



HAL
open science

Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique

Amandine Piot

► To cite this version:

Amandine Piot. Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique. Sciences de l'ingénieur [physics]. INSA de Lyon, 2009. Français. NNT: . tel-00440510

HAL Id: tel-00440510

<https://theses.hal.science/tel-00440510>

Submitted on 11 Dec 2009

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.

Année 2009

N° d'ordre 2009 - ISAL - 0080

THÈSE

Hygrothermique du bâtiment :
expérimentation sur une maison à ossature bois
en conditions climatiques naturelles
et modélisation numérique

Présentée devant
L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR

Par
AMANDINE PIOT

École doctorale MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE
Spécialité GÉNIE CIVIL

Soutenue en public le 9 novembre 2009

Composition du jury :

Jean Brau	Professeur émérite à l'INSA de Lyon	Directeur de thèse
Monika Woloszyn	Maître de conférences à l'UCB Lyon	Directrice de thèse
Christian Inard	Professeur à l'université de La Rochelle	Rapporteur
Vasco P. de Freitas	Professeur à l'université de Porto	Rapporteur
Daniel Quenard	Chef de division matériaux, CSTB	Examineur
Hartwig M. Künzle	Chef de division hygrothermique, Fraunhofer IBP	Examineur
Samira Kherrouf	Ingénieur ADEME	Membre invité
Stéphane Hameury	Ingénieur études et recherche CSTB	Membre invité

Laboratoire universitaire : CETHIL (Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008)

Thèse préparée au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Grenoble

**INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales - Quadriennal
2007-2010**

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://sakura.cpe.fr/ED206 M. Jean Marc LANCELIN Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université Claude Bernard Lyon 1 Bât CPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 Fax : lancelin@hikari.cpe.fr
E.E.A.	ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://www.insa-lyon.fr/eea M. Alain NICOLAS Insa : D. BARBIER ede2a@insa-lyon.fr Secrétariat : M. LABOUNE AM. 64.43 - Fax : 64.54	M. Alain NICOLAS Ecole Centrale de Lyon Bâtiment H9 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60 97 Fax : 04 78 43 37 17 eea@ec-lyon.fr Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN
E2M2	EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION http://biomserv.univ-lyon1.fr/E2M2 M. Jean-Pierre FLANDROIS Insa : H. CHARLES	M. Jean-Pierre FLANDROIS CNRS UMR 5558 Université Claude Bernard Lyon 1 Bât G. Mendel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.26 23 59 50 Fax 04 26 23 59 49 06 07 53 89 13 e2m2@biomserv.univ-lyon1.fr
EDIIS	INFORMATIQUE ET INFORMATION POUR LA SOCIETE http://ediis.univ-lyon1.fr M. Alain MILLE Secrétariat : I. BUISSON	M. Alain MILLE Université Claude Bernard Lyon 1 LIRIS - EDIIS Bâtiment Nautibus 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 44 82 94 Fax 04 72 44 80 53 ediis@liris.cnrs.fr - alain.mille@liris.cnrs.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES- SANTE Sec : Safia Boudjema M. Didier REVEL Insa : M. LAGARDE	M. Didier REVEL Hôpital Cardiologique de Lyon Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69500 BRON Tél : 04.72.68 49 09 Fax :04 72 35 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr
Matériaux	MATERIAUX DE LYON M. Jean Marc PELLETIER Secrétariat : C. BERNAVON 83.85	M. Jean Marc PELLETIER INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Blaise Pascal 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-marc.Pelletier@insa-lyon.fr
Math IF	MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE FONDAMENTALE M. Pascal KOIRAN Insa : G. BAYADA	M.Pascal KOIRAN Ecole Normale Supérieure de Lyon 46 allée d'Italie 69364 LYON Cédex 07 Tél : 04.72.72 84 81 Fax : 04 72 72 89 69 Pascal.koiran@ens-lyon.fr Secrétariat : Fatine Latif - latif@math.univ-lyon1.fr
MEGA	MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE M. Jean Louis GUYADER Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 -Fax : 87.12	M. Jean Louis GUYADER INSA de Lyon Laboratoire de Vibrations et Acoustique Bâtiment Antoine de Saint Exupéry 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél :04.72.18.71.70 Fax : 04 72 18 87 12 mega@lva.insa-lyon.fr
ScSo	ScSo* M. BRAVARD Jean Paul Insa : J.Y. TOUSSAINT	M. BRAVARD Jean Paul Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.69.72.76 Fax : 04.37.28.04.48 Jean-paul.bravard@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Remerciements

Je tiens à remercier ici tous ceux qui ont contribué, de manière directe ou indirecte, à la réussite de mon travail.

Merci en premier lieu à Christian Inard, qui a bien voulu assurer le rôle de président du jury et celui de rapporteur, pour toute l'attention qu'il a porté à mon travail. Je souhaite également remercier l'ensemble des membres du jury, pour les remarques et propositions constructives qui ont été apportées lors de la soutenance ; leur contribution est peut-être à même de permettre une meilleure compréhension des phénomènes décrits dans ce manuscrit. J'adresse un merci particulier à Vasco Peixoto de Freitas et Hartwig Künzel, qui ont accepté de travailler sur un manuscrit rédigé en Français.

Je remercie vivement Daniel Quenard de m'avoir accueilli dans son équipe, et d'avoir porté le projet sur lequel j'ai pu travailler dans de très bonnes conditions, tant matérielles qu'humaines. Ce fut une grande chance pour moi de faire ma thèse au CSTB, et de découvrir le rôle de cet organisme et ses activités variées.

Pour leurs conseils avisés, leur aide, et leurs propositions toujours constructives, je remercie mes directeurs de thèse, Jean Brau et Monika Woloszyn ; votre encadrement m'a non seulement permis de mener à bien ce travail, mais aussi d'apprendre énormément, tant sur le plan du contenu scientifique que de la méthodologie et de la rigueur nécessaire au travail scientifique.

Cette thèse a été rendue possible par un co-financement de l'ADEME et du CSTB, je tiens à remercier ces deux organismes. Je remercie également Dany Escudié, directrice du CETHIL, où j'ai également passé quelques mois durant ma thèse, et où était assurée la direction scientifique de ce travail.

Un très grand merci à Charlotte Abelé, pour toute sa contribution à mon travail ; notre collaboration a été, je le crois, très fructueuse pour toutes les deux, et ce fut un grand plaisir que de travailler ensemble. Merci également à François-Dominique Menneteau, sans qui l'étude expérimentale n'aurait pas été d'aussi bonne qualité ; ce travail te doit beaucoup, merci d'avoir partagé ton savoir-faire avec nous. J'ai beaucoup aimé travailler à tes côtés, et y ai beaucoup appris.

De grands remerciements également à Claude Pompéo, pour son aide et ses conseils, ainsi qu'à Maud, Hébert, François, Anne-Marie, Kevyn, Daniel, Géraldine et Matthieu pour leur aide, ponctuelle ou plus importante, et bien sûr à tous pour votre chaleur. Un petit mot particulier pour Bertrand, qui a réussi à me supporter durant 2 années, et a été un chouette voisin de bureau.

Enfin, on ne peut faire de thèse sans la présence, l'aide et le travail discrets des secrétaires... Merci à Cricri, Christine, Agnès, Marie-Laure...

Je ne saurais dire à quel point les 3 années passées au CSTB ont été riches et belles humainement parlant, un très grand merci à toutes les personnes du CSTB Grenoble, aux thésards, aux stagiaires, etc.

Et si cette thèse avait été comme un voyage... Voilà ce qu'en dit Darwin, de retour de son voyage à bord du Beagle¹ :

En résumé, il me semble que rien ne peut être plus profitable pour un jeune naturaliste qu'un voyage dans les pays lointains. Il aiguise, tout en la satisfaisant en partie, cette ardeur, ce besoin de savoir qui, selon sir J. Herschel, entraîne tous les hommes. La nouveauté des objets, la possibilité du succès, communiquent au jeune savant une nouvelle activité. [...]

Ce voyage m'a causé des joies si profondes, que je n'hésite pas à recommander à tous les naturalistes, bien qu'ils ne puissent espérer trouver des compagnons aussi aimables que les miens, de courir toutes les chances et d'entreprendre des voyages[...]. Ces voyages enseignent la patience[...], [et] on découvre en même temps combien il y a de gens à l'excellent cœur [...].

¹« Voyage d'un naturaliste autour du monde », Charles Darwin, éditions La Découverte/Poche (édition française de 1875)

Résumé

Les maisons à ossature bois sont des structures particulièrement sensibles aux flux d'air et d'humidité. Des études récentes ont montré que de telles sollicitations peuvent dégrader la qualité et la durabilité d'un bâtiment.

Après avoir décrit la physique des transferts couplés d'énergie et de masse, nous présentons le support expérimental de cette étude : une maison à ossature bois, de dimensions représentatives d'une construction réelle, qui a été construite sur une plate-forme d'exposition en extérieur. Cette cellule expérimentale a été instrumentée afin d'étudier le comportement hygrothermique des parois et de la pièce principale. Les données météorologiques sont relevées sur le site même. Plusieurs configurations ont été étudiées dans le cadre de ces travaux : parois avec et sans pare-vapeur ; climat interne avec ou sans chauffage, humidification ou ventilation. Des mesures de perméabilité à l'air de la cellule ont également été effectuées. Enfin, une campagne de détermination des caractéristiques des matériaux employés a été lancée.

En parallèle de cette expérimentation, un modèle numérique de la cellule a été développé, basé sur le modèle existant HAM-tools. Le modèle est utilisé sur plusieurs séquences expérimentales. L'étude de la validité du modèle s'est faite par étapes : d'abord la paroi seule, puis couplée avec la zone, enfin le modèle de bardage. Nous présentons les résultats de la comparaison entre les mesures et les simulations numériques, et discutons de la validité du modèle et des limites imposées par l'expérimentation.

Cette étude a notamment permis de mettre en évidence l'effet de sollicitations thermiques sur le comportement hygrique d'une paroi comportant un matériau hygroscopique, et montré la capacité du modèle développé à le décrire.

Mots clés

Humidité - Chaleur - Transferts couplés - Bâtiment - Expérimentation - Modélisation - Bois

Abstract

Hygrothermal behaviour of buildings : experimental investigation on a wooden frame house in outdoor exposure and numerical modelling

Wooden frame houses are very sensitive to air and moisture flows. Recent studies showed that such flows can seriously affect the quality and durability of buildings.

After a brief description of the physics of heat and mass transfers, we present the experimental set-up that was built for this study. It consists in a wooden frame house, exposed to natural outdoor climate, and its dimensions are representative of real-life constructions. This test house was instrumented so as to study the hygrothermal behaviour of both the walls and the main room. The weather data is recorded on site. We studied several configurations : walls with and without vapour-barrier ; indoor climate with or without heating, humidification, mechanical ventilation. The air permeability of the test house was also determined. Finally, the characterization of the materials used in the test house has begun.

In parallel to this experimental investigation, a numerical model of the test house was developed, based on the existing model HAM-tools. The model is tested on several experimental sequences. The assessment of the validity of the model was carried out step by step : first the validation of the transfers within the walls, then the coupling with the air zone, last the cladding model. We present the results of the comparison between the measurements and the numerical simulations, and discuss of the validity of the model and of the limitations due to the experimental set-up.

This study showed the effect of thermal solicitations on the hygric behaviour of a wall containing a hygroscopic material, and the ability of the model to describe it.

