surface plutôt que les valeurs à la surface. L'élément sensible pourrait aussi perturber localement les transferts de masse entre l'isolant et l'air, ce qui peut aussi être à l'origine des différences constatées.
La figure 4.11 montre aussi un écart entre températures mesurées et simulées dans les deux cas ("ref" et "EH"). Cet écart est observé à tous les points de comparaisons, et va jusqu'à 0,8°C dans les phases de baisse de température journalières. Les baisses de températures sont surestimées dans ces cas. Ces baisses ne pourraient par contre pas être attribuées principalement aux transferts de masse, la figure 4.12 montrant des écarts en pression de vapeur très faibles surtout dans le cas avec les propriétés de matériaux modifiés ("EH"). Mais cette amplitude plus importante explique la mauvaise reproduction de l'amplitude journalière en humidité relative. Les propriétés de matériaux modifiées ("EH") permettent néanmoins de bien reproduire la hausse de température consécutive à l'adsorption de vapeur lors de l'échelon en humidité relative le 24 Mai.

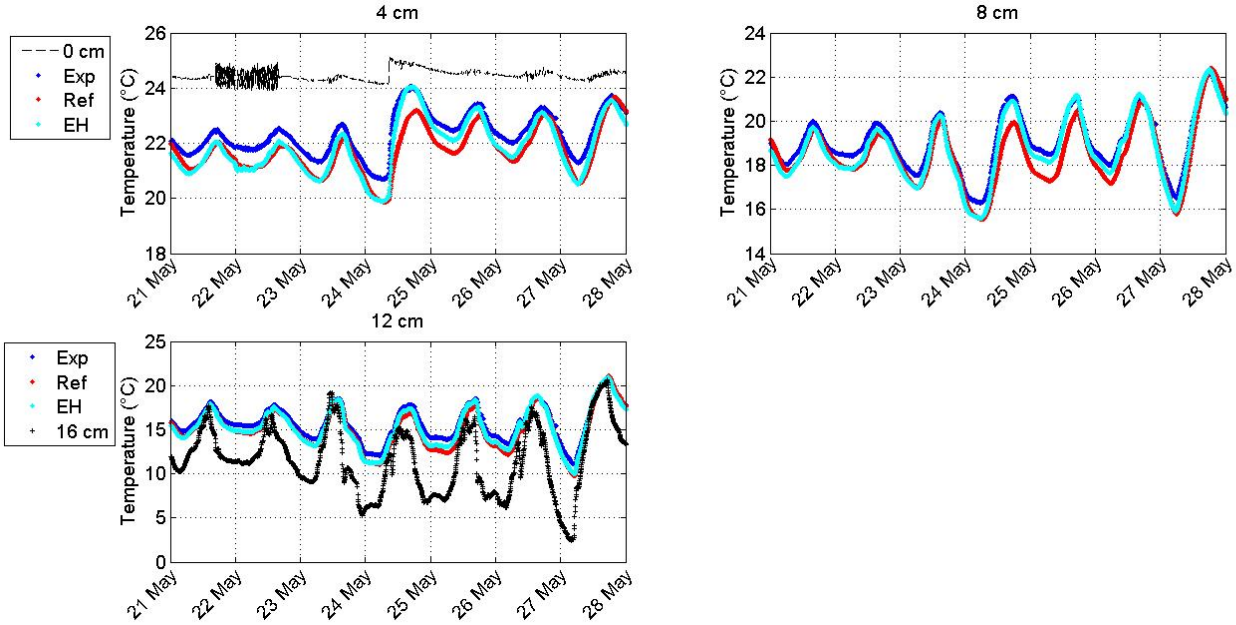


FIGURE 4.11 – Comparaison des températures dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH"

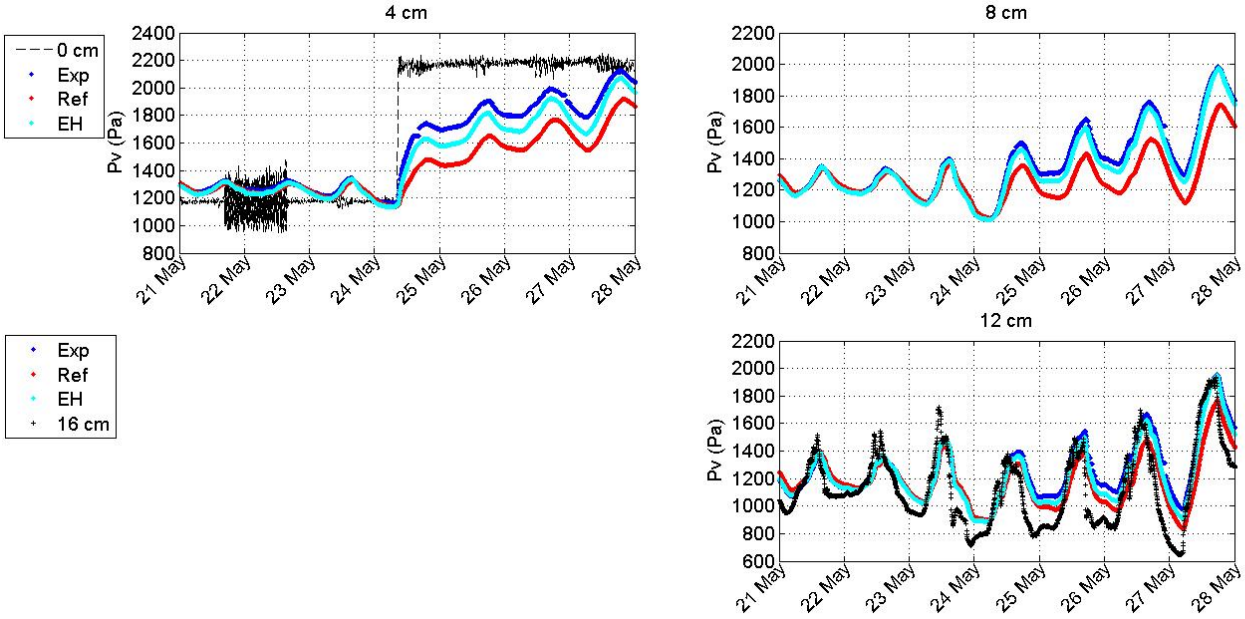


FIGURE 4.12 – Comparaison des pressions de vapeur dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH"

Récapitulatif Les résultats des simulations avec pour conditions aux limites les limites de l'isolant ont permis de confirmer les tendances observées en 4.2.1, à savoir une meilleure estimation des transferts de masse avec une perméabilité à la vapeur doublée et un changement de pente de l'isotherme de sorption. Ils ont par contre mis en évidence un écart régulier en températures quand ses valeurs sont les plus faibles (pendant la nuit) et qui est probablement à l'origine de la mauvaise reproduction de la dynamique journalière en humidité relative.

4.3 Simulation sur séquences suivantes

Une étude sur les autres séquences expérimentale est maintenant envisagée, afin de consolider les conclusions de la partie précédente, ou de mettre en évidence de nouvelles différences significatives. Les séquences étudiées ici sont celles de l'été 2013 et de l'hiver 2014. Dans le premier cas les études seront consacrées à la paroi sur la PASSYS 2, cette dernière étant celle ayant été exposée au Sud pendant cette période. Les études sur la séquence hivernale s'intéresseront elles à la paroi de la PASSYS 1, qui a été celle modifiée pendant cette période.

4.3.1 Été 2013

La séquence d'été a connu deux phases : une première pendant laquelle la paroi de la PASSYS 2 a été orientée au sud, et les conditions intérieures modifiées tout en maintenant la pression de vapeur intérieure constante, et la seconde pendant laquelle un échelon comparable a celui de la séquence du printemps mais inversé a été effectué.

Séquence a

La paroi de la PASSYS 2 est orientée au Sud le 30 Juillet 2013, et un passage en mode climatisation est effectué le lendemain. Le mode climatisation consiste en une baisse de la température intérieure de 24°C à 16°C. Cependant afin de maintenir une pression de vapeur constante, l'humidité relative est passée de 45% à 70%.
Les figures 4.13 et 4.14 montrent les écarts thermiques entre résultats de simulations et expérimentaux. Là où l'utilisation des propriétés de référence entraine un déphasage de 3 heures environ sur les valeurs maximales de température ainsi que sur les flux thermiques, la modification (EH) permet d'avoir des résultats plus proches de ceux expérimentaux.

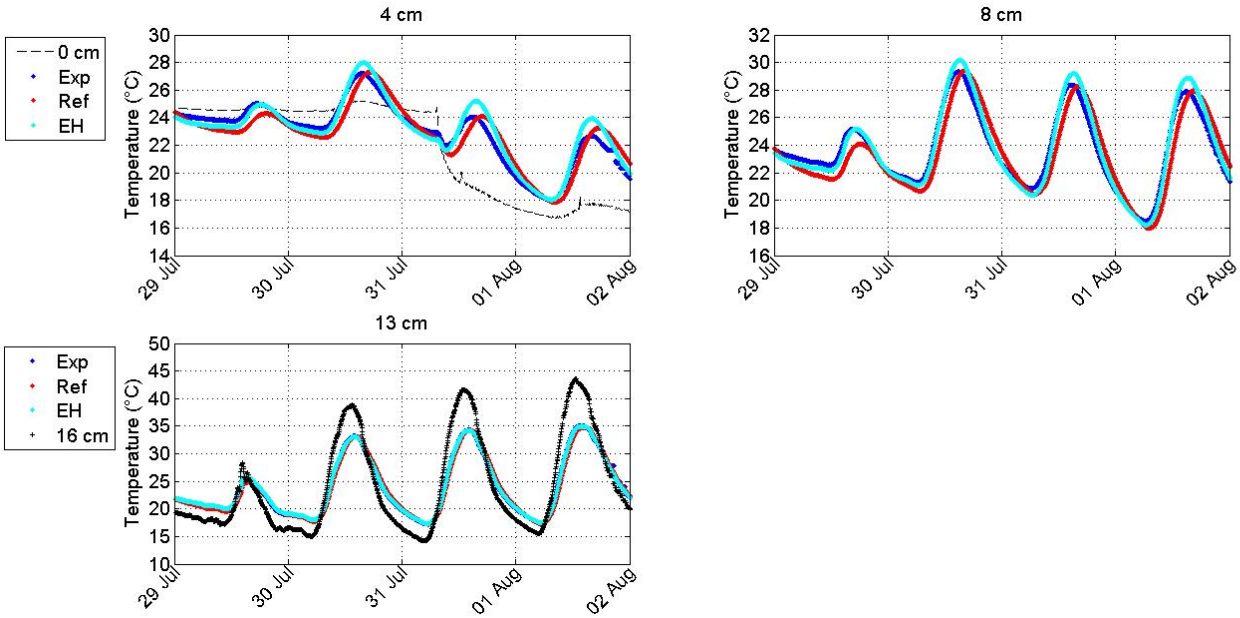


FIGURE 4.13 – Comparaison des températures dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence a

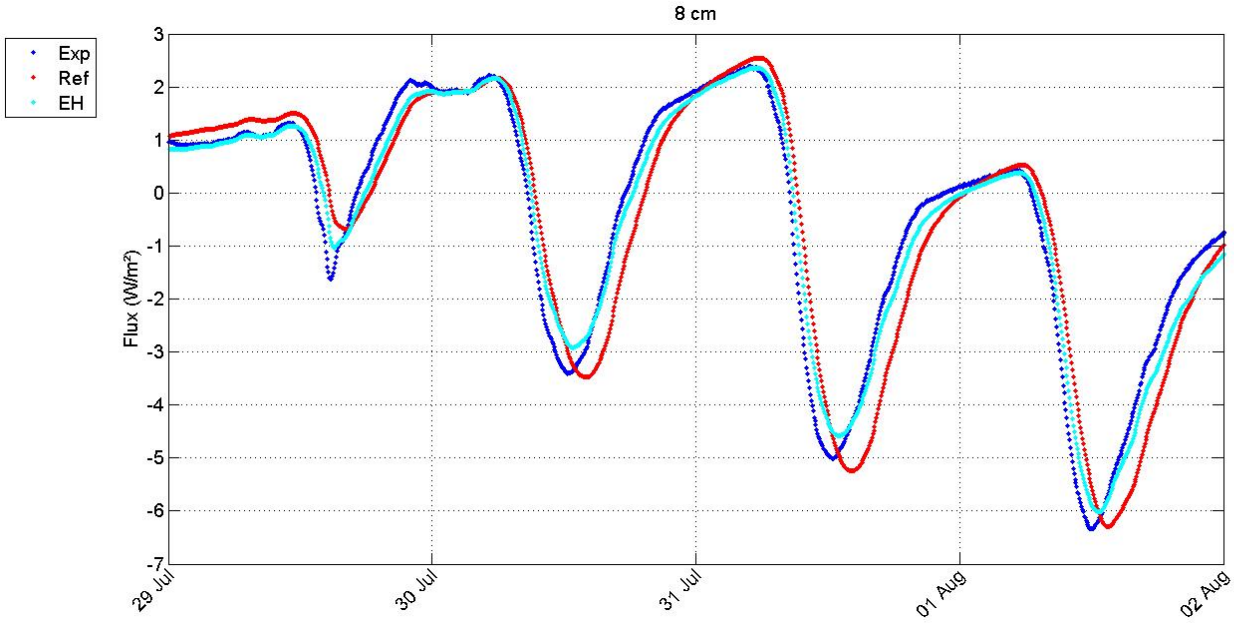


FIGURE 4.14 – Comparaison des flux thermiques dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence a