Key words

Moisture - Heat - Transfers - Building - Experimentation - Modelling - Wood

Table des matières

Résumé	vii
Abstract	ix
Nomenclature	xxi
Introduction	1
1 Contexte scientifique	3
1.1 Rappels théoriques - transferts d'énergie et de masse dans un matériau	3
1.1.1 Transfert et stockage de chaleur	3
1.1.2 L'humidité dans un matériau poreux	5
1.1.3 Transfert de masse dans les matériaux poreux	7
1.1.4 Transferts couplés de chaleur et de masse	10
1.2 Positionnement de ce travail	12
1.2.1 Études françaises	12
1.2.2 L'annexe 41 de l'agence internationale de l'énergie	14
1.3 Caractérisations expérimentales à différentes échelles	15
1.3.1 Propriétés de matériaux : exemples de bases de données	15
1.3.2 Expérimentations en grandeur réelle	16
1.4 Synthèse - Objectifs de ce travail	19
2 Support expérimental	21
2.1 Cahier des charges de la cellule expérimentale	21
2.2 Description physique	22
2.3 Instrumentation	28
2.3.1 Capteurs utilisés	28
2.3.2 Placements des capteurs	33
2.4 Mesures effectuées en parallèle	36
2.4.1 Station météo	36
2.4.2 Caractérisation des matériaux	37
2.5 Caractérisation de la cellule test	39
2.5.1 Perméabilité à l'air	40
2.5.2 Comportement thermique	42
2.5.3 Comportement en humidité	46
2.6 Synthèse	51

3	Modélisation numérique	53
3.1	Choix d'un outil de modélisation numérique : HAM-tools	53
3.1.1	Différents types de modèles existants	53
3.1.2	Le choix de HAM-tools	55
3.1.3	Principes généraux - description fonctionnelle	55
3.2	La modélisation des transferts dans HAM-Tools	57
3.2.1	Transferts dans les parois	57
3.2.2	Modèle de bâtiment	60
3.3	Modélisation de la cellule expérimentale	62
3.3.1	Choix de modélisations effectués pour la cellule	62
3.3.2	Ajout d'un modèle de bardage	65
3.3.3	Propriétés des matériaux utilisées dans le modèle	69
3.4	Synthèse	73
4	Confrontation - Modélisation et expérimentation	75
4.1	Modèle de paroi	76
4.1.1	Comportement thermique	76
4.1.2	Comportement en humidité	79
4.1.3	Synthèse	85
4.2	Couplage avec la zone intérieure	85
4.2.1	Comportement thermique	85
4.2.2	Comportement en humidité	87
4.3	Modèle de bardage	92
4.3.1	Valeurs et corrélations utilisées pour les paramètres	93
4.3.2	Étude en période nuageuse	96
4.3.3	Étude en période ensoleillée	99
4.3.4	Validité du modèle	102
4.4	Discussion	104
4.4.1	Capacités et limites du modèle développé	104
4.4.2	Limites et réserves liées aux conditions expérimentales	105
	Conclusions et perspectives	108
	Bibliographie	109
A	Détails constructifs de la cellule expérimentale	115
A.1	Plans d'exécution	115
A.2	Jonctions entre les parois verticales et horizontales	120
B	Mesures complémentaires sur les capteurs	121
B.1	Test de réponse d'un thermohygromètre	121
B.2	Comparaison des mesures : thermocouples-thermohygromètres	123
C	Détails du placement des capteurs en paroi Est	125

D	Méthodes et résultats des mesures de propriétés des matériaux	131
D.1	Caractéristiques nécessaires et planning de réalisation	131
D.2	Caractéristiques thermiques et hydriques	134
D.2.1	Caractéristiques à l'état sec	134
D.2.2	Émissivité hémisphérique et coefficient d'absorption	134
D.2.3	Courbe de sorption	136
D.2.4	Variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité	137
D.2.5	Perméabilité à la vapeur d'eau	138
E	Rapports de mesures de perméabilité à l'air de la cellule expérimentale	141
F	Conditions climatiques pour la période du 6 au 17 novembre 2008	149

Table des figures

1.1	a) Flux de chaleur traversant une surface dS par conduction au sein d'un volume V ; b) Volume élémentaire $dV = dx \cdot dy \cdot dz$	4
1.2	Photographies au microscope électronique de différents matériaux de construction	4
1.3	Forme générale de la courbe de sorption d'un matériau hygroscopique	5
1.4	Phases liquide et gazeuse de l'eau dans un pore, d'après [Hagentoft, 2001]	7
1.5	Phénomènes de transport à différents taux d'humidité, pour un modèle de pore cylindrique à diamètre variable (d'après [Krus, 1996]) .	10
2.1	Photographies illustrant la construction et l'environnement de la cellule	23
2.2	Dessin de l'ossature de la cellule test, vue sous l'angle Sud-Ouest (fourni par l'entreprise de construction)	24
2.3	Plan en élévation de la cellule(fourni par l'entreprise de construction)	24
2.4	Schéma en coupe d'une paroi verticale, en section courante	25
2.5	Vues de l'intérieur de la cellule : à gauche la double porte, à droite l'équipement	26
2.6	Principaux capteurs installés dans la cellule : un thermohygromètre, un thermocouple et un fluxmètre	29
2.7	Principes de mesures par thermocouples : a) en direct, b) en différentiel	29
2.8	Principe de fonctionnement d'un fluxmètre tangentiel (source : [Kada <i>et al.</i> , 2004]	30
2.9	À gauche : globe noir et sonde platine; à droite : une centrale d'acquisition et 3 multiplexeurs	30
2.10	Emplacements instrumentés dans la paroi Est (vue de l'intérieur) . .	33
2.11	Placement des capteurs dans la paroi : a) emplacement A, coupe verticale, b) emplacement B, coupe horizontale	34
2.12	Placement des capteurs dans les parois horizontales (coupe verticale)	35
2.13	Détails de la station de mesures météorologiques	36
2.14	Mesures de perméabilité à l'air : à gauche mesure à la fausse porte, à droite mesure avec un perméoscope	40
2.15	Température à l'extérieur, en surface Est et Ouest des parois, et à l'intérieur, du 27 au 31 juillet 2008	43
2.16	Températures dans la paroi Ouest en section courante, à l'intérieur et à l'extérieur, du 09 au 14 novembre 2008	43

2.17	Densités de flux au travers des parois en section courante, du 09 au 14 novembre 2008	44
2.18	Températures à l'arrière du bardage (TC 5) et sur le pare-pluie (HRT 5), en parois Est et Ouest, et température extérieure, du 6 novembre au 17 novembre 2008	45
2.19	Humidité absolue à l'extérieur, dans la paroi Ouest (en section courante) et à l'intérieur, du 27 au 31 juillet 2008	47
2.20	Humidité absolue à l'extérieur et à l'intérieur, du 05 au 19 novembre 2008	48
2.21	Humidité absolue à l'extérieur, dans la paroi Ouest (section courante) et à l'intérieur, du 19 au 25 décembre 2008, et température de surface (HRT 5)	49
2.22	Humidité absolue à l'extérieur, dans la paroi Est (section courante) et à l'intérieur, du 25 février au 06 mars 2009, et température de surface (HRT 5)	50
3.1	Schéma fonctionnel de HAM-tools	56
3.2	Schéma d'un nœud du maillage	59
3.3	Schéma de principe du bilan de la zone	60
3.4	Capture d'écran du modèle de la cellule expérimentale dans HAM-tools	63
3.5	Maillage des parois à 3 couches et position des points de comparaison modèle-expérimentation, pour les murs Est et Ouest	63
3.6	Modèle de plancher et conditions aux limites choisies	64
3.7	Schéma du système de bardage de la cellule test	65
3.8	Schéma électrique utilisé pour modéliser les échanges thermiques liés au bardage	66
4.1	Rappel du positionnement des capteurs : a) en section courante, b) au niveau d'un montant Est	75
4.2	Température sur le pare-pluie, dans la paroi Est, et à l'intérieur, du 9 au 14 novembre 2008 ; $h_{c,int} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$	77
4.3	Écarts entre les températures calculées et mesurées dans la paroi Est, du 9 au 14 novembre 2008 ; $h_{c,int} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$	77
4.4	Température derrière le parement intérieur, au niveau du montant Est, mesurée et calculée en une dimension, du 9 au 14 novembre 2008	78
4.5	Température derrière le parement intérieur, au niveau du montant Ouest, mesurée et calculée en une dimension, du 9 au 14 novembre 2008	78
4.6	Humidité absolue dans la paroi Est, du 26 février au 9 mars 2009 . .	81
4.7	Écarts entre les résultats de calculs et les mesures d'humidité absolue dans la paroi Est, du 26 février au 9 mars 2009	81
4.8	Humidité absolue dans la paroi Est, du 26 février au 9 mars 2009, avec des conditions initiales inadaptées	82
4.9	Humidité absolue derrière le parement intérieur Est (HRT 1), du 26 février au 9 mars 2009, en modifiant les propriétés du matériau . . .	82

4.10	Humidité absolue derrière le parement intérieur, du 26 février au 9 mars 2009, pour différentes valeurs de coefficients d'échange surfacique massique	83
4.11	Humidité absolue dans la paroi Ouest, du 26 février au 9 mars 2009	84
4.12	Température à l'intérieur, du 27 au 31 juillet 2008, mesurée par la sonde platine et par un thermohygromètre	86
4.13	Écarts entre le modèle et 2 mesures de la température à l'intérieur, du 27 au 31 juillet 2008	86
4.14	Humidité absolue dans la paroi Est et à l'intérieur, du 9 au 14 novembre 2008	87
4.15	Écart entre l'humidité absolue calculée et mesurée, dans la paroi Est et à l'intérieur, du 9 au 14 novembre 2008	88
4.16	Humidité absolue à l'intérieur, du 26 février au 9 mars 2009, pour divers jeux de paramètres	89
4.17	Humidité absolue dans la paroi Est, du 26 février au 9 mars 2009 . .	91
4.18	Humidité absolue à l'intérieur, du 26 février au 9 mars 2009, pour différentes variations des propriétés du panneau de particules	92
4.19	Écarts entre les résultats de calculs et les mesures de température à l'arrière du bardage en paroi Est, du 13 au 16 novembre, pour 3 valeurs de h_c	96
4.20	Écarts entre les résultats de calculs et les mesures de température à l'arrière du bardage en paroi Est, du 13 au 16 novembre, pour 3 valeurs de v_a	97
4.21	Écarts entre les résultats de calculs et les mesures de température à l'arrière du bardage et sur le pare-pluie en paroi Est, du 13 au 16 novembre, pour 2 valeurs de T_{ciel}	97
4.22	Températures mesurées et calculées derrière le bardage en paroi Est et sur le pare-pluie, pour différentes combinaisons de h_c^* et h_r^* (pour des raisons de commodité, les unités ont été omises dans la légende)	98
4.23	Températures derrière le contreventement en paroi Nord, mesurées et calculées, pour différentes températures de ciel, du 7 au 11 novembre 2008	98
4.24	Températures derrière le contreventement en paroi Nord, mesurées et calculées avec la corrélation de [Clark et Allen, 1978], du 7 au 17 novembre 2008	100
4.25	Températures derrière le bardage, mesurées et calculées en paroi Est et Ouest, du 6 au 10 novembre 2008	101
4.26	Températures derrière le bardage, mesurées et calculées en paroi Est pour différentes corrélations sur le coefficient d'échanges convectif, du 6 au 10 novembre 2008	101
4.27	Écarts entre les résultats de calculs et les mesures de température en paroi Nord, Sud, Est et Ouest, du 6 au 17 novembre 2008	102