Des différences au niveau des amplitudes journalières sont malgré tout relevées, au niveau des flux (amplitudes plus faibles en simulation) liées à celles en températures (amplitudes plus élevées en simulation). Une surestimation des températures d'environ 0,8°C lorsqu'elles sont à leur maximum est ainsi observée sur la figure 4.13. Les amplitudes journalières sont aussi différentes en humidité relative, entre les résultats de simulation et expérimentaux (Figure 4.15), les écarts allant jusqu'à 3%. Le déphasage entre pics d'humidité relatives est néanmoins bien rectifié par la modification des propriétés de matériaux (EH)

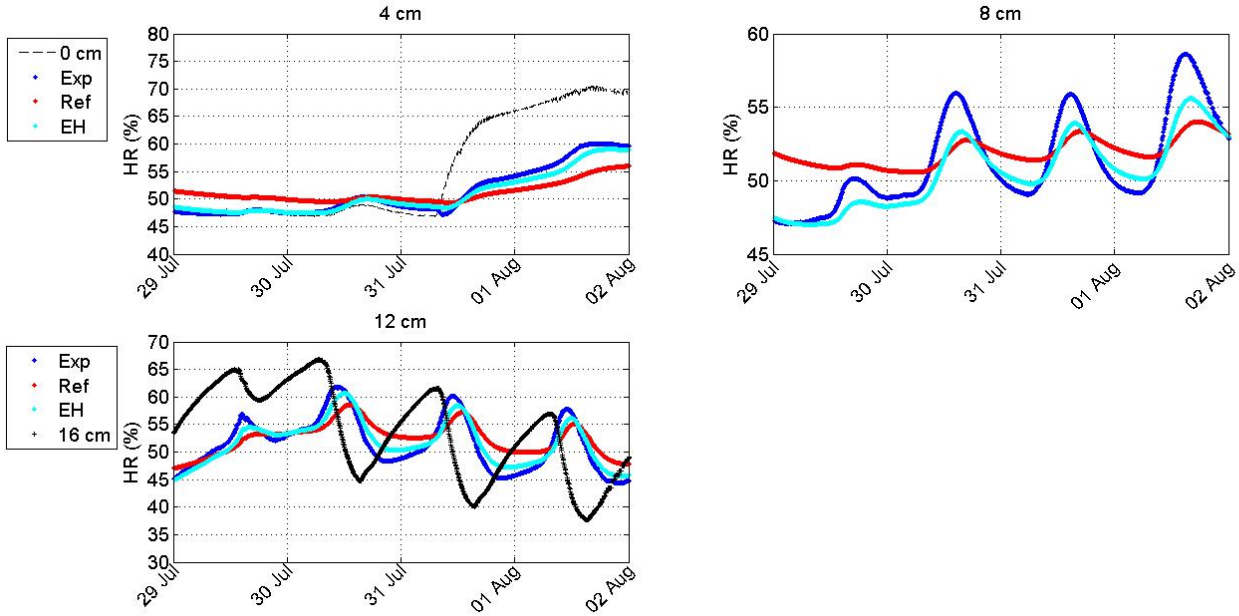


FIGURE 4.15 – Comparaison des humidités relatives dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence a

Séquence b

Dans cette séquence consécutive au passage en mode climatisation, l'humidité relative intérieure est baissée à 40% avant d'être ramenée à 70% quelques jours plus tard. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux conduisent aux mêmes conclusions que les cas cités précédemment. Le déphasage des pics, auparavant de 3h, est réduit lorsque les propriétés sont modifiées (EH), tant en phase de désorption (Figure 4.16) qu'en phase de sorption ensuite (Figure 4.17). L'amplitude des pressions de vapeur est toujours plus importante avec les résultats de simulations en comparaison avec les données expérimentales, avec un écart maximum de 50 Pa au niveau des valeurs maximales et minimales.

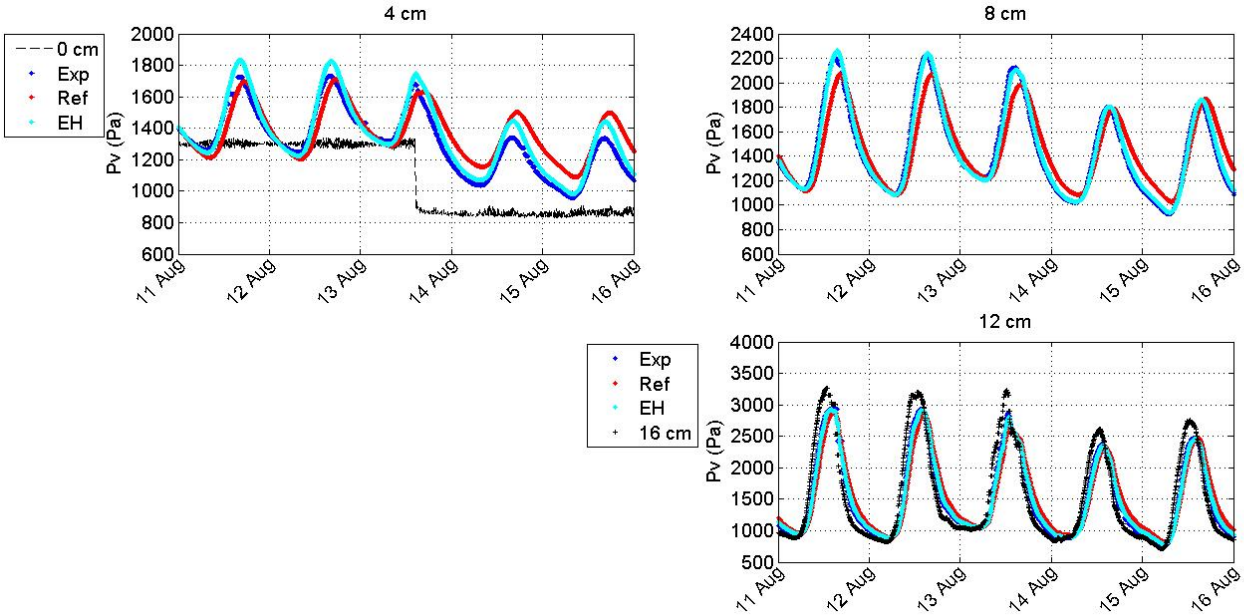


FIGURE 4.16 – Comparaison des pressions de vapeur dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence b - première partie

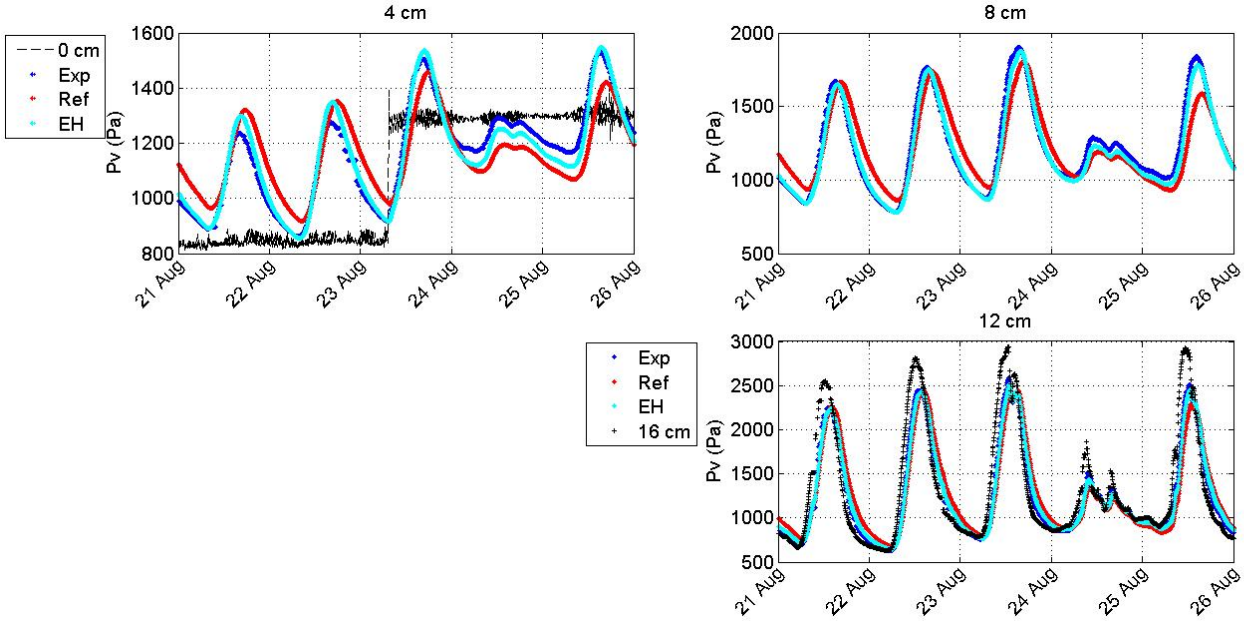


FIGURE 4.17 – Comparaison des pressions de vapeur dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence b - deuxième partie

Les différences au niveau des amplitudes journalières sont comme dans les cas précédents plus visibles en ce qui concerne les humidités relatives (Figures 4.18 et 4.19), avec des ordres de grandeur similaires (3%). Les résultats sont donc comparables à ceux obtenus avec la séquence similaire du printemps (échelons en humidité relative intérieure).

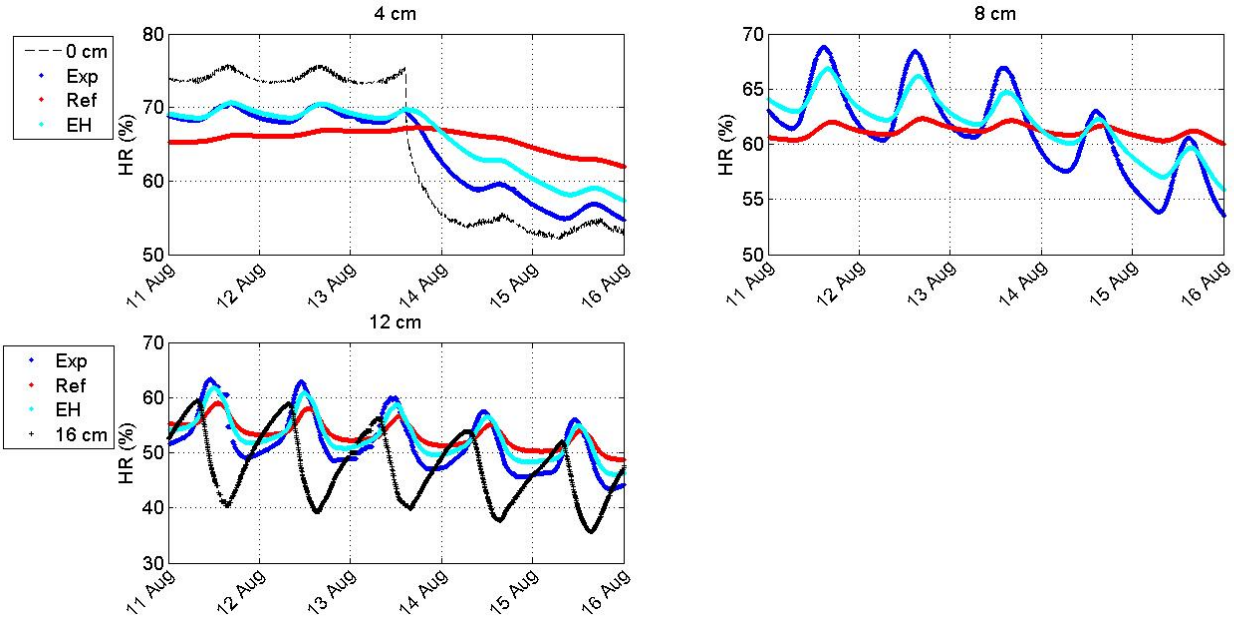


FIGURE 4.18 – Comparaison des humidités relatives dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence b - première partie