4.28	Humidité absolue, mesurée et calculée en incluant le modèle de bardage, en paroi Est, du 9 au 14 novembre 2008	103
4.29	Écarts entre les résultats de calculs et les mesures de température en paroi Nord, Sud, Est et Ouest, du 27 au 31 juillet 2008	103
A.1	Vue en coupe verticale de l'ossature de la cellule, mur pignon	116
A.2	Vue en coupe verticale et espacements des montants d'ossature	117
A.3	Vue en coupe verticale de l'ossature de la cellule, mur de façade Nord	118
A.4	Vue en coupe verticale de l'ossature de la cellule, mur de façade Sud	119
A.5	Schémas des jonctions entre les parois verticales et horizontales	120
B.1	Schéma de principe du dispositif de test pour un thermohygromètre	122
B.2	Tests de réponse d'un thermohygromètre	122
B.3	Comparaison des mesures entre les thermocouples et les thermohygromètres	124
C.1	Rappel des emplacements instrumentés dans la paroi Est (vue de l'intérieur)	126
C.2	Emplacements A et B : capteurs placés en paroi Est en section courante et près d'un montant	127
C.3	Emplacement C : capteurs placés dans l'angle Nord-Est, au milieu	127
C.4	Emplacements D et J : capteurs placés dans l'angle Nord-Est, en haut et en bas	128
C.5	Emplacements E, F, G, H, I et J : capteurs placés en paroi est, en section courante et à proximité d'un montant, en haut et en bas	129
D.1	Mesures de la chaleur spécifique des échantillons à température ambiante	135
D.2	Courbes de sorption des différents échantillons	136
D.3	Conductivité thermique en fonction du taux d'humidité	137
D.4	Schéma de principe d'une coupelle	138
F.1	Température d'air mesurée, et température de ciel calculée, du 6 au 17 novembre 2008	149
F.2	Rayonnement solaire global et diffus mesurés sur une surface horizontale, du 6 au 17 novembre 2008	150
F.3	Vitesse et direction du vent, du 6 au 17 novembre 2008	150

Liste des tableaux

2.1	Récapitulatif des capteurs utilisés	32
2.2	Tableau de synthèse des mesures effectuées sur les matériaux utilisés dans la cellule expérimentale	38
2.3	Description des séquences permettant de caractériser le comportement de la cellule	39
2.4	Caractéristiques de perméabilité à l'air de la cellule; le cas marqué (*) a été déterminé par calcul, à partir des mesures faites dans les autres cas	41
3.1	Associations typiques de modèles, d'après [Woloszyn et Rode, 2008a], et quelques exemples	54
3.2	Caractéristiques thermiques des panneaux de particules	70
3.3	Capacité hygroscopique des panneaux de particules	70
3.4	Perméabilité à la vapeur des panneaux de particules	70
3.5	Caractéristiques thermiques des panneaux d'OSB	70
3.6	Capacité hygroscopique des panneaux d'OSB	71
3.7	Perméabilité à la vapeur des panneaux d'OSB	71
3.8	Caractéristiques thermiques des plaques de plâtre	71
3.9	Capacité hygroscopique des plaques de plâtre	71
3.10	Perméabilité à la vapeur des plaques de plâtre	71
3.11	Caractéristiques thermiques de la laine de verre	72
3.12	Capacité hygroscopique de la laine de verre	72
3.13	Caractéristiques thermiques de l'épicéa	72
3.14	Capacité hygroscopique de l'épicéa	72
3.15	Perméabilité à la vapeur de l'épicéa	73
3.16	Caractéristiques thermiques du mélèze	73
4.1	Séquence B, écarts de températures entre le modèle et les mesures, pour différents coefficients d'échange convectif intérieur	77
4.2	Séquence A, écarts en température entre le modèle et les mesures, dans la paroi et dans la pièce, pour deux capteurs	86
D.1	Tableau de synthèse des mesures à réaliser	133
D.2	Valeurs de conductivité thermique et de masse volumique obtenues sur les matériaux secs	134
D.3	Emissivité hémisphérique en %	135

D.4	Facteur d'absorption en %	136
D.5	Conductivité thermique fonction du taux d'humidité	138
D.6	Conditions d'essai pour les mesures de perméabilité à la vapeur . . .	138
D.7	Perméabilité à la vapeur d'eau moyenne des différents échantillons .	139

Nomenclature

Lettres latines

A	Aire (m^2)
C	Coefficient de perméabilité à l'air d'une ouverture
C_p	Chaleur spécifique isobare ($J/kg.K$)
E	Éclairement (W/m^2)
F	Facteur de forme (-)
g	Accélération de la pesanteur (m/s^2)
g_i	Densité de flux de masse du composant i ($kg/s.m^2$)
G	Flux de masse (kg/s)
h_c	Coefficient d'échange convectif (W/m^2K)
h_r	Coefficient d'échange radiatif linéarisé (W/m^2K)
h_v	Coefficient d'échange massique ($kg/m^2.s.Pa$)
H	Enthalpie (J)
HA	Humidité absolue, dans l'air (ou humidité spécifique) ($kg_{vapeur}/kg_{air sec}$)
K	Conductivité liquide (s)
k_a	Perméabilité à l'air du matériau (s)
K_a	Perméance à l'air d'un composant (s/m)
L	Chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg)
m	Masse (kg)
p	Pression partielle (Pa)
P	Pression totale (Pa)
q	Densité de flux de chaleur (W/m^2)
Q	Flux de chaleur (W)
Q_V	Débit volumique d'air (m^3/h)
R	Résistance
S_d	Épaisseur de couche d'air de diffusion équivalente (m)
T	Température ($^{\circ}C$ ou K)
U	Énergie interne (J)
V	Volume (m^3)
V_{vent}	Vitesse du vent (m/s)
w	Taux d'humidité (kg/m^3)

Lettres grecques

α	Absorptivité solaire (-)
δ	Perméabilité à un gaz (s)
Δ	Variation d'une grandeur physique
ϵ	Émissivité (-)
λ	Conductivité thermique (W/mK)
μ	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur (-)
ρ	Masse volumique (kg/m^3)
ϕ	Humidité relative (ratio ou %)

Indices et exposants

\perp	Normal
*	Relatif à la lame d'air
0	Matériau sec
<i>a</i>	Air sec
<i>b</i>	Bardage
<i>c</i>	Convectif
<i>calc</i>	Calculé
<i>cond</i>	Conductif
<i>dir</i>	Solaire direct
<i>dif</i>	Solaire diffus
<i>eau</i>	Eau sous forme liquide et vapeur
<i>ext</i>	Extérieur
<i>horiz</i>	Horizontal
<i>int</i>	Intérieur
<i>l</i>	Eau liquide
<i>mes</i>	Mesuré
<i>r</i>	Radiatif
<i>sat</i>	Saturation
<i>succ</i>	Succion
<i>surf</i>	Surfacique
<i>v</i>	Vapeur d'eau

Notations mathématiques

\vec{v}	Vecteur
\bar{x}	Valeur moyenne
$\text{div}(\vec{v})$	Opérateur divergence
$\overrightarrow{\text{grad}}(x)$	Opérateur gradient

Autres notations et abréviations

CLO	Courtes longueurs d'ondes
GLO	Grandes longueurs d'ondes
HR	Humidité relative
HRT	Thermohygromètre
TC	Thermocouple

Valeurs des constantes

$C_{p,a}$	Chaleur spécifique isobare de l'air sec	1 kJ/kg.K
$C_{p,l}$	Chaleur spécifique isobare de l'eau liquide	4,18 kJ/kg.K
$C_{p,v}$	Chaleur spécifique isobare de la vapeur d'eau	1,96 kJ/kg.K
L	Chaleur latente de vaporisation à 0°C	2,5 MJ/kg
M_{eau}	Masse molaire de l'eau	0,018 kg/mol
M_a	Masse molaire de l'air	0,029 kg/mol
R	Constante des gaz parfaits	8,314 J/mol.K
σ_0	Constante de Stephan-Boltzman	$5,68.10^{-8}$ W/m ² .K ⁴

Introduction

L'enveloppe d'un bâtiment est l'interface entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur; elle est le siège de transferts de chaleur, d'humidité, et d'air, qui déterminent le climat interne du bâtiment. Le plus souvent, elle doit être complétée par un système de régulation (chauffage, rafraîchissement, humidification, renouvellement d'air...) Le mode constructif a donc un impact primordial sur le maintien du confort des occupants et sur le niveau de performance énergétique du bâtiment.

Depuis le sommet de Rio (1992) et l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto (2005), le secteur du bâtiment est incité à réduire les consommations d'énergie et de matière dont il est responsable. Ces efforts sont traduits au travers de réglementations thermiques, et de labels de qualité environnementale ou de performance énergétique (HQE, maisons passives, bâtiments basse consommation). Plus récemment, en France, le Grenelle de l'environnement a confirmé le potentiel du secteur du bâtiment en termes d'économie d'énergie et l'intérêt porté à l'utilisation de matériaux dits « propres » et « durables ».

Les maisons à ossature bois ont, de ce point de vue, des atouts : c'est une technologie qui permet d'atteindre de très bonnes performances thermiques. En outre, l'utilisation raisonnable du bois dans la construction favorise un meilleur entretien des forêts, ce qui en fait une ressource renouvelable. Enfin, la technique constructive des maisons à ossature bois est en filière sèche, et la préfabrication est de plus en plus répandue, ce qui permet de mieux maîtriser les conditions de montage et les délais de construction. Si la maison à ossature bois est un mode de construction très répandu dans les pays nordiques, ainsi qu'en Amérique du Nord, elle reste marginale en France (d'après le CNDB, ces constructions représentent 4% du marché), mais la demande pour ce type de constructions est en forte augmentation.

Les constructions à ossature bois sont particulièrement sensibles aux infiltrations d'air et d'humidité en raison de leur système constructif : assemblages d'éléments d'ossature, parois multicouches, membranes... Toutes les discontinuités sont des causes possibles de passage d'humidité dans la paroi, en particulier si la mise en œuvre ne respecte pas certaines règles. De plus, les consommations énergétiques peuvent être augmentées lorsque l'étanchéité à l'air est mal maîtrisée :

Introduction

la RT 2005, ainsi que des labels tels que « Passiv Haus » et « Effienergie », imposent une étanchéité à l'air minimale à respecter.

Des études récentes, françaises et internationales, ont mis en avant les risques liés à l'humidité dans les bâtiments : dégradation des conditions de confort ou d'hygiène, diminution des performances énergétiques. Les mécanismes de transferts, les conditions dans lesquels des désordres liés à l'humidité apparaissent, et leurs conséquences, ont fait l'objet d'investigations dans le cadre de l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Énergie : durant 3 années, des laboratoires de près de 20 pays différents ont travaillé sur ce sujet, confrontant leurs approches, numériques et expérimentales, à l'échelle du matériau aussi bien qu'à l'échelle du bâtiment. À l'issue de ce programme commun, la nécessité de plus de données expérimentales a été mise en évidence, pour mieux comprendre la physique des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à différentes échelles, et permettre une meilleure fiabilité des modèles de comportement hygrothermique de bâtiments.

Notre travail s'inscrit dans cette démarche : nous avons choisi une approche à la fois expérimentale et numérique, à l'échelle du bâtiment, avec pour objectif l'étude, globale et détaillée, du comportement hygrothermique d'une maison à ossature bois. Le développement en parallèle d'une modélisation numérique et d'une expérimentation en grandeur réelle vise à utiliser au mieux leur complémentarité : mesures sur un bâtiment en conditions climatiques naturelles, avec ses singularités constructives, et modélisation avec des hypothèses simplificatrices, tant sur les phénomènes de transferts que sur l'aspect géométrique, permettant plus de libertés d'études qu'une installation expérimentale (études paramétriques).

L'objectif de ce travail est la mise en place de ces 2 outils :

- La construction et l'instrumentation d'une cellule expérimentale qui devra permettre une étude du comportement en conditions réelles (cellule « grandeur nature », exposition en extérieur) mais aussi la validation d'un modèle numérique.
- Le développement d'un modèle appliqué à la cellule, et la confrontation avec l'expérimentation, afin de vérifier sa fiabilité.

Notre approche se situe donc à l'échelle du matériau et du bâtiment, et traitera d'aspects fondamentaux (modélisation des transferts, confrontation avec les mesures), et concrets (singularités constructives, importance de la mise en œuvre).

Nous espérons par ce travail contribuer au développement des connaissances sur les transferts d'humidité dans les maisons à ossature bois, et fournir des outils permettant l'identification des risques liés à l'humidité et la recherche de solutions techniques aux problèmes qui en découlent.

Chapitre 1

Contexte scientifique

1.1 Rappels théoriques - transferts d'énergie et de masse dans un matériau

1.1.1 Transfert et stockage de chaleur

Dans un solide homogène, le transfert de chaleur se fait par conduction ; celle-ci est régie par la loi de Fourier (équation 1.1 et figure 1.1.a) : le flux de chaleur élémentaire $d\vec{Q}_{cond}$ traversant une surface dS est proportionnel au gradient de la température T .

$$d\vec{Q}_{cond} = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad}(T) \cdot dS = \vec{q}_{cond} \cdot dS \quad (1.1)$$

$\vec{q}_{cond} = d\vec{Q}_{cond}/dS$ est la densité de flux de chaleur (W/m^2). Cette loi est similaire, dans sa forme, aux lois de transport par diffusion.

Dans un matériau solide, l'énergie interne est égale à l'enthalpie : $U = H$. L'écriture de la conservation de l'énergie dans un élément de volume dV (voir figure 1.1.b) permet de déterminer l'équation qui y régit l'évolution de la température :

$$\frac{1}{V} \frac{\partial H}{\partial t} = -div(\vec{q}_{cond}) + p \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 \cdot C_{p,0} \cdot T)}{\partial t} = div(\lambda \cdot \overrightarrow{grad}(T)) + p \quad (1.3)$$

p désigne une création de chaleur par unité de volume (radioactivité, effet Joule, condensation de vapeur...), et le produit $\rho_0 \cdot C_{p,0}$ la capacité calorifique volumique du matériau.

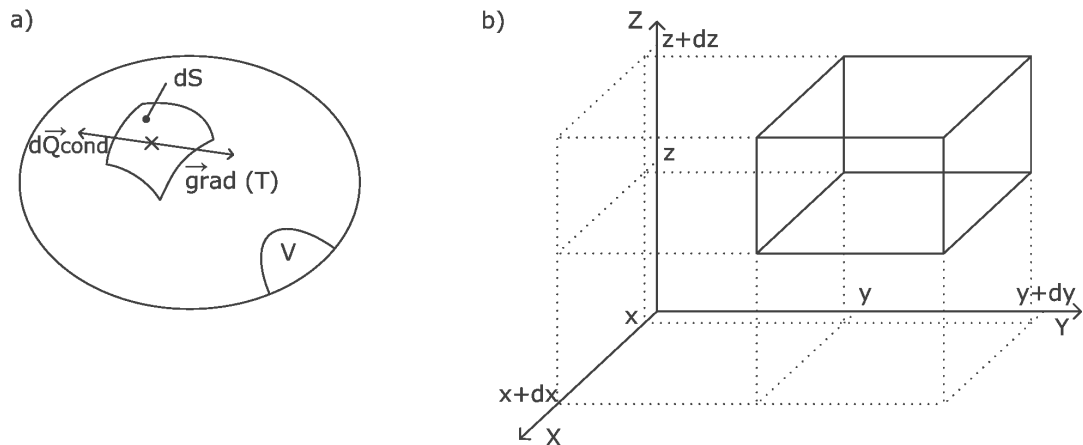


FIG. 1.1 : a) Flux de chaleur traversant une surface dS par conduction au sein d'un volume V ; b) Volume élémentaire $dV = dx \cdot dy \cdot dz$

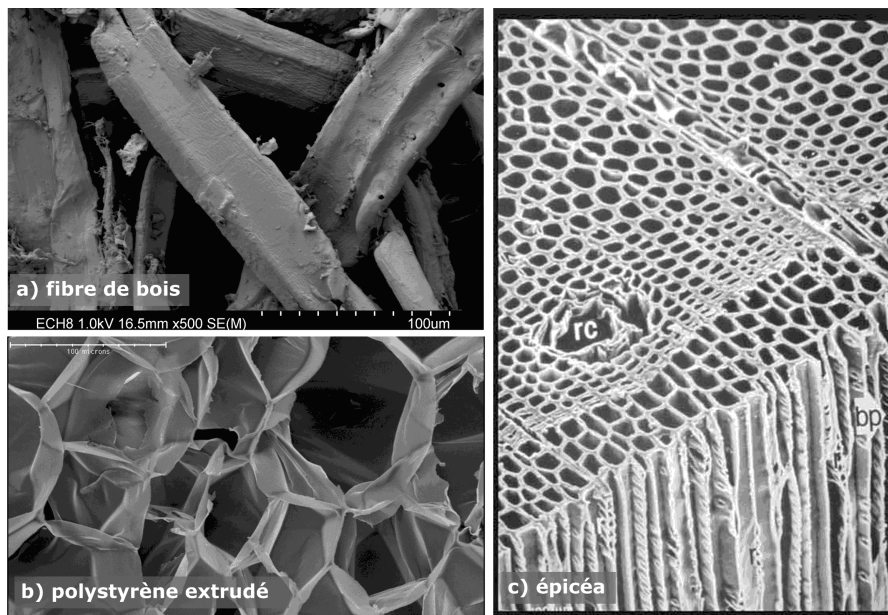


FIG. 1.2 : Photographies au microscope électronique de différents matériaux; (a) et (b) fournies par Aurélie Kaemmerlen [Kaemmerlen, 2009], (c) issue de [Perré, 2007]

Dans le cas d'un matériau poreux (c'est le cas de la plupart des matériaux de construction comme le bois, les isolants minéraux, le plâtre ou le béton, voir figure 1.2), la convection au sein des pores, ainsi que le rayonnement, viennent s'ajouter à la conduction dans la matrice solide. Ces phénomènes sont pris en compte en pratique dans une conductivité équivalente; les mesures de propriétés étant faites sur des échantillons « macroscopiques », c'est de cette conductivité équivalente qu'il sera question par la suite.

1.1 Rappels théoriques - transferts d'énergie et de masse dans un matériau

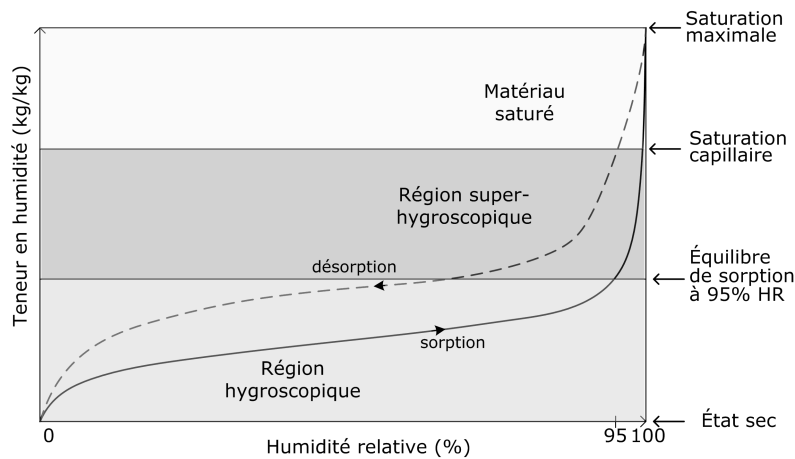


FIG. 1.3 : Forme générale de la courbe de sorption d'un matériau hygroscopique

1.1.2 L'humidité dans un matériau poreux

Dans la suite de cet exposé, nous parlerons de pore pour désigner seulement les pores dits « ouverts », c'est à dire ceux communiquant entre eux et formant ainsi un réseau, au sein duquel les fluides (gaz, liquide) peuvent circuler. Le terme humidité englobera l'eau sous forme liquide et vapeur (la glace n'est pas considérée ici).

Échelle macroscopique : le matériau

À l'échelle macroscopique, l'humidité accumulée dans un matériau, à l'équilibre, dépend de l'humidité relative ambiante. Cette capacité de stockage est décrite par la courbe de sorption du matériau (taux massique d'humidité w en fonction de l'humidité relative ϕ). Pour un matériau hygroscopique, sa forme générale est donnée par la figure 1.3. La courbe ou isotherme de sorption décrit les états d'équilibre successifs du matériau avec le milieu ambiant, dans des conditions de température uniformes ; toutefois, dans la gamme de températures utiles en physique du bâtiment, l'influence de la température sur cette caractéristique est généralement considérée comme négligeable.

Trois domaines peuvent être distingués. Ils traduisent le comportement du matériau à l'échelle microscopique :

- *Région hygroscopique* : lorsque le matériau est exposé à de faibles humidités relatives (jusqu'à environ 40%), l'eau est adsorbée sur les parois des pores, en couches mono- puis multi-moléculaires. La condensation capillaire apparaît lorsque tout l'espace d'un pore est rempli par de l'eau. Elle apparaît donc dans les plus petits pores en premier. Dans cette région (jusqu'à 95-98% HR), l'eau est transportée essentiellement sous forme de vapeur.

- *Région super-hygrosopique* : au-delà, c'est l'eau liquide qui occupe la majorité de l'espace, laissant des poches dans lesquelles la vapeur circule. Le matériau peut alors absorber de l'eau jusqu'à atteindre la saturation capillaire.
- *Région saturée ou super-saturée* : si le matériau reste en contact longtemps avec de l'eau liquide, ou bien si la pression sur ses faces est artificiellement augmentée, les petites poches d'air résiduelles sont dissoutes, jusqu'à atteindre la saturation maximale. Le transfert d'air n'est plus possible au travers de ce matériau.

Le comportement diffère entre les processus de sorption et de désorption ; l'historique du matériau a donc un effet sur le taux réel d'humidité du matériau, celui-ci se trouvant toujours entre les deux courbes. L'hystérésis est toutefois fréquemment négligée, et c'est l'isotherme de sorption qui est utilisée. La forme de la courbe, et donc la capacité à emmagasiner de l'humidité, dépend fortement de la dimension moyenne des pores, ainsi que de la répartition de leur diamètre (porosimétrie).