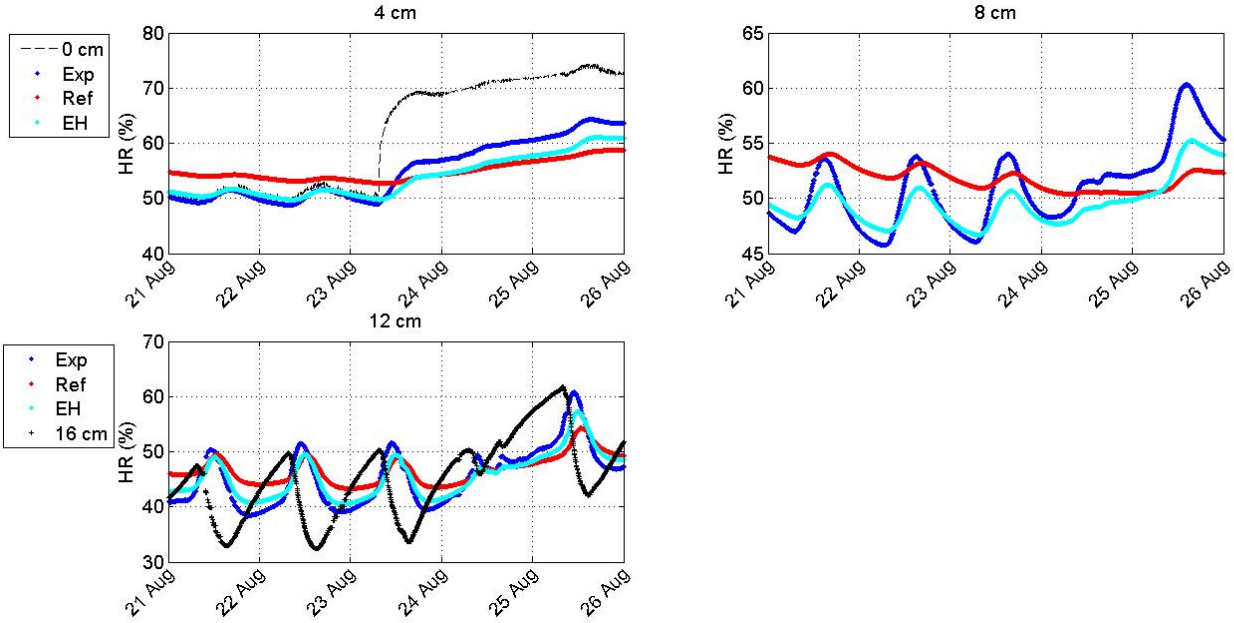


FIGURE 4.19 – Comparaison des humidités relatives dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Été 2013 Séquence b - deuxième partie

4.3.2 Hiver 2014

La séquence hivernale est marquée par le changement de composition de la paroi de la PASSYS 1, qui sera étudiée ici. L'épaisseur de l'isolation passe de 16 à 20 cm, et la paroi est recouverte à l'intérieur par une plaque d'OSB de 1 cm d'épaisseur. Le repère pour le positionnement des points ne changeant pas, les éléments rajoutés à l'intérieur ont un indice de position négatif. Le domaine d'étude est élargi vers l'intérieur, avec comme nouvelle condition à cette limite l'interface OSB - air intérieur (Figure 4.20). Dans cette séquence, un échelon (passage de 40% d'HR intérieure à 60%) est effectué le 13 Mars 2014.

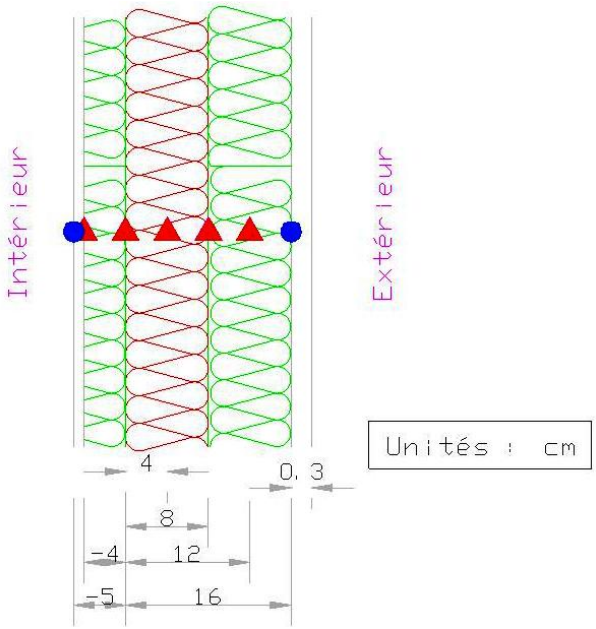


FIGURE 4.20 – Limites (cercles) et points de comparaisons (triangles) dans l'épaisseur de la paroi

La comparaison des résultats de simulations et expérimentaux montre une bonne adéquation entre les résultats pour les propriétés de la fibre de bois modifiées (EH) et les résultats expérimentaux au niveau des températures (Figure 4.21). La couche d'OSB servant de tampon hygroscopique important, l'effet du changement de l'humidité relative intérieure sur les températures est presque invisible (Voir flèche sur Figure 4.21). On note néanmoins un écart d'amplitude à - 4 cm, surtout lorsque les températures baissent la nuit (près de 0,5 °C de différence).

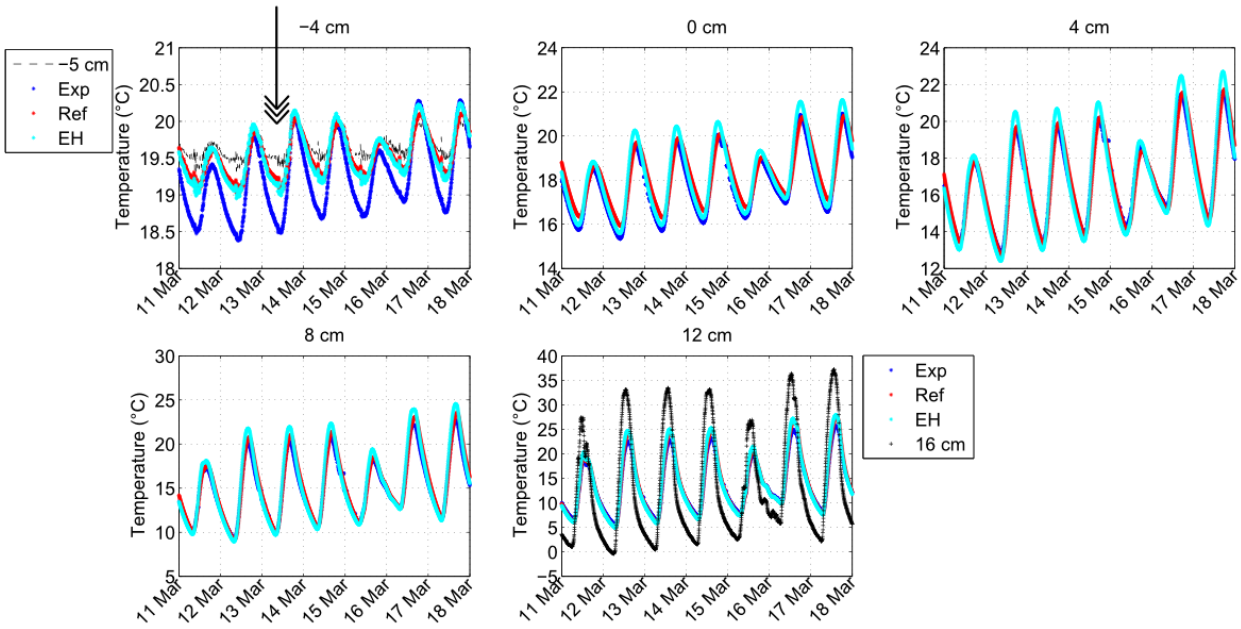


FIGURE 4.21 – Comparaison des températures dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Hiver 2014

La comparaison des humidités relatives montre un accord quasi parfait entre les résultats avec propriétés modifiées ("EH") et les données expérimentales entre la plaque d'OSB et l'iso-

lation (-4cm). Des différences d'amplitudes journalières sont ensuite observées pour le reste de la paroi, ces différences augmentant vers l'extérieur de la paroi. En effet, les écarts les plus importants sont de l'ordre de 3% à 0 et 4 cm, et atteignent 5% à 8 et 12 cm (Figure 4.22). Ces écarts sont les plus importants lorsque les valeurs journalières sont maximales, en milieu de journée ; et elles sont minimales voire quasi nulles les nuits. La dynamique sur plusieurs jours reste quand même très bonne, surtout en ce qui concerne les effets du changement d'humidité relative intérieure sur l'humidité relative dans les premiers centimètres de la paroi (-4 cm et 0 cm).

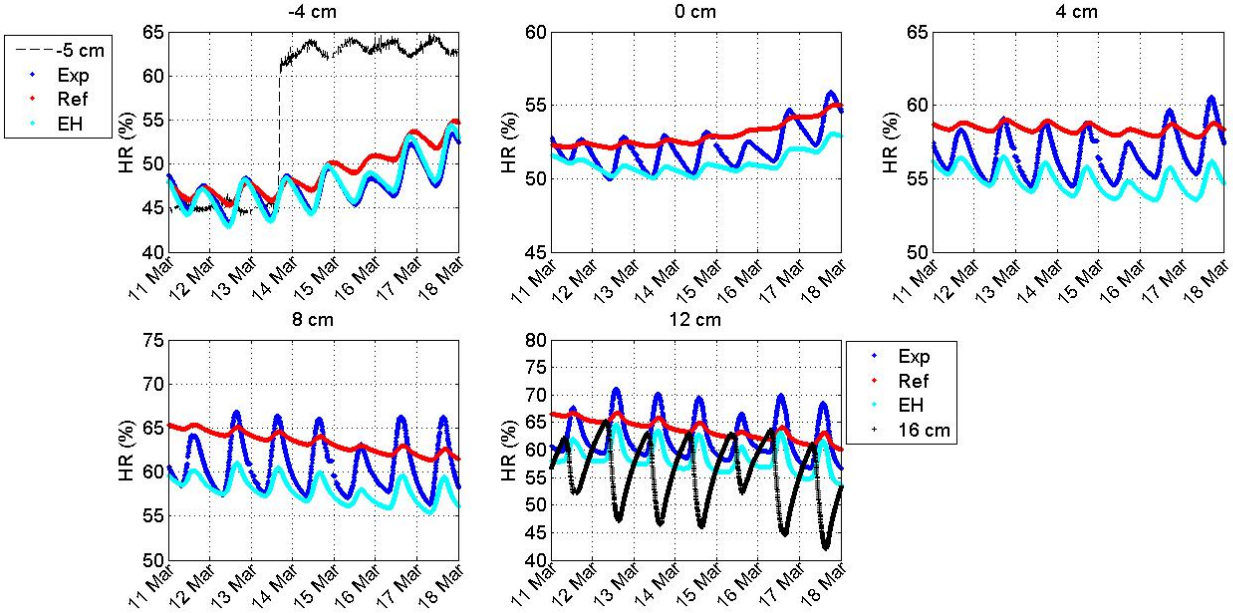


FIGURE 4.22 – Comparaison des humidités relatives dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Hiver 2014

Les écarts sont moins visibles sur les valeurs de pression de vapeur, comme le montre la figure 4.23.

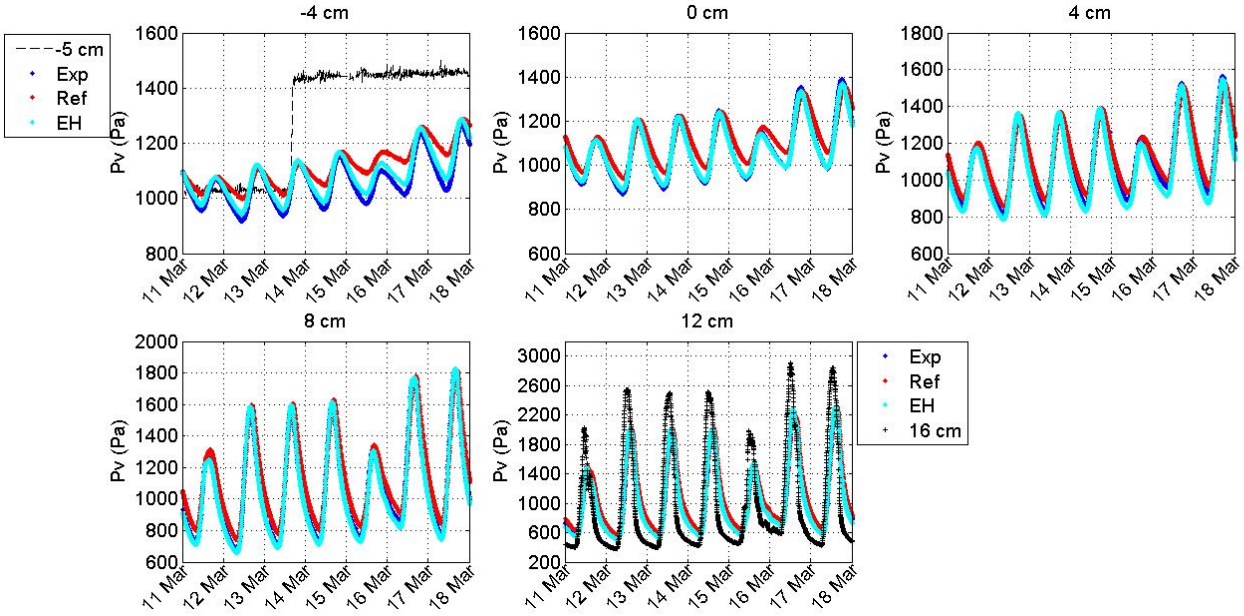


FIGURE 4.23 – Comparaison des pressions de vapeur dans l'isolant avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH" : Hiver 2014

Récapitulatif Les simulations effectuées sur la séquence du printemps 2013 et qui ont abouti à une amélioration des résultats numériques comparés aux résultats expérimentaux lors de modifications de certaines propriétés de l'isolant, ont été reproduites pour les autres séquences correspondant à des saisons et à des compositions de paroi différentes. Les séquences estivales incluent changement de l'orientation de la paroi plein sud qui a pour effet d'augmenter les amplitudes journalières. Ensuite un échelon en humidité relative est appliqué. La séquence hivernale est marquée par l'ajout d'une épaisseur d'isolant plus importante et surtout une couche d'OSB qui sert de tampon hygroscopique important.