Échelle microscopique : dans un pore

À l'échelle microscopique, l'équilibre des deux phases (eau liquide et vapeur) dans un pore (voir figure 1.4) est décrit par la loi de Kelvin (équation 1.4). La vapeur d'eau est considérée comme un gaz parfait.

$$p_l = p_{sat}(T) + \frac{R \cdot T \cdot \rho_l}{M_{eau}} \cdot \ln(\phi) \quad (1.4)$$

p_l représente la pression de l'eau liquide et ρ_l sa masse volumique, M_{eau} la masse molaire de l'eau, R la constante molaire des gaz parfaits, T la température exprimée en kelvins, et ϕ est l'humidité relative. La pression de vapeur saturante p_{sat} étant généralement négligeable devant le second terme, l'équation 1.4 s'écrit :

$$p_l \simeq \frac{R \cdot T \cdot \rho_l}{M_{eau}} \cdot \ln(\phi) \quad (1.5)$$

La différence de pression entre la phase liquide et le mélange gazeux qui la surmonte est maintenue par la tension de surface σ du ménisque ; dans le cas d'un pore de forme cylindrique, le ménisque peut être considéré comme sphérique. La tension de surface est alors inversement proportionnelle au rayon du pore r (loi de Laplace) :

$$P - p_l = p_{succ} = \frac{2\sigma}{r} \quad (1.6)$$

La pression totale de phase gazeuse P étant généralement prise comme référence, la pression de succion ou pression capillaire p_{succ} s'écrit alors :

$$p_{succ} = -p_l \quad (1.7)$$

1.1 Rappels théoriques - transferts d'énergie et de masse dans un matériau

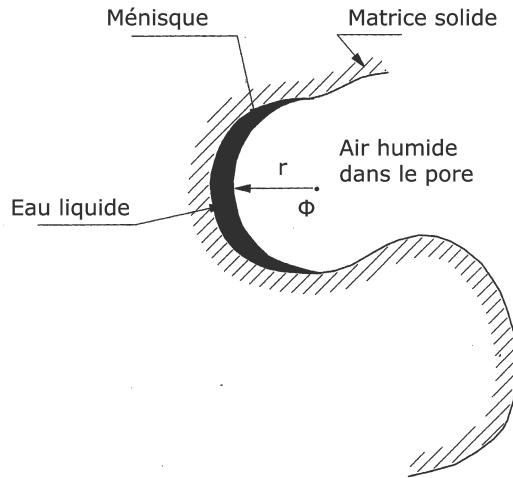


FIG. 1.4 : Phases liquide et gazeuse de l'eau dans un pore, d'après [Hagentoft, 2001]

D'où la relation entre la pression de vapeur et la pression de succion :

$$p_{succ} = -\frac{R \cdot T \cdot \rho_l}{M_{eau}} \cdot \ln(\phi) = -\frac{R \cdot T \cdot \rho_l}{M_{eau}} \cdot \ln\left(\frac{p_v}{p_{sat}(T)}\right) \quad (1.8)$$

Bien que les matériaux de construction ne soient en réalité pas constitués de réseaux de pores cylindriques (voir figure 1.2), cette description est couramment adoptée en physique du bâtiment, et permet de décrire correctement leur comportement.

1.1.3 Transfert de masse dans les matériaux poreux

Transport de vapeur dans l'air immobile

Dans l'air libre et immobile, le transport de la vapeur d'eau s'effectue par diffusion (loi de Fick, équation 1.9). Le potentiel moteur est alors la pression partielle de vapeur. La densité de flux de vapeur s'écrit :

$$\vec{g}_v = -\delta_a \cdot \overrightarrow{grad}(p_v) \quad (1.9)$$

où δ_a est la perméabilité de l'air à la vapeur.

Transport de vapeur dans un matériau poreux

Dans le réseau poreux, cependant, ce transport est modifié par la présence de la matrice solide (par réduction de la « surface de passage », mais aussi par la tortuosité du réseau et les dimensions des pores), ainsi que de l'eau liquide. En effet, lorsque les pores sont suffisamment petits (de dimensions inférieures au parcours libre moyen d'une molécule dans l'air), les molécules d'eau entrent plus fréquemment en collision avec les parois de la matrice solide qu'entre elles, freinant ainsi la progression globale de la vapeur : ce phénomène est connu sous le nom d'effet Knudsen.

Ces différents phénomènes pouvant être décrits comme dépendant directement du gradient de pression de vapeur, on définit à l'échelle macroscopique un facteur de résistance à la diffusion μ pour le matériau (voir notamment [Hens, 2007; Krus, 1996] pour plus de détails). La perméabilité à la vapeur du matériau est alors donnée par la relation 1.10. Cette perméabilité à la vapeur dépend fortement, dans les matériaux hygroscopiques, du taux d'humidité du matériau.

$$\delta_v = \frac{\delta_a}{\mu} \quad (1.10)$$

Une autre grandeur permet parfois de caractériser un matériau : l'épaisseur de couche d'air de diffusion équivalente S_d . Cette valeur inclut l'épaisseur du matériau : $S_d = \mu \times \text{épaisseur}$, et correspond, en m, à l'épaisseur d'une couche d'air qui aurait la même résistance à la vapeur que le matériau.

La vapeur d'eau peut également être transportée par l'air circulant dans le matériau (il s'agit de transport par convection, également appelée advection) :

$$\vec{g}_v = \text{HA} \cdot \vec{g}_a \quad (1.11)$$

HA représentant l'humidité absolue ou spécifique de l'air, reliée à la pression de vapeur par la formule :

$$\text{HA} = \frac{M_{eau}}{M_a} \cdot \frac{p_v}{P - p_v} \simeq 0,622 \cdot \frac{p_v}{P - p_v} \quad (1.12)$$

P étant ici la pression totale de l'air humide.

Le flux d'air, conservatif (on considère qu'il n'y a pas de stockage d'air dans le matériau), est donné par :

$$\vec{g}_a = -k_a \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(P) \quad (1.13)$$

où k_a est la perméabilité à l'air du matériau, et P la pression totale du mélange gazeux.

Le flux de vapeur au sein d'un matériau poreux est donc donné par :

$$\vec{g}_v = -\delta_v \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(p_v) - 0,622 \cdot \frac{p_v}{P - p_v} \cdot k_a \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(P) \quad (1.14)$$

Transport d'eau liquide dans un matériau poreux

La conduction d'eau liquide est régie par le gradient de pression de succion (loi de Darcy). Ce mode de transport est prédominant dans le domaine de la condensation capillaire. L'action de la gravité ajoute une composante verticale au mouvement de l'eau liquide (équation 1.15). La conductivité liquide étant notée K :

$$\vec{g}_l = K \cdot (\overrightarrow{grad}(P_{succ}) + \rho_{eau} \cdot \vec{g}) \quad (1.15)$$

Toutefois, dans les pores de petites dimensions, l'influence de la gravité est négligeable devant les efforts exercés par la pression de succion. Dans les pores de plus grandes dimensions, la pression étant plus faible (équation 1.6), l'apparition d'eau sous forme liquide n'a lieu qu'à des niveaux d'humidité relative très élevés (régions *super-hygrosopique* et *saturée* de la courbe de sorption). L'effet de la gravité est alors fréquemment négligé.

Pour de faibles humidités relatives, l'eau liquide adsorbée en surface des pores est mue par le gradient de pression de vapeur ; cette diffusion de surface est donc intégrée à la perméabilité à la vapeur du matériau, les transports d'eau sous forme liquide et vapeur étant indiscernables expérimentalement.

Transport de masse : synthèse

La répartition des différents modes de transfert d'humidité peut se synthétiser dans le schéma de la figure 1.5.

Le flux d'humidité (en $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) est la somme des flux de vapeur et d'eau liquide :

$$g_{eau} = \vec{g}_v + \vec{g}_l \quad (1.16)$$

L'écriture de la conservation de la masse d'eau donne alors l'équation qui gouverne les transferts d'humidité au sein d'un matériau poreux :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -div(g_{eau}) + S \quad (1.17)$$

où w est la teneur massique en humidité et S est un terme source (fonte de glace, pluie portée par le vent, etc.).

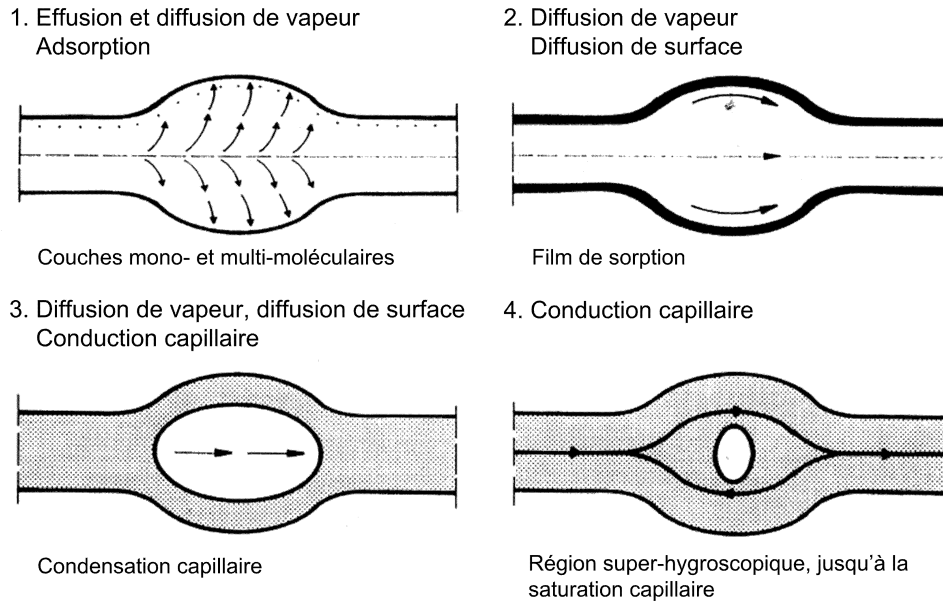


FIG. 1.5 : Phénomènes de transport à différents taux d'humidité, pour un modèle de pore cylindrique à diamètre variable (d'après [Krus, 1996])

1.1.4 Transferts couplés de chaleur et de masse

Les couplages entre transfert et stockage de chaleur et de masse peuvent intervenir de plusieurs manières, en particulier :

- la température et le taux d'humidité modifient certaines propriétés du matériau : la capacité calorifique et la conductivité thermique dépendent du taux d'humidité, en particulier dans les matériaux hygroscopiques.
- La température, en modifiant l'humidité relative, influe localement sur le taux d'humidité, entraînant indirectement une redistribution de l'humidité.
- L'énergie de l'eau (et de l'air) transportée s'ajoute au bilan énergétique d'un élément de volume de matériau. De même, une chaleur spécifique supplémentaire intervient dans le bilan.

Dans un gaz parfait, l'énergie interne et l'enthalpie sont reliées par la relation $H = U + PV$. En faisant l'hypothèse d'une évolution à pression constante (les variations de pression étant faibles devant les variations d'énergie), les relations de la thermodynamique permettent d'écrire $dH = dU$.