De manière générale, la comparaison des résultats numériques et expérimentaux montre des différences sur la dynamique en humidité relative et pression de vapeur. Ces différences sont réduites lorsque les propriétés des matériaux qui influencent les transferts de masse sont modifiés (Notées "EH" pour la meilleure combinaison). Néanmoins quelques différences en humidité relative persistent.

De manière plus spécifique, dans le cas des sections estivales, le rapprochement des résultats numériques et expérimentaux se fait principalement par une diminution significative du déphasage en temps entre les moments où les mesures physiques (température, humidité relative) atteignent leurs valeurs maximales ; le déphasage initial étant de 3h. Les différences persistances sont des amplitudes, plus importantes en numérique qu'en expérimental dans le cas des températures, et l'inverse en humidité relative.

Le cas de la séquence hivernale est différent, avec peu de déphasage entre les valeurs maximales. L'essentiel des différences se retrouvent au niveau des moyennes des humidités relatives, plus élevées lors de l'utilisation des propriétés des matériaux de base. Dans ce dernier cas la modification "EH" permet une bonne concordance, surtout avec les valeurs minimales, une concordance qui néanmoins diminue au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'extérieur.

4.4 Retour sur la simulation de validation du modèle (Chapitre 3)

Les précédents développements amènent à une question sur les simulations de validation du modèle : Quelles seront les conséquences sur les écarts observés entre les résultats de simulation et expérimentaux, de la modification des propriétés des matériaux, dans un cas de conditions contrôlées ?
Dans cette partie les simulations ayant servi à la validation du modèle numérique (Cf Chapitre 3) sont donc reprises avec les propriétés de matériaux modifiées (EH), et les résultats sont comparés aux résultats de la première simulation de validation du modèle et aux résultats expérimentaux. Pour rappel, le dispositif expérimental est constitué d'une couche d'isolant en fibre de bois de 80 mm d'épaisseur et placé entre deux ambiances. Le matériau de l'isolant est le même que celui du dispositif expérimental qui a servi à l'étude jusqu'ici. La couche d'isolant est soumise à plusieurs conditions aux limites, dont une "hivernale" où les températures sont baissées et l'humidité relative augmentée, et une "périodique" où pendant plusieurs jours sont reproduites des séquences correspondant au jour et à la nuit. Les conditions aux limites utilisées sont les interfaces entre l'isolant et les différentes ambiances, et trois points de comparaison dans la paroi sont utilisés (20, 40 et 60 mm).

Séquence "hivernale" Durant cette séquence la température d'un côté de la paroi baisse à 5°C et l'humidité relative monte à 80%, et ce durant une période de 3 semaines. Si les nouvelles propriétés ne changent rien côté température, en humidité relative il y a une amélioration nette (Figure 4.24). La dynamique des humidités relatives semble être mieux respectée, même si il subsiste des écarts réguliers, comme les 3% d'écart en humidité relative à 60 mm entre le 23 Janvier et le 7 Février.

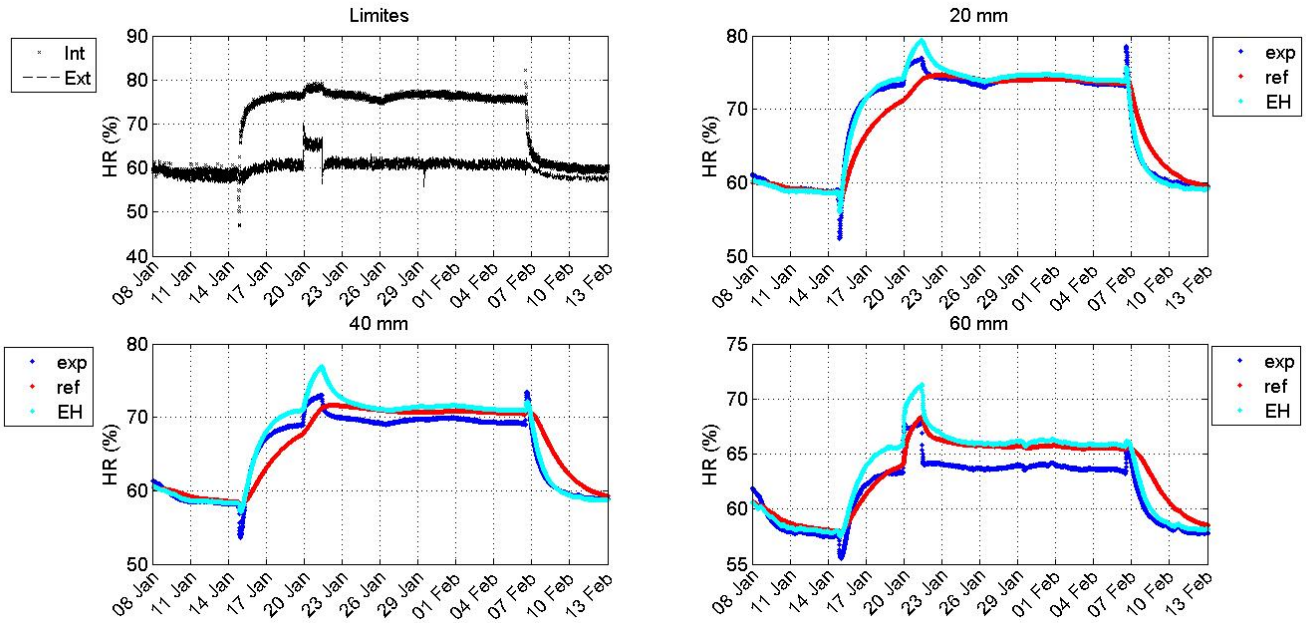


FIGURE 4.24 – Simulations de validation : humidités relatives avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH", séquence "hivernale"

Séquence "périodique" Cette séquence reproduit expérimentalement les alternances journées/nuits dans des conditions contrôlées. Ainsi sur une période de 24h, l'humidité relative monte linéairement de 52 à 70% pendant 12h avant de revenir à son niveau initial les 12h

suivantes. La température évolue en opposition de l'humidité relative, entre 14 et 6°C.
Pour cette séquence les résultats en humidité relative sont sur la figure 4.25. Les premières simulations ont montré un déphasage entre les périodes des résultats numériques et celles des résultats expérimentaux. Ce déphasage semble être corrigé par la modification des propriétés, avec des pics qui sont maintenant en phase. Malgré tout, les différences d'amplitude subsistent, même si elles sont moins importantes que lors des premières simulations.

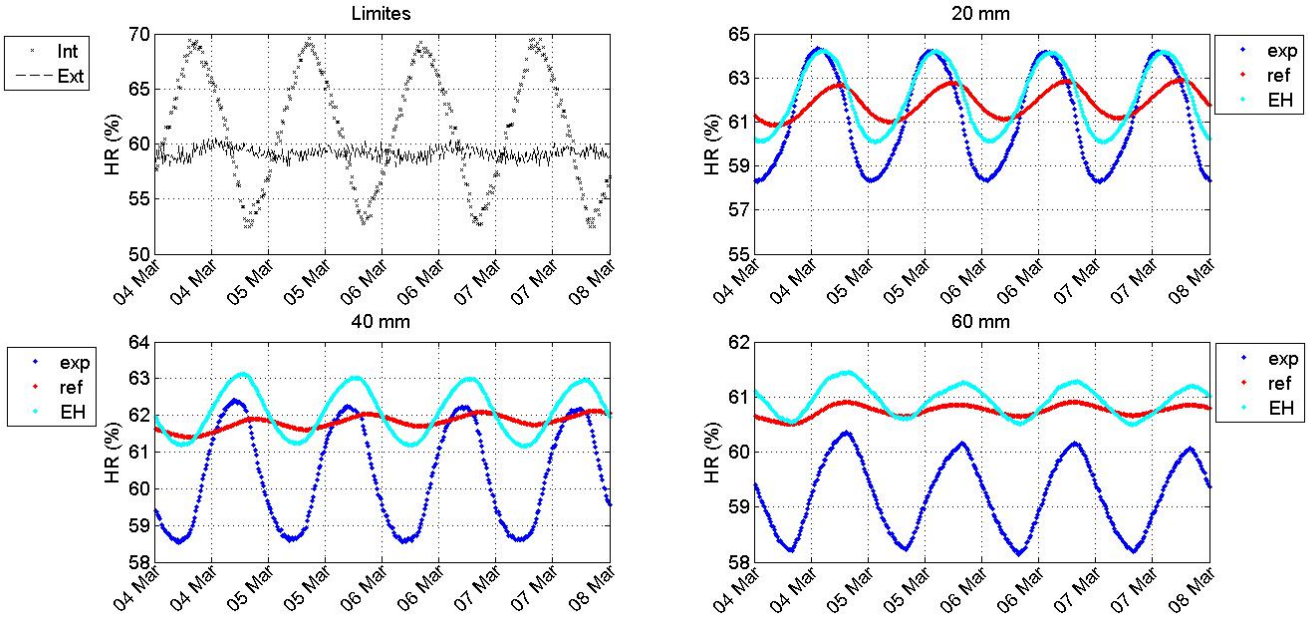


FIGURE 4.25 – Simulations de validation : humidités relatives avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH", séquence "périodique"

Les températures quant à elles se rapprochent plus des températures expérimentales (Figure 4.26). Le léger déphasage observé lors de la validation du modèle est complètement effacé, même si à 20 et 40 mm les valeurs minimales et maximales montrent des écarts de 0,1 à 0,3°C.

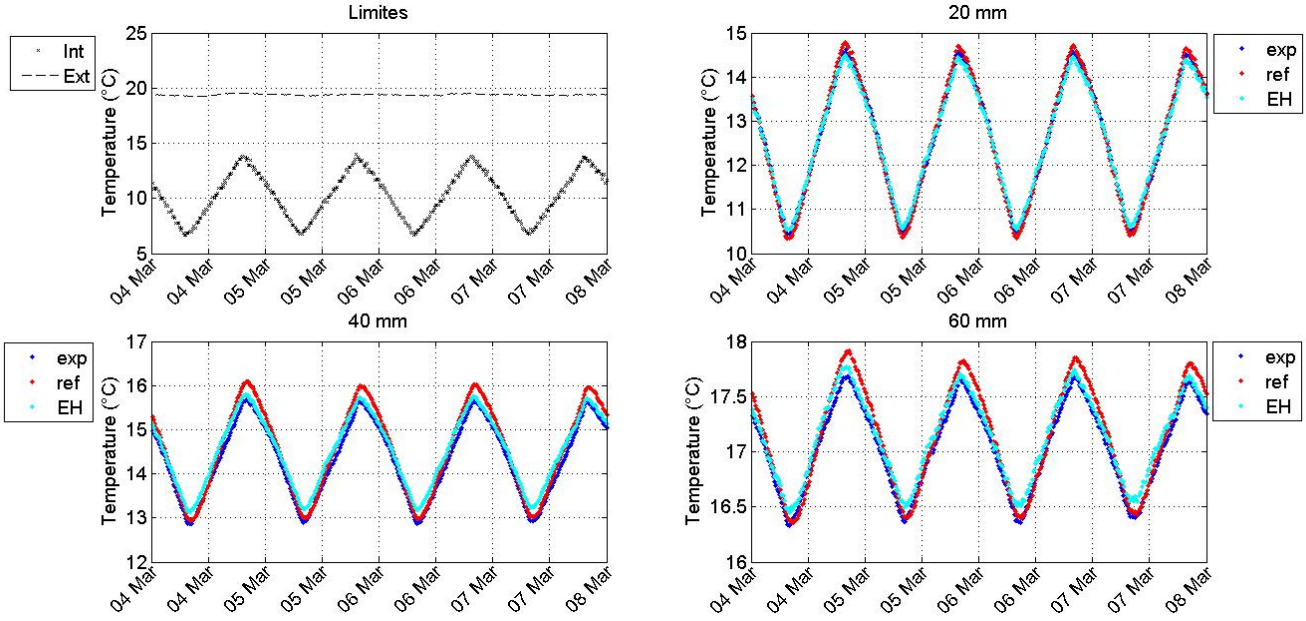


FIGURE 4.26 – Simulations de validation : températures avec propriétés de base "ref" et modifiées "EH", séquence "périodique"

4.5 Conclusion

Des simulations numériques sont effectuées avec le modèle décrit et validé dans le chapitre 3. Ces simulations sont effectuées sur les séquences expérimentales étudiées au chapitre 2. Ainsi les résultats expérimentaux déjà étudiés sont comparés aux résultats numériques.