L'enthalpie de l'eau dépend de son état et de sa température (la référence étant prise pour de l'eau liquide à 0°C) ; pour une masse d'eau (liquide et vapeur) $m = m_l + m_v$, elle est donnée par la formule :

$$H_{eau} = m_l \cdot C_{p,l} \cdot T + m_v \cdot (L + C_{p,v} \cdot T) \quad (1.18)$$

1.1 Rappels théoriques - transferts d'énergie et de masse dans un matériau

H étant exprimée en Joules, $C_{p,l}$ et $C_{p,v}$ sont les chaleurs spécifiques à pression constante de l'eau liquide et vapeur. L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau à pression atmosphérique. La température est exprimée ici en degrés Celsius. De manière similaire pour l'air (qui reste à l'état gazeux dans la gamme de températures considérée) :

$$H_a = m_a \cdot C_{p,a} \cdot T \quad (1.19)$$

La variation d'enthalpie à l'intérieur d'un élément de volume s'écrit alors :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial(m_0 \cdot C_{p,0} \cdot T + H_{eau} + H_a)}{\partial t} \quad (1.20)$$

Les équations couplées qui régissent le comportement d'un matériau poreux peuvent alors s'écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{V} \frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(\vec{q}_{cond}) \\ \quad + \text{div}(\vec{g}_l \cdot C_{p,l} \cdot T + \vec{g}_v \cdot (L + C_{p,v} \cdot T)) \\ \quad + \text{div}(\vec{g}_a \cdot C_{p,a} \cdot T) \\ -\frac{\partial w}{\partial t} = \text{div}(\vec{g}_l + \vec{g}_v) \\ 0 = \text{div}(\vec{g}_a) \end{array} \right. \quad (1.21)$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{q}_{cond} = -\lambda(w, T) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \\ \vec{g}_l = K(w) \cdot \left(\overrightarrow{\text{grad}}(P_{succ}) + \rho_{eau} \cdot \vec{g} \right) \\ \vec{g}_v = -\delta_v(w) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(p_v) - 0,622 \cdot \frac{p_v}{P - p_v} \cdot k_a(w) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(P) \\ \vec{g}_a = -k_a \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(P) \end{array} \right.$$

La pression de succion P_{succ} et le taux d'humidité w étant décrites comme des fonctions de la pression de vapeur p_v et de la température T (équation 1.8 et courbe de sorption), nous avons bien 3 équations de bilan pour 3 variables d'état : T , p_v et P .

1.2 Positionnement de ce travail

Les travaux présentés ici s'intègrent dans la continuité ou en complémentarité d'études menées tant au niveau français qu'au niveau international, sur l'impact de l'humidité dans les bâtiments. Elles sont présentées ci-après.

1.2.1 Études françaises

Les projets décrits ici sont des lauréats des appels à projets nationaux dans le domaine de la recherche sur l'énergie dans le bâtiment et sont, à ce titre, encadrés par l'ADEME (Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'énergie). À l'exception du projet MACHA 2, ils font partie du programme PREBAT (Programme de Recherche sur l'Énergie dans le Bâtiment). Les projets MACHA, MACHA2 et HUMIRISK sont financés par l'ADEME et les projets OPTI-MOB et TRANSBATTIBOIS par l'ANR (Agence Nationale de Recherche).

Les projets MACHA (« Définir l'impact des transferts de masse sur les transferts de chaleur ») et MACHA 2 (« Mieux comprendre les transferts de masse pour maîtriser les transferts de chaleur »), prévus pour se dérouler respectivement sur 2006-2009 et 2007-2009, sont menés en partenariat par EDF, le CSTB, le CETHIL (Centre de Thermique de Lyon), et le LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Toulouse). Dans le cadre de MACHA2, le TREFLE (Transferts Écoulements Fluides Énergétique, Bordeaux) s'ajoute au consortium. Ces deux projets ont pour objectif de mieux appréhender les transferts de masse, et leur impact sur les transferts de chaleur. Ils visent notamment à mieux intégrer les transferts de masse et leurs effets dans des modèles thermiques à l'échelle du bâtiment. Deux autres points ont été retenus pour ces études : réaliser une étude expérimentale pour améliorer la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau par la méthode de la coupelle, ainsi qu'une étude du vieillissement des matériaux isolants sous vide.

Cette étude fait ressortir l'importance des transferts de masse sur les transferts d'énergie au sein d'une paroi (jusqu'à 20% d'augmentation) ; cet impact est plus faible à l'échelle globale du bâtiment, en raison notamment des infiltrations d'air et de la ventilation. De plus, sur les matériaux isolants sous vide, l'humidité peut être une source de forte dégradation du pouvoir isolant. Par ailleurs, des doutes sont soulevés sur la méthode de mesure de la perméabilité à la vapeur des matériaux : l'étude se poursuit actuellement.

Le projet Humirisk (« Renforcement de l'isolation dans l'existant - évaluation des risques liés à l'humidité ») consiste en une campagne de mesures, d'enquêtes, puis de modélisation numérique portant sur des bâtiments existants. L'étude porte sur l'influence de la rénovation thermique sur les risques liés à l'humidité. En effet,

une étude de l'agence nationale de l'habitat (ANAH) a montré que les logements réhabilités thermiquement étaient plus sujets à des problèmes d'humidité. Il peut y avoir plusieurs causes à cela : en particulier, la meilleure étanchéité à l'air des menuiseries neuves diminue la faculté du logement à évacuer l'humidité.

Des mesures et des enquêtes auprès des habitants sont menées dans des logements avant et après rénovation, afin d'évaluer ces risques et le niveau de confort. L'étude porte sur des logements individuels et collectifs, datant tous d'avant 1975 : les enquêtes et les diagnostics effectués avant les travaux ont montré que 70% des logements étudiés présentaient des problèmes d'humidité (condensation en surface des murs, remontées capillaires). Ce chiffre n'est pas généralisable (échantillon de 40 logements non représentatifs du parc), mais indique que l'humidité est bien un problème dans de nombreux logements. De plus, avec l'essor des réhabilitations thermiques, il convient de bien comprendre quels sont les mécanismes et les causes de ces problèmes. À cet effet, des simulations numériques sont menées en parallèle des campagnes de mesures. Le projet est mené par le CSTB, EDF, plusieurs CETE (Centres d'Études Techniques de l'Équipement, ministère en charge de l'équipement), et les industriels Saint-Gobain (isolation) et Aldes (ventilation), et court de 2006 à 2010.

Forts des constats des études précédentes, et pour accompagner l'essor des maisons à ossature bois, le projet opti-MOB (« Réduction des risques liés à l'humidité et aux transferts d'air dans les constructions à ossature bois », 2008-2011) a été mis en place autour du travail exposé ici. Les participants à cette étude sont le CSTB, le CETHIL, EDF, le FCBA (institut technologique Forêt, Cellulose, Bois, Ameublement), et les industriels Aldes et Ossabois (constructeur). L'objectif, à partir de données expérimentales et d'une modélisation numérique validée, est d'étudier l'effet de divers composants et différentes configurations de paroi sur le comportement hygrothermique d'une maison à ossature bois, puis d'envisager des solutions techniques afin de diminuer les risques de condensation et de dégradation.

Dans ce but, la cellule expérimentale présentée au chapitre 2.2 a été bâtie et instrumentée, une campagne de mesures des propriétés des matériaux utilisés a été mise en œuvre, et un modèle numérique doit être développé et validé (voir chapitres 3 et 4). Les retombées attendues sont d'une part une meilleure connaissance des risques liés à l'humidité dans les maisons à ossature bois, et des propositions de solutions techniques visant à les réduire.

Dans une optique similaire, le projet TRANSBATIBOIS (« Transferts dans les parois des bâtiments bois ») vise à mieux évaluer les performances hygrothermiques des maisons en bois de différents types constructifs : ossature, rondins, madriers, panneaux de bois reconstitués. Les propriétés spécifiques du bois massif vis-à-vis des transferts d'humidité seront mises en avant, à la fois numériquement et ex-

périmentalement. Ce projet a démarré en 2008, pour une durée de 3 ans. Il est mené par le CRITT bois (centre de ressources des industries du bois), le LERMAB (Laboratoire d'Études et Recherche sur le Matériau Bois, Nancy) et le LEMTA (Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, Nancy), ainsi que des constructeurs spécialistes des différents modes de construction à étudier, et s'appuiera sur des constructions réelles.

1.2.2 L'annexe 41 de l'agence internationale de l'énergie

L'agence internationale de l'énergie (AIE) met en place des programmes de coopération internationaux, gérés par l'ECBCS (« Energy Conservation in Buildings and Community Systems ») : ce sont les « annexes » ; ces annexes permettent à différents laboratoires de travailler ensemble sur un thème commun. Ces projets donnent lieu à des rapports finaux qui sont publiés. La liste de l'ensemble de ces projets (terminés et en cours), et les coordonnées pour commander les rapports finaux se trouve sur : <http://www.ecbcs.org/annexes/index.htm>.

L'annexe 41 (« Whole building heat, air, moisture [HAM] response »), qui s'est déroulée de 2003 à 2007, avait pour objectif de mieux comprendre les transferts couplés de chaleur et de masse dans les bâtiments afin d'évaluer leurs impacts. Le programme était divisé en 4 sous-tâches :

1. *Modeling principles and common exercises* : l'objectif de cette sous-tâche était de comparer entre eux et à des expérimentations différents modèles numériques, développés ou utilisés habituellement par les participants, afin d'étendre leur capacités et/ou d'améliorer leur fiabilité.
2. *Experimental analysis of moisture buffering* : l'étude, expérimentale et numérique, à l'échelle du matériau, des transferts d'humidité, et de l'interaction air-matériau. Des mesures de propriétés hygrothermiques ont en outre été effectuées sur quelques matériaux.
3. *Boundary conditions and whole building HAM analysis* : cette tâche traitait des conditions internes et externes aux bâtiments (collection de données sur l'occupation des bâtiments, détermination des charges dues à la pluie ou au vent), ainsi que de la manière de modéliser les échanges en surface (détermination de coefficients d'échange notamment).
4. *Applications - Indoor environment, energy, durability* : l'étude des désordres dans le bâtiment liés à l'humidité, selon les zones climatiques et les modes de vie, et de stratégies pour y remédier (mode de construction, régulation, ventilation...)

Ce programme se situait dans la continuité de 2 autres annexes : l'annexe 24 (« Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts »), achevée en

1.3 Caractérisations expérimentales à différentes échelles

1996, succédant à l'annexe 14 (« Condensation and energy »), achevée en 1992. Elles avaient montré la nécessité de prendre en compte globalement les transferts couplés de chaleur et d'humidité à l'échelle du bâtiment et de l'enveloppe.

Plus de 40 institutions partenaires, de 19 pays différents, ont participé à cette étude. La diversité des modèles évalués durant ces travaux, et les disparités observées entre les résultats, ont montré la complexité des phénomènes en jeu : selon les choix d'écriture ou de simplifications effectués, les résultats de calculs, sur des cas identiques, peuvent différer de manière importante.

La nécessité de plus d'expérimentations a ainsi été soulignée, tant à l'échelle du matériau qu'à l'échelle du bâtiment, afin de permettre une meilleure connaissance des phénomènes en jeu et une meilleure définition des propriétés des matériaux d'une part, et d'améliorer la fiabilité des modèles d'autre part.

1.3 Caractérisations expérimentales à différentes échelles

Dans ce contexte d'intérêt scientifique général sur les désordres liés à l'humidité dans les bâtiments, diverses installations expérimentales permettent d'étudier le comportement hygrothermique de matériaux, d'éléments de parois, de parois entières, ou bien d'un bâtiment. Chacune ayant un centre d'intérêt particulier, l'instrumentation déployée et les sollicitations appliquées sont différentes. Leur domaine d'application est donc nécessairement limité. Quelques exemples sont donnés ici, concernant principalement des ossatures bois, afin de comprendre les enjeux et l'intérêt du dispositif mis en place dans le cadre de nos travaux (présenté en détail au chapitre 2), qui possède également ses objectifs propres.

1.3.1 Propriétés de matériaux : exemples de bases de données

La première partie de ce chapitre (1.1) a fait apparaître diverses grandeurs caractéristiques du matériau au sein duquel les transferts se déroulent. La connaissance de ces caractéristiques est indispensable, tant pour interpréter et comprendre les résultats d'expérimentations menées à moyenne et grande échelle (telles que présentées ci-après), que pour mener à bien des calculs ou des simulations numériques.