La comparaison effectuée sur la première séquence (Printemps) met en évidence un retard de la réponse du modèle numérique à la sollicitation hygrique intérieure par rapport aux données expérimentales. Elle met aussi en évidence une mauvaise reproduction des variations journalières en humidité relative.

Pour tenter de corriger ces écarts, une modification artificielle des principales propriétés du matériau fibre de bois influant sur les transferts de masse a été effectuée. Ces propriétés là sont la perméabilité à la vapeur et l'isotherme de sorption ; la première a été doublée et la pente de la seconde a été réduite. Cette modification a permis d'améliorer la réponse du modèle numérique aux sollicitations hygriques, même si les amplitudes journalières sont restées différentes des valeurs expérimentales.

Cette étude comparant les résultats expérimentaux aux résultats numériques de simulations avec propriétés de matériaux de base et modifiées a ainsi été étendue aux saisons suivantes. Elle a permis de confirmer les tendances observées dans la première séquence (Printemps). Ainsi lors des séquences estivales avec une très forte variation journalière des humidités relatives, le déphasage temporel entre les courbes d'humidité relatives expérimentale et de première simulation est réduit avec la modification des propriétés des matériaux. Quant à la séquence hivernale, elle révèle une réduction de l'écart entre les moyennes et les valeurs minimales des humidités relatives simulées et expérimentales. La difficulté à reproduire les bonnes amplitudes journalières persiste, en humidité relative où selon les cas les différences aux valeurs maximales et/ou minimales vont jusqu'à 3%, et dans une moindre mesure en température où les différences de valeurs vont jusqu'à 3°C aux valeurs extrêmes. Il est aussi à noter, que lors de la séquence

hivernale, la composition de la paroi a été modifiée.

Un retour a été effectué sur la simulation de validation du modèle numérique effectué auparavant dans le chapitre 2, avec des conditions expérimentales contrôlées. Ce retour a permis les mêmes observations que celles de l'étude sur le dispositif en conditions climatiques réelles.

Un travail complémentaire, effectué par (Rouchier et al., 2015) consolide l'hypothèse de la modification des propriétés de la fibre de bois modifiées utilisées en "EH" pour l'obtention de meilleurs résultats. En effet dans cette étude, une méthode inverse a été utilisée sur la séquence expérimentale nommée "Printemps" dans ce chapitre, afin de revenir aux propriétés des matériaux. Les résultats obtenus pour la perméabilité à la vapeur et la pente de l'isotherme de sorption optimales sont du même ordre de grandeur que ceux utilisés ici lors de la modification des propriétés des matériaux (EH).

Les modifications nécessaires à l'obtention de meilleurs résultats induisent une perméabilité à la vapeur plus importante et une inertie hygrique moins importante dans la réalité en comparaison au modèle numérique. Le cas de l'inertie hygrique peut être interprété par une transition au niveau de l'hystérésis de l'isotherme de sorption de la fibre de bois. L'augmentation de la perméabilité à la vapeur du matériau par rapport à celle mesurée en laboratoire remet par contre en cause l'interprétation et la manière dont cette perméabilité est implémentée dans les modèles numériques. En effet (Duforestel, 2015) estime que l'essai à la coupelle, qui est un essai normalisé (NF EN ISO 12572 d'Octobre 2001) et qui a permis d'obtenir les valeurs utilisées ici sous estime probablement la perméabilité à la vapeur réelle des échantillons, dans le cas de matériaux peu denses et très perméables à l'air comme la fibre de bois. Une implémentation meilleure dans les modèles numériques de cette perméabilité à la vapeur, en tenant compte des conditions de mesure de cette propriété et de leurs conséquences, permettrait d'améliorer significativement les résultats numériques et les rendre plus conformes à la réalité.

Conclusion générale et perspectives

Dans le cadre de ce travail, au cœur de la tâche 3 du projet HYGROBAT, deux parois à ossature bois ont été montées et testées sur des cellules orientables, fortement isolées et à l'ambiance intérieure régulée. Les deux parois, de conception identique au départ (ossature en épicéa + 16 cm d'isolant en fibre de bois + enduit minéral extérieur), ont été testés initialement dans les mêmes conditions (ambiance intérieure, orientation) avant d'être soumises successivement à des orientations opposées (Nord contre Sud) et ambiances intérieures différentes. La série de tests, qui a duré une année, s'est achevée avec la modification d'une des deux parois testées par l'ajout d'un parement intérieur (OSB).

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence plusieurs phénomènes. L'un des principaux est l'impact des modifications de l'humidité relative intérieure sur le comportement de l'isolant. Celui-ci étant hygroscopique, la vapeur d'eau s'adsorbe ou se désorbe en son sein, entrainant une modification des propriétés thermiques (conductivité thermique dépendant de la teneur en eau) et une variation de température, conséquence de la chaleur de sorption libérée ou absorbée. Ce phénomène est d'autant plus visible que l'échelon en pression de vapeur est important. Un phénomène similaire devrait se produire lors des mêmes opérations avec le parement intérieur, il est cependant très atténué du fait que le matériau (OSB) a une inertie thermique et hygrique plus importante du fait de sa densité. Ainsi est mis en évidence l'impact des fluctuations en humidité sur les températures au sein des parois étudiées.

Un autre phénomène assez important observé lors des tests met en évidence l'impact des fluctuations de températures sur l'humidité dans les parois. Les séquences estivales montrent en effet des fluctuations importantes en humidité relative suite aux fortes sollicitations thermiques du climat extérieur. L'isolant en fibre de bois désorbe donc de l'humidité lorsque les températures deviennent importantes.

Parallèlement aux études expérimentales, un modèle numérique a été développé pour simuler en une dimension les effets observés expérimentalement. Le modèle développé a été codé sous le logiciel DYMOLA, qui présente l'avantage d'une programmation orientée objet et de bibliothèques d'éléments existants, comme avec (Wetter, 2009b). En outre, le modèle pourra être aisément utilisé ultérieurement et intégré dans un modèle de bâtiment. Le modèle a été validé par comparaison avec les résultats d'autres modèles déjà éprouvés, sur une séquence expérimentale en conditions contrôlées.

La confrontation des résultats numériques et expérimentaux a mis en évidence des divergences, principalement au niveau des humidités relatives. Les divergences montrent un retard du modèle sur les réponses aux sollicitations hygriques intérieures d'une part, et d'autre part la différence d'amplitude journalière des fluctuations en humidité relative ainsi qu'un déphasage de quelques heures lorsque des fluctuations importantes entrent en jeu.

Une tentative d'ajustement des principales propriétés qui entrent en jeu dans les transferts

de masse (la perméabilité de la vapeur et la pente de l'isotherme de sorption) a mis en évidence une probable sous estimation de la perméabilité de la vapeur du matériau fibre de bois, et une surestimation de son inertie hygrique. La tentative d'ajustement a permis d'obtenir de meilleures réponses comparativement aux résultats expérimentaux, même si les amplitudes journalières d'humidité relative ont toujours du mal à être reproduites de manière précise. Les valeurs ajustées correspondent à celles obtenues lors de l'étude de (Rouchier et al., 2015) par une méthode inverse sur la même séquence expérimentale, et l'hypothèse d'une sous estimation de la perméabilité à la vapeur pour les matériaux tels que la fibre de bois, qui est à la base de l'ajustement, a été discutée dans (Duforestel, 2015).

Les conclusions de la confrontation entre résultats expérimentaux et numériques amènent ainsi à de nouvelles questions. La principale est la manière dont est prise en compte les valeurs de perméabilité à la vapeur dans les modèles numériques, surtout dans le cas de matériaux très perméables et hygroscopiques comme la fibre de bois. L'estimation du flux de vapeur, fonction de la perméabilité à la vapeur et du gradient de pression de vapeur, devra être abordée différemment, en prenant mieux compte les hypothèses et les conditions de mesure de cette propriété. Aussi du point de vue de l'inertie hygrique du matériau, les difficultés à obtenir des amplitudes journalières en humidité relative proches des valeurs expérimentales montrent il est nécessaire d'affiner l'estimation de l'hystérésis de l'isotherme de sorption. Aussi se posera la question de la validité de l'hypothèse de l'équilibre à chaque instant, puisque l'isotherme de sorption est construite à partir de tests où chaque point est pris à l'équilibre, des conditions qui ne correspondent pas véritablement aux conditions expérimentales. Une meilleure connaissance de la limite temporelle à partir de laquelle les mesures de l'isotherme de sorption sont valides pour une simulation est nécessaire, les modèles numériques ayant beaucoup de mal à reproduire les conditions où les fluctuations en humidité relative sont rapides et importantes. Enfin, la prise en compte d'éléments comme la pluie à l'extérieur comme dans (Janssen et al., 2007) permettra une utilisation du modèle pour une combinaison dans le but de simuler une enveloppe entière de bâtiment. Ceci constitue l'étape suivante des études effectuées dans le cadre du projet HYGROBAT, l'objectif initial étant de connaitre l'impact sur le bâtiment de la performance des parois dont a fait l'objet cette étude.

Bibliographie

Kamilia Abahri, Rafik Belarbi, and Abdelkrim Trabelsi. Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials. *Building and Environment*, 46(7) :1354–1360, 2011. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2010.12.020. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.020.

M Abuku, Bert Blocken, and Staf Roels. Field measurement and numerical analysis of wind-driven rain absorption and evaporation on building facades. *Building*, 32(July), 2009.

Bert Blocken and Jan Carmeliet. High-resolution wind-driven rain measurements on a low-rise building - Experimental data for model development and model validation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(12) :905–928, 2005. ISSN 01676105. doi : 10.1016/j.jweia.2005.09.004.

Roy Brewer. *Fabric and mineral analysis of soils*. 1964. URL https://books.google.fr/books?id=2i9OAQAAIAAJ.

Adrien Brun. Rose des vents – site d ' INES : Analyse de la provenance/vitesse vent pour l'année 2011. 2012.

Rémi Capelle. ETUDE EXPERIMENTALE DES TRANSFERTS HYDRIQUES DANS LES BATIMENTS. Technical report, 2012.

Jan Carmeliet and Dominique Derome. Temperature driven inward vapor diffusion under constant and cyclic loading in small-scale wall assemblies : Part 1 experimental investigation. *Building and Environment*, 47(1) :161–169, 2012. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2011.07.028. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.015.

Tadiwos Zerihun Desta, Jelle Langmans, and Staf Roels. Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes. *Building and Environment*, 46(5) :1038–1046, 2011. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2010.11.002. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.11.002.

Thierry Duforestel. *Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherches sur l'efficacité énergétique des bâtiments*. Mémoire pour hdr, Université Claude Bernard Lyon 1, 2015.

P.O. Fanger. Assessment of thermal comfort practice. *British journal of Industrial Medicine*, 30 :313–324, 1973. ISSN 13510711. doi : 10.1136/oem.30.4.313.

P.O. Fanger, B.M. Ipsen, G. Langkilde, B.W. Olessen, N.K. Christensen, and S. Tanabe. Comfort limits for asymmetric thermal radiation. *Energy and Buildings*, 8(3) :225–236, 1985. ISSN 03787788. doi : 10.1016/0378-7788(85)90006-4.

P.O. Fanger, a.K. Melikov, H. Hanzawa, and J. Ring. Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*, 12(1) :21–39, 1988. ISSN 03787788. doi : 10.1016/0378-7788(88) 90053-9.

Paul Fazio, Andreas K. Athienitis, Cedric Marsh, and Jiwu Rao. Environmental Chamber for Investigation of Building Envelope Performance, 1997. ISSN 1076-0431.

Hua Ge, Xiangjin Yang, Paul Fazio, and Jiwu Rao. Influence of moisture load profiles on moisture buffering potential and moisture residuals of three groups of hygroscopic materials. *Building and Environment*, 81 :162–171, 2014. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2014. 06.021. URL http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132314002133.

Stig Geving and Sivert Uvslø kk. *Moisture conditions in timber frame roof and wall structures : Test house measurements for verifi cation of heat-, air and moisture transfer models*. 2000. ISBN 8253607008.