Des campagnes de mesures, résultant sur des bases de données de propriétés de matériaux de construction, ont été menées par le passé.

L'une des tâches de l'annexe 24 de l'AIE (« Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts ») a consisté en la compilation des données disponibles à cette époque (1996). Le rapport final [Kumaran, 1996] regroupe ainsi des mesures

effectuées par différents laboratoires, sur 32 matériaux de construction et de finition parmi les plus courants (béton, brique, plaque de plâtre, laine de verre...). Ce document se complète, en annexe, de résultats obtenus de manière similaire lors de l'annexe 14 de l'AIE (« Condensation and energy »).

Plus récemment (2002), une base de données a été établie dans le cadre d'un projet de recherche de l'ASHRAE (1018-RP, « A thermal and moisture transport property database for common building and insulating materials »). [Kumaran *et al.*, 2002] regroupe les caractéristiques de 38 matériaux de construction d'usage courant ; on y trouve notamment de nombreux produits à base de bois.

La norme NF EN ISO 10456 (« Matériaux et produits pour le bâtiment - Propriétés hygrothermiques : Valeurs utiles tabulées et procédures pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles ») regroupe des valeurs de propriétés à utiliser dans le cadre de calculs réglementaires (ces valeurs sont notamment reprises en France dans la réglementation thermique). Ces valeurs sont, pour partie, basées sur les résultats de l'annexe 24 de l'AIE.

[Vinha, 2007] a procédé à des mesures sur 42 matériaux, dans le cadre d'une étude, expérimentale et numérique, sur le comportement hygrothermique de parois de bâtiment, en laboratoire et en site réel (voir ci-après).

Par ailleurs, les modèles numériques disposent généralement d'une base de données de matériaux.

1.3.2 Expérimentations en grandeur réelle

Les expérimentations qui sont présentées ci-après ont été réparties en 2 catégories : les travaux menés en laboratoire, et ceux pour lesquels l'objet étudié est soumis au climat extérieur.

Dispositifs situés en ambiance contrôlée

Dans le but d'étudier le séchage de parois, le Centre National de Recherche - Canada (CNRC) dispose d'une chambre climatique ($-47^{\circ}C$ à $+48^{\circ}C$, 10% à 100% d'humidité relative), dotée d'un système de pesée, permettant l'insertion de parois entières (2,43 m \times 2,43 m). [Maref *et al.*, 2003, 2004] présentent les résultats d'une telle étude. Les parois sont pré-conditionnées dans un état saturé en humidité par immersion, puis l'évolution de leur masse est enregistrée, dans des conditions de température et d'humidité contrôlées. Ce système permet d'étudier le comportement de parois entières dans une dynamique simple (séchage), et dans des conditions

1.3 Caractérisations expérimentales à différentes échelles

d'humidité très élevée, qui est une région souvent problématique pour les calculs numériques comme pour la détermination des propriétés hygrothermiques des matériaux. En revanche, seule l'évolution de la masse totale est connue : le profil de séchage dans la paroi n'est pas déterminé.

[Vinha, 2007] expose une étude, effectuée à l'Université de Technologie de Tampere (Finlande), au cours de laquelle des portions de paroi (représentant la partie courante d'un mur en ossature bois, c'est à dire la partie isolée) sont soumises, dans un caisson climatique, à des conditions climatiques différentielles (température, humidité, pression). Ce dispositif permet de déterminer la réaction à des sollicitations représentatives de celles subies par une paroi de bâtiment : un côté chaud, la température variant peu, un côté froid pouvant subir de fortes variations de température et d'humidité relative. La paroi est instrumentée dans son épaisseur, à distance et à proximité de la structure en bois encadrant l'échantillon de paroi.

Un autre type d'étude a été mené à l'Université Préfectorale d'Akita (Japon) : une pièce de petites dimensions (environ 5 m^3), placée dans un caisson climatique, est conçue de manière à étudier la capacité de tampon hygroscopique du parement intérieur. Pour cela, une feuille d'aluminium est placée entre celui-ci et le reste de la paroi. [Yoshino *et al.*, 2009] montre ainsi l'effet d'une part du taux de renouvellement d'air, d'autre part de la proportion de surface couverte par des matériaux hygroscopiques, sur la réponse de la pièce à une sollicitation hygrique. Cette cellule expérimentale a été utilisée comme base pour un exercice commun de validation numérique de l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Énergie [Woloszyn et Rode, 2008a]. Seules les conditions de température et d'humidité dans le volume sont mesurées.

L'Université de Concordia (Montréal, Canada) dispose d'une chambre climatique de grandes dimensions ($7 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 6,6 \text{ m}$), qui permet de soumettre à des conditions de température et d'humidité contrôlées un bâtiment expérimental de 2 niveaux. Une étude récente [Vera *et al.*, 2008] y a été menée, afin d'étudier la réponse d'une ou deux pièces, et des parois, à différentes sollicitations. Parmi les paramètres testés, citons :

- le matériau du parement intérieur ;
- le taux de renouvellement d'air ;
- l'ameublement ;
- une circulation d'air ouverte ou fermée entre les deux niveaux ;

Le système de mesure permet de connaître les conditions de température et d'humidité en plusieurs points de chaque pièce, ainsi que dans les parois. Les résultats de cette large étude sont disponibles en annexe des rapports finaux de l'annexe 41 de l'AIE [Fazio *et al.*, 2008].

Dispositifs d'exposition au climat extérieur

Des dispositifs expérimentaux existent dans différents pays, qui permettent d'exposer un bâtiment expérimental, ou bien seulement une façade, à des conditions climatiques naturelles.

L'institut Fraunhofer de physique du bâtiment (IBP) de Holzkirchen, en Allemagne, dispose d'une installation comportant 2 pièces jumelles donnant au Sud sur l'extérieur, leurs autres faces étant internes à un bâtiment dont l'ambiance est contrôlée. Cette installation a été utilisée afin d'évaluer par comparaison directe l'effet de tampon hygroscopique de différents parements intérieurs [Holm et Künzel, 2006] ; elle a également servi de base à un exercice commun de validation numérique de l'annexe 41 de l'AIE [Woloszyn et Rode, 2008a].

Dans les installations suivantes, c'est l'intérieur de la paroi qui est le principal objet d'attention : les parois testées sont alors instrumentées de manière à suivre leur évolution en température et en humidité.

Le FCBA possède, sur son site de Bordeaux, un bâtiment d'exposition de parois. Il s'agit d'un bâtiment « de garde » qui abrite plusieurs cellules ; chaque cellule comporte 5 parois très fortement isolées, un côté restant libre pour accueillir la paroi à tester. Ainsi, il est possible de mesurer les conditions hygrothermiques dans la paroi en « grandeur d'emploi », en contrôlant le climat côté intérieur. Cette installation sera utilisée dans le projet PREBAT « opti-MOB » (étude en cours).

Deux autres bancs d'exposition de parois peuvent être mentionnés : une étude menée en Norvège [Geving et Uvsløkk, 2000] a permis la mise en place d'un bâtiment dont les faces Est et Ouest étaient chacune composée de plusieurs éléments de paroi (1,20 m de large chacun), permettant ainsi la comparaison directe de différentes compositions (isolant, pare-vapeur, etc.) Des mesures sont effectuées dans la paroi en partie haute et basse, ainsi que dans les éléments d'ossature situés au milieu de chaque panneau. Les mesures se sont déroulées sur une période de plus de 3 ans ; les résultats, ainsi que les données climatiques intérieures et extérieures peuvent être obtenus auprès des auteurs.

Enfin, au CNRC (Canada), se trouve une maison expérimentale (2 niveaux, 160 m² de superficie), utilisée à trois fins : d'une part évaluer l'efficacité de différents systèmes de ventilation (naturelle, mécanique, hybride), d'autre part comparer les performances de 2 systèmes de chauffage (air pulsé ou plancher chauffant) ; enfin, le mur Ouest comporte un emplacement permettant d'insérer plusieurs éléments de paroi afin de mener une étude comparative directe de leur comportement [Maref *et al.*, 2007], l'intérieur de la pièce étant contrôlé.

Dans sa thèse, [Vinha, 2007] présente également une maison d'habitation (1 niveau, 107 m² de surface au sol), instrumentée en paroi Sud. Des mesures sont effectuées à l'intérieur de la pièce et dans la paroi. La particularité de cette étude est que la maison a été habitée durant la majeure partie de l'étude [Käkelä et Vinha, 2002].

1.4 Synthèse - Objectifs de ce travail

Les problèmes liés à l'humidité dans les bâtiments font l'objet d'investigations de plus en plus nombreuses dans la communauté scientifique. En effet, l'humidité peut être cause de dégradations du bâti, de l'hygiène et des performances énergétiques d'un bâtiment.

Différents types d'approche sont possibles : études numériques, expérimentales ou *in-situ*. Différentes échelles d'études sont également envisageables :

- à l'échelle du matériau : approche microscopique. Elle vise à comprendre et à déterminer les lois physiques qui gouvernent les transferts d'énergie et de masse au sein d'un matériau ;
- à l'échelle d'un composant, d'une paroi : approche phénoménologique. Elle vise à décrire, à l'échelle macroscopique, les transferts dans une paroi, à l'aide de potentiels moteurs mesurables ;
- à l'échelle du bâtiment : intégration des problématiques de traitement et de renouvellement d'air, d'occupation du bâtiment, de singularités constructives.

Les expérimentations situées en conditions climatiques artificielles permettent d'étudier, dans des conditions simples, et maîtrisées, des phénomènes complexes. C'est une étape indispensable à la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu, de même que pour la validation de modèles et de codes de calculs. À l'inverse, une exposition à des conditions naturelles permet de suivre le comportement de bâtiments ou de parois dans des conditions correspondant à celles de leur utilisation réelle ; en outre, les conditions externes tels que pluie, vent, ensoleillement et rayonnement céleste sont difficiles à reproduire, en particulier de manière combinée. Ces expérimentations constituent « l'étape suivante » vers une meilleure compréhension des bâtiments réels. Elles permettent en outre un suivi sur le long terme.

Les études présentées en 1.2 ont mis en évidence le besoin d'approches expérimentales supplémentaires. Les maisons à ossature bois étant particulièrement sensibles aux transferts de masse en raison même de leur mode constructif, nous avons choisi une approche à l'échelle du bâtiment.

Chapitre 1 Contexte scientifique

L'originalité de cette étude repose sur sa volonté d'étudier aussi bien le bâtiment dans sa réponse globale que dans ses détails constructifs. Elle se base sur un support expérimental représentatif d'un bâtiment à échelle réelle, exposé à des conditions climatiques naturelles. Notre intérêt se porte sur le comportement de la partie courante des parois, mais aussi sur les ponts thermiques créés par l'ossature. Le climat interne résultant est également examiné : les parois étant toutes identiques, ce paramètre est significatif. Une campagne de mesures des caractéristiques hygrothermiques des matériaux complète ces données.

Cette étude expérimentale est accompagnée d'un travail de modélisation. Les résultats expérimentaux doivent permettre de vérifier la validité du modèle et de le consolider. En effet, si certains paramètres ne peuvent pas être contrôlés, ils peuvent en revanche être mesurés (conditions météorologiques par exemple). De même, et contrairement au cas d'une étude dans une habitation occupée, les charges internes sont bien connues. L'ensemble de ces données permet ainsi la validation de modèles de bâtiments complets, ou de certains éléments pris isolément.