Hugo Hens. *Building Physics – Heat, Air and Moisture : Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Wiley, 2007. ISBN 9783433018415. URL https://books.google.fr/books?id=6tWfiNJVEOcC.

Hugo Hens, Arnold Janssens, and Rongjin Zheng. Zinc roofs : An evaluation based on test house measurements. *Building and Environment*, 38(6) :795–806, 2003. ISSN 03601323. doi : 10.1016/S0360-1323(02)00236-6.

Andreas H. Holm and Kristin Lengsfeld. Moisture-Buffering Effect — Experimental Investigations and Validation. *Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference*, 2007.

International Union of Pure and Applied Chemistry. Recommendations for the characterization of porous solids. *Pure and Applied Chemistry*, 66(8) :1739–1758, 1994.

Hans Janssen, Bert Blocken, and Jan Carmeliet. Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(5-6) :1128–1140, 2007. ISSN 00179310. doi : 10.1016/j. ijheatmasstransfer.2006.06.048.

S.{\O}. Jensen, Commission of the European Communities. Directorate-General for Science Research, and Development. The PASSYS Project Phase 1 : Subgroup Model Validation and Development : Final Report 1986-1989, 1989. URL https://books.google.fr/books?id=dPeiGwAACAAJ.

Angela Sasic Kalagasidis. *HAM-Tools An Integrated Simulation Tool for Heat , Air and Moisture Transfer Analyses in Building Physics*. Phd thesis, Chalmers University of Technology, 2004.

Targo Kalamees and Juha Vinha. Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures. *Building and Environment*, 38(5) :689–697, 2003. ISSN 03601323. doi : 10.1016/S0360-1323(02)00207-X.

B. Kari, Bernard Perrin, and J. C. Foures. Modélisation du comportement hygrothermique des parois multicouches : prévision des risques de condensation dans les parois à isolation intérieure et extérieure. *Materials and Structures*, 25(9) :558–565, 1992. ISSN 00255432. doi : 10.1007/BF02472452.

Yannick-Ariel Kedowide, Monika Woloszyn, and Nolwenn Le Pierrès. Synthèse sur les dispositifs expérimentaux d'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les parois des bâtiments. In *Colloque International Francophone d'Energie et de Mécanique*, pages 180–185, 2012.

Yannick-Ariel Kedowide, Amandine Piot, Monika Woloszyn, Nolwenn Le Pierrès, and Timea Bejat. Experimental investigations of highly hygroscopic and vapour permeable walls exposed to real climate. In *10th Nordic Symposium on Building Physics. 15-19 June 2014*, pages 191–198, Lund, Sweden, 2014.

M. Kilpelainen, I. Luukkonen, Juha Vinha, and P. Kakela. Heat and moisture distribution at the connection of floor and external wall in multi-storey timber frame houses. *World Conference on Timber Engineering Whistler Resort, British Columbia, Canada July 31 - August 3*, 2000.

Matthieu Labat. *Chaleur – Humidité – Air dans les maisons à ossature bois Expérimentation et modélisation*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, 2012.

Matthieu Labat, Monika Woloszyn, Géraldine Garnier, and Jean-Jacques Roux. Dynamic coupling between vapour and heat transfer in wall assemblies : Analysis of measurements achieved under real climate. *Building and Environment*, 87 :129–141, 2015. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2015.01.022. URL http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132315000335.

Jelle Langmans. *Feasibility of exterior air barriers in light weight construction*. PhD thesis, KU Leuven, 2013. URL http://bwk.kuleuven.be/bwf/PhDs/phdLangmans.

Kristin Lengsfeld, Andreas H. Holm, and Martin Krus. Moisture-Buffering Effect — Experimental Investigations and Validation. *Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference*, 49(Figure 1) :1–8, 2007.

Qinru Li, Jiwu Rao, and Paul Fazio. Development of HAM tool for building envelope analysis. *Building and Environment*, 44(5) :1065–1073, 2009. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2008.07.017. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.017.

Yang Li, Paul Fazio, and Jiwu Rao. An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room. *Building and Environment*, 47(1) :205–216, 2012. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2011.07.021. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.021.

Jen Y. Liu and Cheng Shun. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(7) :1747–1754, 1991. ISSN 00179310. doi : 10.1016/0017-9310(91)90150-D.

Wahid Maref, D. G. Booth, Michael A. Lacasse, and M. Nicholls. Drying Experiment of Wood-Frame Wall Assemblies Performed in the Climatic Chamber EEEF : Specification of Equipment Used in EEEF-Environmental Exposure Envelope Facility. Technical Report October, Institute for Research in Construction, 2002.

Wahid Maref, Michael A. Lacasse, and D. G. Booth. Large-scale laboratory measurements and benchmarking of an advanced hygrothermal model. In *CIB 2004 Conference, Toronto, Ontario*, pages 1–10, 2004.

Wahid Maref, M. Manning, Michael A. Lacasse, Mavinkal Kumar Kumaran, S M Cornick, and Michael C. Swinton. Laboratory Demonstration of Solar Driven Inward Vapour Diffusion in A Wall Assembly. In *11th Canadian Conference on Building Science and Technology Banff, Alberta*, number 613, Banff, Alberta, 2007.

Wahid Maref, M Armstrong, M. Rousseau, and W. Lei. A field monitoring investigation of the effect of adding different exterior thermal insulation materials on the hygrothermal response of wood-frame walls in a cold climate. *BEST conference*, pages 1–15, 2010.

Nathan Mendes, Ricardo C L F De Oliveira, and Gerson H Santos. Domus 1.0 : a Brazilian Pc Program for Building Simulation. In *7th International IBPSA Conference*, number 1, pages 83–90, Rio de Janeiro, 2001.

Salah-Eddine Ouldboukhitine, Rafik Belarbi, Issa Jaffal, and Abdelkrim Trabelsi. Assessment of green roof thermal behavior : A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment*, 46(12) :2624–2631, 2011. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2011.06.021.

Patrick Perré and Ian W. Turner. A 3-D version of TransPore : A comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(24) :4501–4521, 1999. ISSN 00179310. doi : 10.1016/S0017-9310(99)00098-8.

Amandine Piot. *Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, 2009.

Menghao Qin, Rafik Belarbi, Abdelkarim Aït-Mokhtar, and Alain Seigneurin. An analytical method to calculate the coupled heat and moisture transfer in building materials. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33(1) :39–48, 2006. ISSN 07351933. doi : 10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.08.001.

Menghao Qin, Rafik Belarbi, Abdelkarim Ait-Mokhtar, and Lars-Olof Nilsson. Nonisothermal moisture transport in hygroscopic building materials : Modeling for the determination of moisture transport coefficients. *Transport in Porous Media*, 72(2) :255–271, 2008. ISSN 01693913. doi : 10.1007/s11242-007-9148-x.

Helisoa Rafidiarison. *Etudes expérimentales des transferts de masse et de chaleur dans les parois des constructions en bois, en vue de leur modélisation. Applications aux économies d'énergie et au confort dans l'habitat*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois, 2012. URL http://www.theses.fr/2012LORR0077/document.

Helisoa Rafidiarison, Romain Rémond, and Eric Mougel. Dataset for validating 1-D heat and mass transfer models within building walls with hygroscopic materials. *Building and Environment*, 89 :356–368, 2015. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2015.03.008. URL http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132315001158.

Romain Rémond and Patrick Perré. Modélisation du Comportement Thermique d ' une Maison Bois à l ' Aide de Micromodèles Chaleur-Masse Distribués. In *Conférence IBPSA France 2008*, volume 1093, 2008.

Carsten Rode and Monika Woloszyn. Whole-Building Hygrothermal Modeling in IEA Annex 41. Technical report, ASHRAE, 2007.

D. A. Rose. Water movement in porous materials : Part 1 - Isothermal vapour transfer. *British Journal of Applied Physics*, 14(5) :256–262, 1963. ISSN 0508-3443. doi : 10.1088/0508-3443/14/5/308.

Simon Rouchier. *Hygrothermal Performance Assessment of Damaged Building Materials*. PhD thesis, Université Claude Bernard Lyon 1, 2012.

Simon Rouchier, Monika Woloszyn, Yannick Kedowidé, and Timea Béjat. Identification of the hygrothermal properties of a building envelope material by the covariance matrix adaptation evolution strategy. *Journal of Building Performance Simulation*, (April 2015) :1–14, 2015. ISSN 1940-1493. doi : 10.1080/19401493.2014.996608. URL http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19401493.2014.996608.

Dirk Saelens and Hugo Hens. Experimental Evaluation of Airflow in Naturally Ventilated Active Envelopes. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 25(2) :101–127, 2001. ISSN 10971963. doi : 10.1106/CU0X-XL16-6QTA-29QC.

Dirk Saelens, Staf Roels, and Hugo Hens. The inlet temperature as a boundary condition for multiple-skin facade modelling. *Energy and Buildings*, 36(8) :825–835, 2004. ISSN 03787788. doi : 10.1016/j.enbuild.2004.01.005.

Carey J. Simonson. Moisture, thermal and ventilation performance of Tapanila ecological house. *VTT Tiedotteita - Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus*, (2069), 2000. ISSN 12350605.

P. T. Tsilingiris. Modeling heat and mass transport phenomena at higher temperatures in solar distillation systems - The Chilton-Colburn analogy. *Solar Energy*, 84(2) :308–317, 2010. ISSN 0038092X. doi : 10.1016/j.solener.2009.11.012. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2009.11.012.

Evy Vereecken, Staf Roels, and Hans Janssen. In situ determination of the moisture buffer potential of room enclosures. *Journal of Building Physics*, 34(3) :223–246, 2010. ISSN 1744-2591. doi : 10.1177/1744259109358268.

Juha Vinha. *Hygrothermal performance of timber-framed external walls in Finnish climatic conditions : A method of determing a sufficient water vapour resistance of the internal lining of a wall assembly*. PhD thesis, Tampere University of Technology, 2007.

Oly Vololonirina, Marie Coutand, and Bernard Perrin. Characterization of hygrothermal properties of wood-based products – Impact of moisture content and temperature. *Construction and Building Materials*, 63 :223–233, 2014. ISSN 09500618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.014. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814003316.

Michael Wetter. A Modelica-Based Model Library for Building Energy and Control Systems. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, pages 652–659, 2009a.

Michael Wetter. Modelica Library for Building Heating, Ventilation and Air-Conditioning Systems. *Proceedings 7th Modelica Conference*, pages 393–402, 2009b. doi : 10.3384/ecp09430042. URL http://www.ep.liu.se/ecp_article/index.en.aspx?issue=043;article=44.

Monika Woloszyn. *MODELISATION HYGRO-THERMO-AERAULIQUE DES BATIMENTS MULTIZONES PROPOSITION D'UNE STRATEGIE DE RESOLUTION DU SYSTEME COUPLE*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, 1999.

Monika Woloszyn and Carsten Rode. IEA Annex 41 , MOIST-ENG Subtask 1 – Modelling Principles and Common Exercises. Technical report, 2007.

Monika Woloszyn, Nolwenn Le Pierrès, Yannick Kedowidé, Joseph Virgone, Abdelkrim Trabelsi, Zakaria Slimani, Eric Mougel, Romain Rémond, Helisoa Rafidiarison, Patrick Perré, Floran Pierre, and Claude Pompéo. Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants : démarche du projet HYGRO-BAT. In *Conférence IBPSA France 2014*, number i, pages 1–8, Arras, 2014.

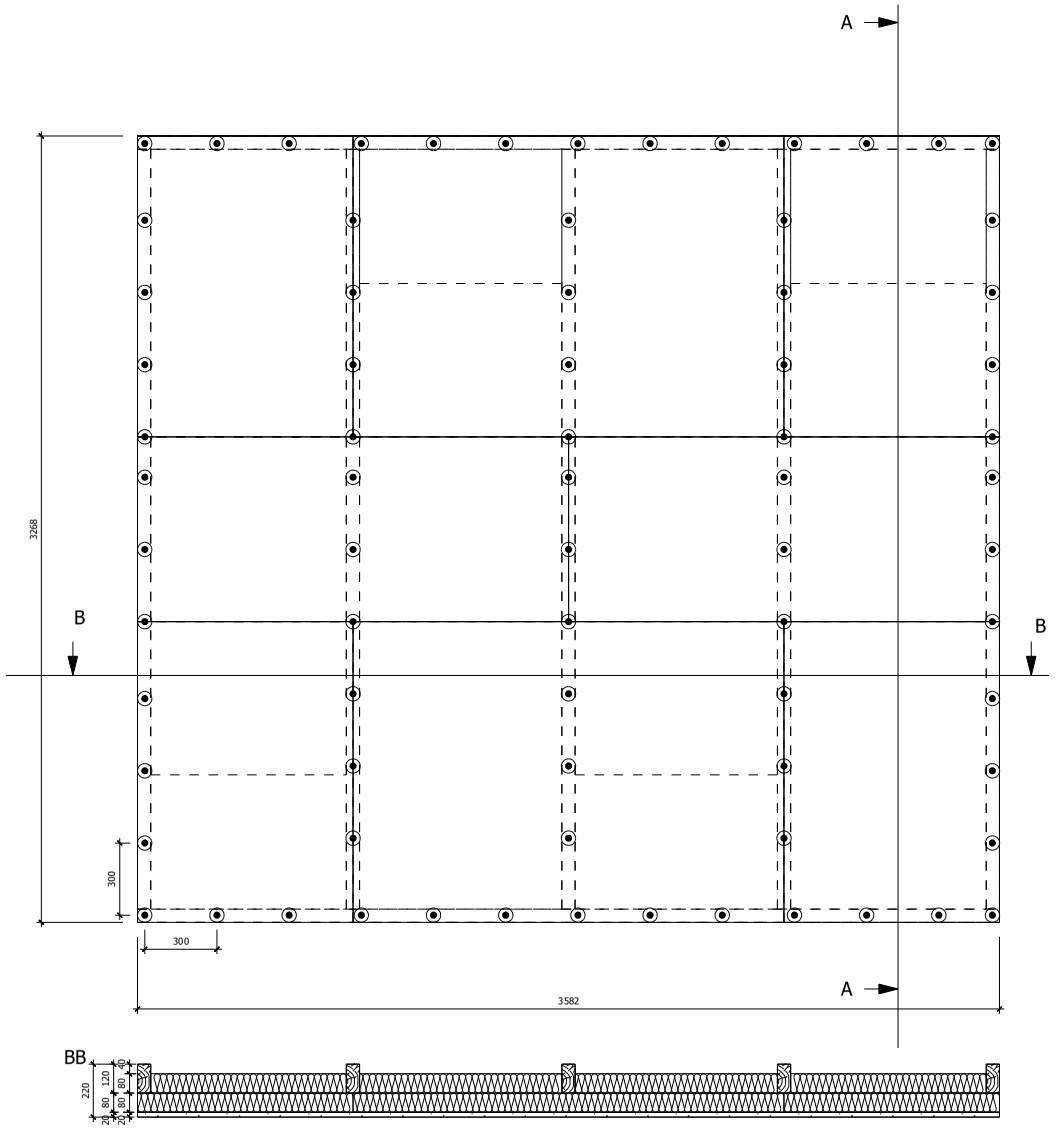
Xiangjin Yang, Sergio Vera, Jiwu Rao, Hua Ge, and Paul Fazio. Full-scale experimental investigation of moisture buffering effect and indoor moisture distribution. In *Building X Conference*, pages 1–8, 2007. URL http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/SessionPDFs/83_New.pdf.

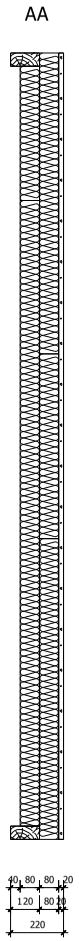
Xiangjin Yang, Paul Fazio, Hua Ge, and Jiwu Rao. Evaluation of moisture buffering capacity of interior surface materials and furniture in a full-scale experimental investigation. *Building and Environment*, 47(1) :188–196, 2012. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2011.07.025. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.025.

H. Yoshino, T. Mitamura, and K. Hasegawa. Moisture buffering and effect of ventilation rate and volume rate of hygrothermal materials in a single room under steady state exterior conditions. *Building and Environment*, 44(7) :1418–1425, 2009. ISSN 03601323. doi : 10.1016/j.buildenv.2008.09.007. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.007.

Annexe A

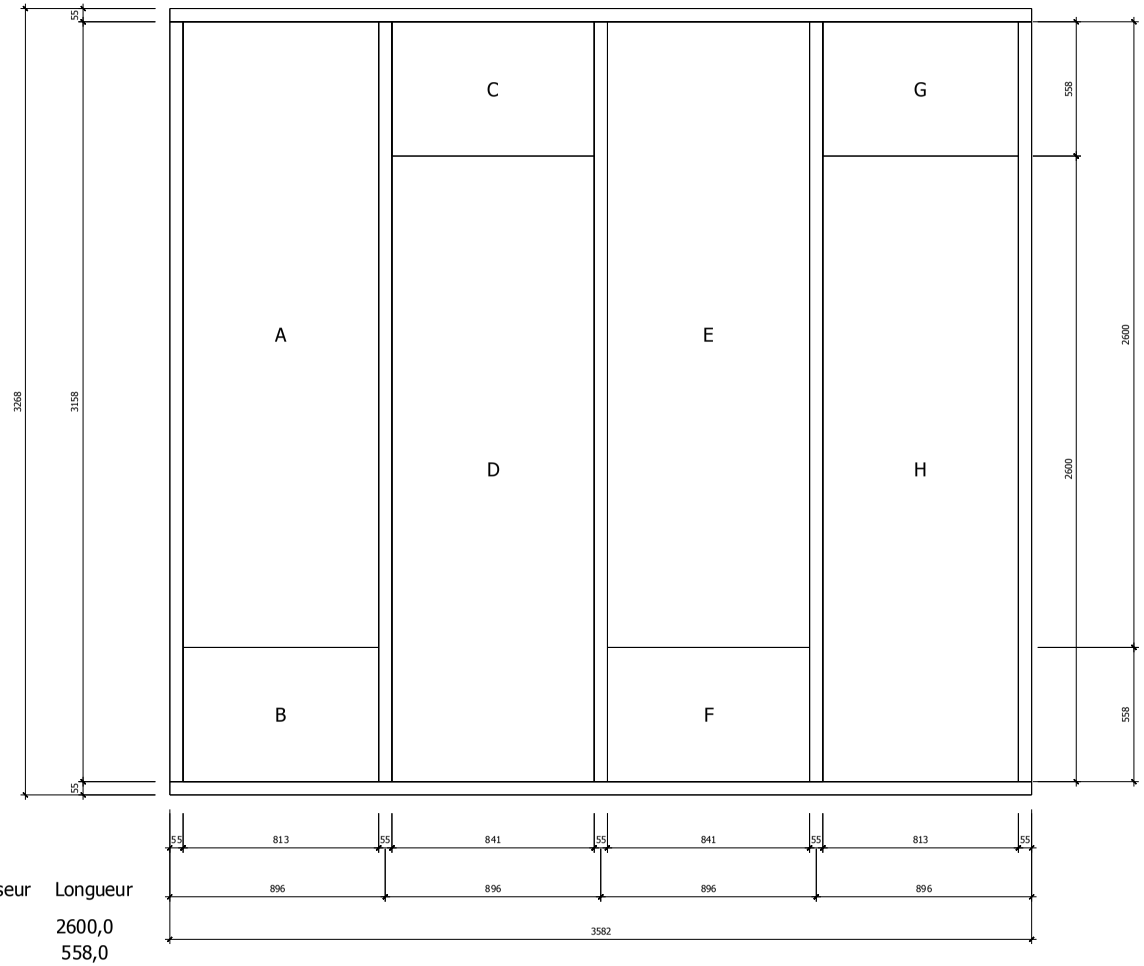
Plans de la paroi





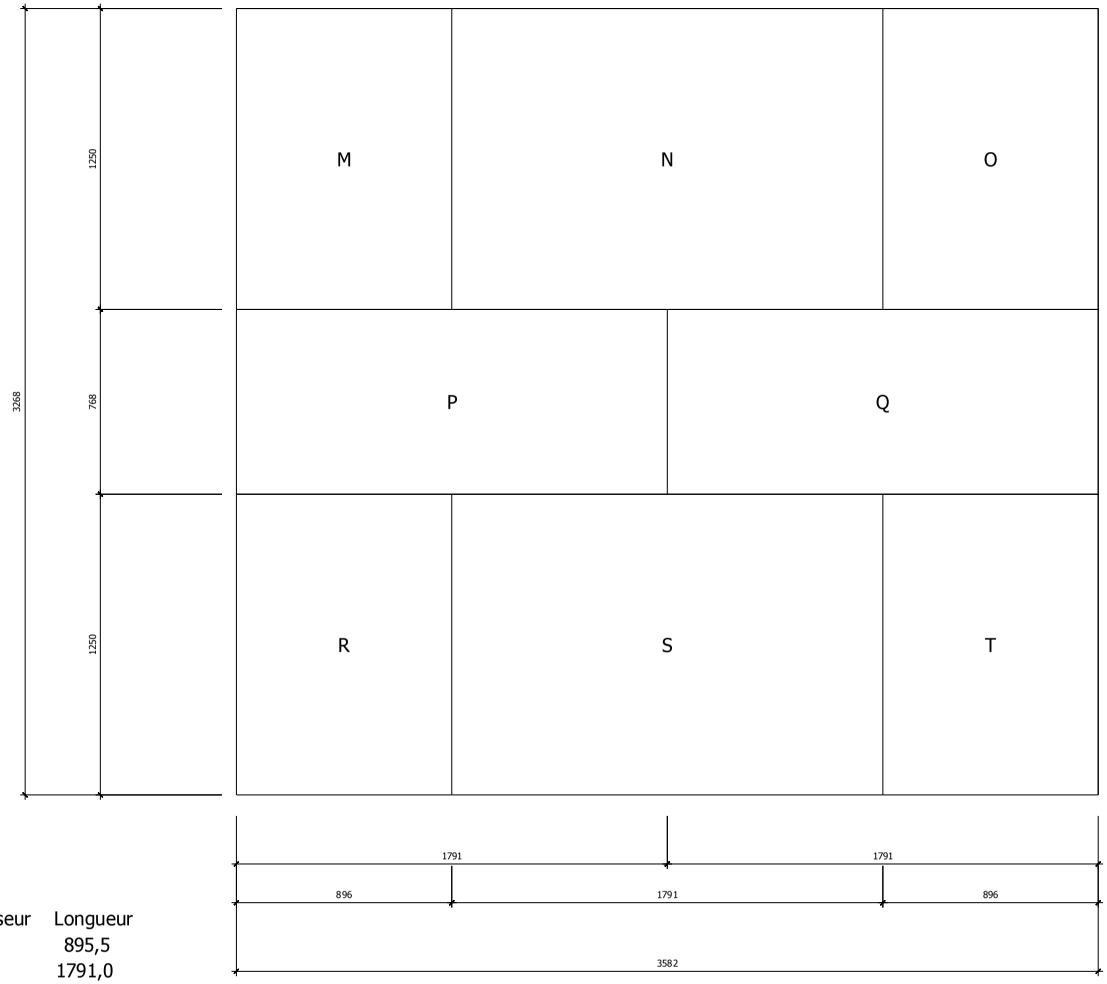
⦿ Fixation type GUTEX Thermowall Holzschrauben D=6mm L=120 mm Rondelle plastique D=60mm (entraxe 300 mm)

Intitulé : **Structure + isolant**		Phase : **Atelier**
Projet : 2011_213		Cadre n°: **1**
Crittbois RESSOURCES & TRANSFERTS TECHNOLOGIQUES	Dessinateur : TT	Indice : **3**
	Date : 22/10/2012	Echelle : **1:20**



Nom	Largeur	Epaisseur	Longueur
A	813,0	80,0	2600,0
B	813,0	80,0	558,0
C	840,5	80,0	558,0
D	840,5	80,0	2600,0
E	840,5	80,0	2600,0
F	840,5	80,0	558,0
G	813,0	80,0	558,0
H	813,0	80,0	2600,0

Intitulé : **Structure + isolant**		Phase : **Atelier**
Projet : 2011_213		Cadre n°: **2**
Crittbois RESSOURCES & TRANSFERTS TECHNOLOGIQUES	Dessinateur : TT	Indice : **3**
	Date : 22/10/2012	Echelle : **1:20**



Nom	Largeur	Epaisseur	Longueur
M	1250,0	80,0	895,5
N	1250,0	80,0	1791,0
O	1250,0	80,0	895,5
P	768,0	80,0	1791,0
Q	768,0	80,0	1791,0
R	1250,0	80,0	895,5
S	1250,0	80,0	1791,0
T	1250,0	80,0	895,5

Intitulé : **Isolant support crépi**		Phase : **Atelier**
Projet : 2011_213		Cadre n°: **3**
Crittbois RESSOURCES & TRANSFERTS TECHNOLOGIQUES	Dessinateur : TT	Indice : **3**
	Date : 22/10/2012	Echelle : **1:20**

Annexe B

Composition de l'enduit - Conseils pour mise en œuvre (Source : Document fabricant)

N° étape	Désignation	Préparation	Consommation	Détails de la pose	Remarque
1	Barbotine d'accrochage	Mélanger du StoLevell Uni avec suffisamment d'eau pour obtenir un mélange fluide	Selon quantité StoLevell Uni	Après malaxage, mettre le produit au repose 1 à 2 mn puis appliquer sur l'isolant. Etaler une couche la plus fine possible	Ne pas attendre pour appliquer la 1ère couche de Levell Uni
2	1ère couche StoLevell Uni	6,3 l d'eau pour 25 kg de poudre	4 kg/m²	Utiliser une taloche crantée de 6 mm : a- Poser la couche avec la face lisse de la taloche b- Cranter en incliant la taloche (pas de sens de crantage)	Attendre 48 heures avant la pose de la 2ème couche de StoLevell Uni
3	2ème couche StoLevell Uni + maroufiage fibre de verre	6,3 l d'eau pour 25 kg de poudre	4 kg/m²	1. Préparer la surface en ponçant avec la lisseuse pour égrainer la surface afin qu'elle soit plus facile à travailler 2. Appliquer la 2ème couche de StoLevell Uni en rajoutant 1 mm d'épaisseur d'enduit par-dessus les crans 3. Maroufler le treillis en le faisant pénétrer dans la couche avec la taloche. S'il n'y a pas suffisamment d'enduit pour le recouvrir, en rajouter un peu pour que le treillis soit enrobé totalement	Attendre 48 heures avant d'appliquer le StoPrep Miral
4	StoPrep Miral	Sans ajout d'eau. Bien malaxer avant utilisation	0,3 kg/m²	Etaler la préparation comme une peinture, couche très fine	Attendre 24 heures avant pose StoMiral MP
5	1ère couche StoMiral MP	7,1 l d'eau pour 25 kg de poudre	1,5 kg/m² car le support absorbe un peu de produit	Appliquer une couche de 1 mm d'épaisseur, attendre 1 heure puis lisser avec une taloche à feutrer	Attendre 24 heures avant pose StoMiral MP
6	2ème couche StoMiral MP	7,1 l d'eau pour 25 kg de poudre	0,8 kg/m²	Appliquer une couche fine en respectant la consommation de 0,8 kg/m²	

Annexe C

Étalonnage des thermocouples

METHODE D'ETALONNAGE DES THERMOCOUPLES UTILISES DANS LES FAÇADES TESTEES POUR HYGROBAT SUR LES CELLULES PASSYS

L'étalonnage des thermocouples consiste à relever les valeurs de température et à les comparer à une référence afin de les corriger. Il doit être fait pour chaque thermocouple, parce qu'ils sont tous différents (soudure, longueur du câble).

Nombre de thermocouples étalonnés : 90, soit 3 faisceaux de 15 thermocouples par cellule.

Mesure :
L'étalonnage a été fait avec un bain thermostaté. Le bain a été réglé à un certain nombre de températures d'équilibre et les thermocouples y ont été plongés, ainsi qu'une sonde Pt100 de référence.
Les mesures ont été faites à 5 paliers de température couvrant la plage d'usage de nos thermocouples : -20°C, 0°C, 20°C, 40°C, 60°C.
A chaque palier, une fois que la température se stabilise (au bout d'une vingtaine de minutes), nous relevons les valeurs affichées par chacun des thermocouples. Chaque balayage (récupération des données des thermocouples pour une température) a été consigné dans un fichier Excel, dans lequel nous avons ajouté à la main les températures de consigne et de Sonde (Pt 100) correspondantes.
Les données relevées pour chaque palier sont donc la température de consigne du bain, la température prise par la sonde Pt 100, et les températures relevées par chacun des thermocouples.

La sonde Pt 100 a elle aussi été préalablement étalonnée, avec une autre mesure de référence plus précise. Les résultats de cet étalonnage sont consignés dans un certificat (Voir fin du document), et sont valables pendant un an.
Calcul :
L'étalonnage de la sonde Pt100 a été effectué récemment (Voir le certificat en bas), et ses résultats (Correction, courbe de régression, dérive) ont étés consignés dans le fichier CTP001+ACQ027_Température.xls.

Pour l'étalonnage des thermocouples on fait des tableaux avec les températures relevées, un tableau par faisceau. En colonne nous avons les références et mesures de chaque thermocouple, et en ligne la température de consigne. Une colonne supplémentaire contient les mesures de références, obtenues par la formule suivante :

Température de référence = Température de la sonde Pt100 + Valeur de la correction + Incertitude type sur la dérive.

La valeur de la correction pour la sonde Pt100 est obtenue à partir de la modélisation de la correction du fichier CTP001+ACQ027_Température.xls.

Ensuite nous calculons la valeur de la correction pour chaque thermocouple et chaque température de référence, en utilisant la formule suivante :

Correction = Température de référence – Température relevée par le thermocouple

Nous traçons alors pour chaque thermocouple un nuage de points avec en abscisse la température relevée par le thermocouple et en ordonnée la valeur de la correction. Nous traçons ensuite une courbe de tendance, et choisissons la meilleure c'est à dire celle avec le coefficient de détermination (R^2) le plus proche de 1. Cette méthode appliquée à chacun de nos 90 thermocouples nous permet d'avoir une formule de correction pour chacun.

Pour effectuer l'étalonnage plus rapidement, une macro a été créée pour sélectionner les plages de données et en sortir les nuages de points et les courbes de tendance avec leurs formules directement. Le type de régression que nous avons utilisé est la régression polynomiale d'ordre 2, elle permettait d'avoir les meilleurs résultats pour le minimum de coefficients possibles. Par contre sur certains thermocouples un polynôme d'ordre 2 ne donnait pas une bonne estimation, nous sommes donc passés à l'ordre 3. Ensuite les équations ont été relevées pour servir pour le post traitement des données.

Généralités

N° du certificat d'étalonnage :	83JG1574
Date étalonnage :	02/08/2012
Température ambiante (°C) :	23 ± 1
Humidité ambiante (%HR) :	Non communiquée
Opérateur :	MANUMESURE

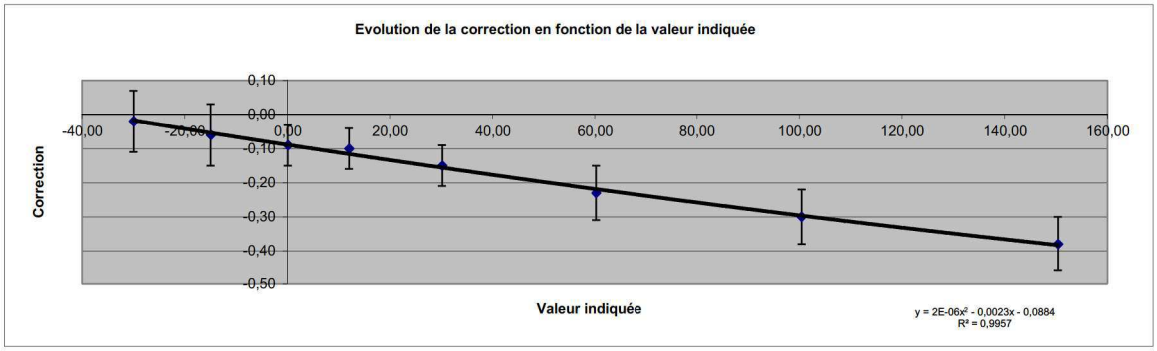
Identification des équipements

	Référence	N° de série	Certificat d'Etalonnage	Date du CE
Chaîne de mesure de référence :	Voir CE	Voir CE	Voir CE	Voir CE
Chaine de mesure à étalonner :	ACQ027 + CTP001	Voir SPLIT	NA	NA
Générateur :	Voir CE	Voir CE	NA	NA

Résultats d'étalonnage

Conditions particulières à l'étalonnage : Voir CE
Sur voie 2 / Immersion capteur 190 mm

Point n°	Chaîne de mesure de référence °C	Chaîne de mesu re à étalonner °C	Correction °C	Incertitude (k=2) °C	Correction modélisée °C
1	-29,98	-29,96	-0,02	± 9,0E-02	-0,02
2	-15,00	-14,94	-0,06	± 9,0E-02	-0,05
3	0,01	0,10	-0,09	± 6,0E-02	-0,09
4	11,96	12,06	-0,10	± 6,0E-02	-0,12
5	30,03	30,18	-0,15	± 6,0E-02	-0,16
6	60,02	60,25	-0,23	± 8,0E-02	-0,22
7	100,17	100,47	-0,30	± 8,0E-02	-0,30
8	150,00	150,38	-0,38	± 8,0E-02	-0,39
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					



Modélisation de la correction	
a	*2,00E-06*
b	*-0,0023*
c	*-0,0884*
Valeur indiquée :	60,75
Valeur de la correction :	-2,21E-01
Incertitude type d'interpolation :	0,016

Annexe D

Propriétés des matériaux : Rapport de comparaison (Source : Rapport final du projet HYGROBAT, à paraitre en Juillet 2015)

0.1 Propriétés des matériaux

0.1.1 Général

Propriété	Valeurs	Unité
Chaleur massique air	1006	J/Kg.K
Chaleur massique eau	4180	J/Kg.K
Chaleur massique vapeur	1870	J/Kg.K
Chaleur latente	2500000	J/Kg

0.1.2 Fibre de Bois

Propriété	Valeurs	Unité	Source
Porosité	[0.9 0.92]	-	Rap. t1 Oct13 (LMDC)
	[0.82 0.92]	-	Rap. t1 Oct13 (I2M)
Masse volumique	146	kg/m^3	Rap. t1 Oct13 (LMDC)
	153	kg/m^3	Rap. t1 Oct13 (LMDC)
	120	kg/m^3	Rap. t1 Oct13 (I2M)
Chaleur massique	11.271*T(°C)+1103.1	J/Kg.K	Rap. t1 Oct13 (LaSie)
Conductivité thermique	(0.034*T(°C)+0.95) *θ_m(%) + 82	mW/m.K	Rap. t1 Oct13 (LMDC)
Perméabilité à la vapeur	2.4e-11 (4% − 50%) 7.9e-11 (86% − 50%)	Kg/m.s.Pa (T=20°C)	Rap. t1 Oct13 (LMDC)
	4.4e-11 (4% − 50%) 6.8e-11 (86% − 50%)	Kg/m.s.Pa (T=23°C)	Rap. t1 Oct13 (LaSie)
	μ = 4.8 (sec) μ = 2.73 (humide)	- (T=23°C)	Rap. t1 Oct13 (LGMP)
Perméabilité à la vapeur de l'air	1.9 * 10e-12 * T$^{0.8}$	Kg/m.s.Pa	Rap. t1 Oct13
Perméabilité à l'air	1.13E-13	Kg/m.s.Pa	Rap. t1 Juin 2014 (LGPM)
Isotherme de sorption	4.4e-5x^3-4.925e-3x^2+0.270191 (Sorption)	$theta_m$(%) =$f[RH(\%)]$	Rap. t1 Oct13
	4.8e-5x^3-5.666e-3x^2+0.314703 (Désorption)	$theta_m$(%) =$f[RH(\%)]$	Rap. t1 Oct13

0.1.3 Enduit

Propriété	Valeurs	Unité	Source
Masse volumique	1600	kg/m^3	Données fabricant
Chaleur massique	1000*(-0.00005T^2 + 0,007T + 0,7045) (T en °C)	J/Kg.K	Rapport t1 Juin 2014
Conductivité thermique	0.83	W/m.K	Données fabricant
Perméabilité à la vapeur	4.12e-11 (Face enduit 93% RH)	Kg/m.s.Pa	Rapport t1 Juin 2014
	4.36e-11 (Face enduit 50% RH)	Kg/m.s.Pa	Rapport t1 Juin 2014
	3.57e-11 (Face enduit 93% RH)	Kg/m.s.Pa	Rapport t1 Juin 2014
	3.7e-11 (Face enduit 93% RH)	Kg/m.s.Pa	Rapport t1 Juin 2014
Emissivité	0.9	-	Mesures CSTB
Absorptivité (1-%R)	1-69.4%	-	Mesures CSTB

Isotherme de sorption (Source : Mesures LaSiE, rapport t1 Juin 2014) :

RH%	wt%
Sorption (courbe du bas)	
6,278	8,83E-02
9,8499	0,1168
18,888	0,1728
25,148	0,1996
31,949	0,2281
39,021	0,2555
51,955	0,31
57,998	0,3381
63,088	0,3661
67,092	0,3949
73,785	0,4521
76,471	0,4814
81,416	0,5711
85,419	0,6927
90,997	0,9378
95,432	1,3689

RH%	wt%
Désorption (courbe du haut)	
89,264	1,1186
84,247	1,0035
79,773	0,9397
73,353	0,8618
67,994	0,8088
64,405	0,776
58,161	0,7314
54,029	0,7048
47,284	0,6694
43,135	0,6483
37,849	0,6206
33,555	0,5962
28,991	0,5679
23,994	0,5444
19,953	0,5249
15,136	0,4984
10,337	0,4657
9,4709	0,4566
8,4607	0,4443
7,559	0,4371
6,639	0,4275
5,6287	0,4123
4,7806	0,4018
3,8245	0,3838