Chapitre 2

Support expérimental

2.1 Cahier des charges de la cellule expérimentale

L'installation expérimentale décrite ici a pour objectif de permettre l'étude à la fois globale et détaillée du comportement hygrothermique d'une maison à ossature bois. À cet effet, un cahier des charges a été imposé pour la construction de la cellule. Celle-ci doit :

- être représentative d'une maison à ossature bois (volume d'une pièce d'habitation) ;
- comporter une forte proportion de bois, afin d'accentuer les phénomènes liés à la présence de ce matériau (ponts thermiques, adsorption/désorption d'humidité) ;
- comporter un bardage et un parement intérieur qui doivent pouvoir être démontés et ré-installés aisément et sans dommages, afin de pouvoir réaliser des modifications dans la composition des parois ;
- comporter une réservation dans l'ossature pour l'installation future d'une fenêtre ;
- posséder un système de portes isolées thermiquement, afin d'assurer une homogénéité dans l'isolation de la cellule ;
- enfin, les parois horizontales doivent être fortement isolées, et munies d'un pare-vapeur.

L'instrumentation prévue doit permettre d'étudier divers détails constructifs, ainsi que de connaître le comportement global de la cellule expérimentale. Des capteurs de température et d'humidité sont ainsi placés dans le volume de la pièce ; la paroi a été instrumentée en partie courante, dans son épaisseur, pour pouvoir déterminer le profil de température et d'humidité. Plusieurs points singuliers de l'enveloppe sont également instrumentés : montant, angle vertical, jonctions avec les parois horizontales.

Chapitre 2 Support expérimental

La cellule test est conçue de manière à être modifiable, ce qui permet de tester différents éléments constructifs pour les parois verticales. Les modifications envisagées portent notamment sur les éléments suivants :

- présence ou non d'un pare-vapeur ;
- le parement intérieur sera changé ;
- la nature, l'épaisseur de l'isolant et son placement (entre les montants ou au-dessus) seront modifiés ;
- une fenêtre sera ajoutée dans la paroi Sud, pour évaluer l'impact des apports solaires et des pertes liés à une paroi vitrée.

Pour chaque configuration constructive, différents scénarios de charges internes (chauffage, génération de vapeur), et différents régimes de ventilation (ventilation faible ou importante, simple ou double flux, extraction ou insufflation, sur-ventilation nocturne) seront mis en œuvre.

Cette étude étendue est menée dans le cadre du PREBAT « opti-MOB », présenté au chapitre 1.2. Notre travail en constitue une première étape : définition, construction et instrumentation de la cellule, étude expérimentale dans le cas de sollicitations simples, sur les premières configurations mises en œuvre, premières étapes de développement et de validation d'un modèle numérique de cette cellule.

2.2 Description physique

La cellule est située sur la plate-forme d'exposition du CSTB à Saint-Martin d'Hères (latitude : $45.2^{\circ}E$, longitude : $5.77^{\circ}N$) ; celle-ci a déjà accueilli une cellule expérimentale de dimensions similaires, bâtie dans le cadre de la thèse de Xavier Faure [Faure, 2007] et constitue un terrain dégagé, à distance (quelques dizaines de mètres) des autres bâtiments du site. L'exposition sur ce site, entouré de montagnes à l'Est et à l'Ouest notamment, offre une absence de masques proches vis-à-vis du rayonnement solaire, en particulier le matin et le soir. La cellule a été construite en février et mars 2008 par une entreprise extérieure au CSTB ; la figure 2.1 illustre quelques étapes de la construction.

La cellule comporte une pièce principale et un comble ventilé naturellement ; ses dimensions externes sont de $5,03\text{ m} \times 5,03\text{ m}$, hauteur de faitage $5,39\text{ m}$ (la cellule est posée sur des pieds métalliques de 10 cm de haut). Les 4 parois verticales ont été orientées suivant les 4 directions cardinales (Nord, Sud, Est et Ouest). Le toit est à deux pentes (30°), orientées Nord et Sud, la couverture est en tuiles. Le plancher de la cellule est surélevé par rapport au sol, par le biais de pilotis ($0,50\text{ m}$), afin de simplifier les échanges en face inférieure du plancher, et la modélisation qui pourra en être faite.

2.2 Description physique



FIG. 2.1 : Photographies illustrant la construction et l'environnement de la cellule

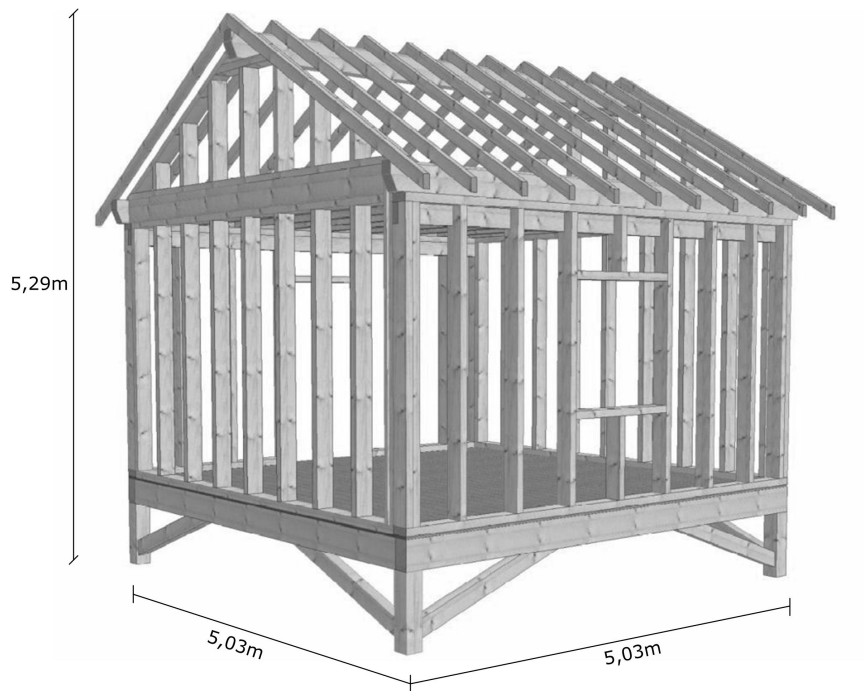


FIG. 2.2 : Dessin de l'ossature de la cellule test, vue sous l'angle Sud-Ouest (fourni par l'entreprise de construction)

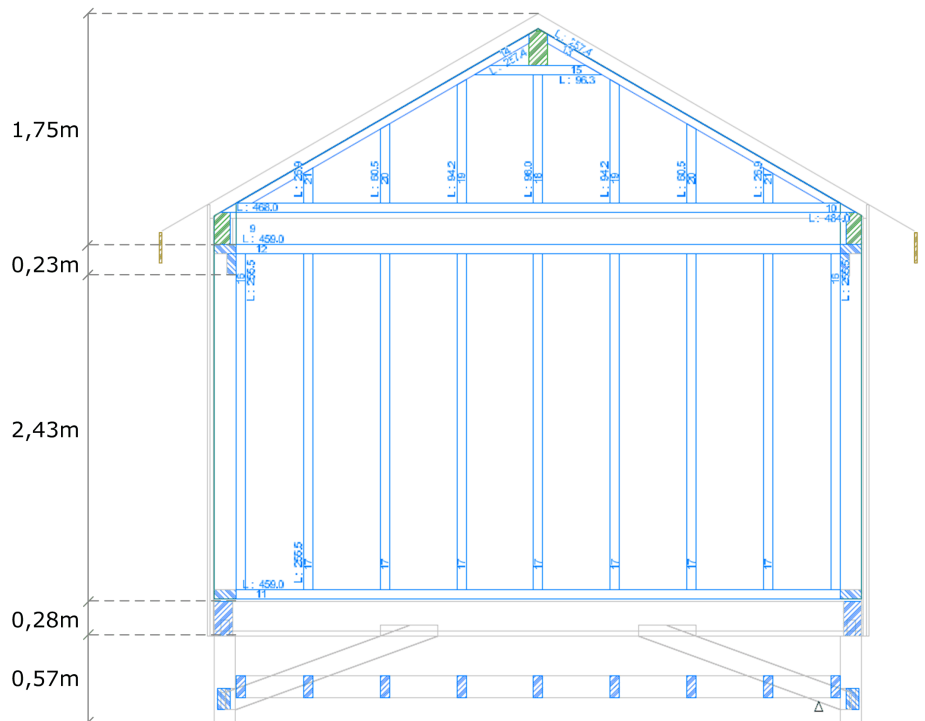


FIG. 2.3 : Plan en élévation de la cellule(fourni par l'entreprise de construction)

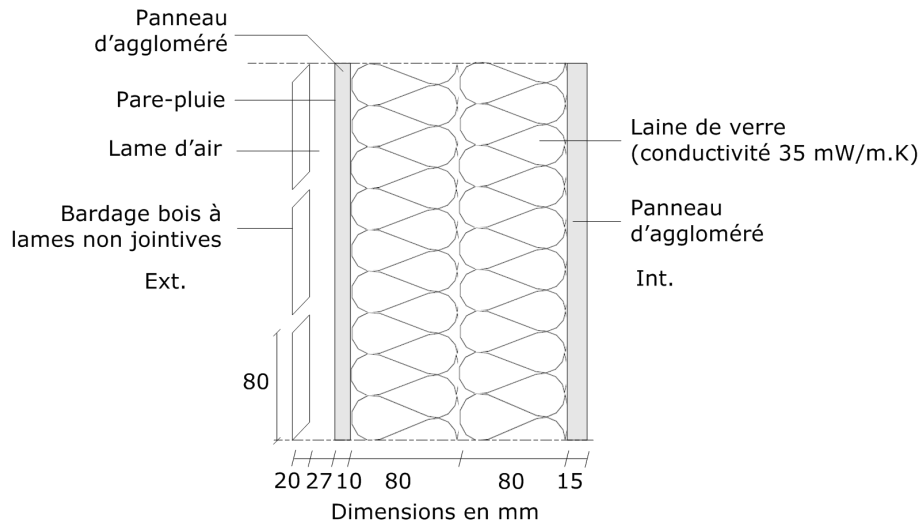


FIG. 2.4 : Schéma en coupe d'une paroi verticale, en section courante

La figure 2.2 montre un dessin de l'ossature, la figure 2.3 en donne une coupe verticale. Une porte ($0,85\text{ m} \times 2,10\text{ m}$) se trouve en paroi Nord. Un emplacement pour une fenêtre ($1,18\text{ m} \times 1,15\text{ m}$) est réservé au Sud.

L'ensemble de l'ossature est réalisée en épicea. L'entraxe des montants verticaux est d'environ $0,55\text{ m}$ (l'espacement varie légèrement selon les parois, il est irrégulier notamment au Nord et au Sud), leur section étant de $0,07\text{ m} \times 0,165\text{ m}$. La dimension et l'espacement des montants ont été fixés en référence à l'agrément technique européen [ETA-05/0022, 2005] ; il présente en particulier une proportion de bois dans les parois importante (sections plus importantes que les sections couramment utilisées en France). Ceci a pour effet d'amplifier les ponts thermiques, et de manière plus générale les effets de la présence d'une ossature dans la paroi (sorption/désorption saisonnière par le bois par exemple). Les plans d'exécution sont fournis en annexe A.

La partie courante de la paroi (c'est à dire en dehors des montants) est composée comme suit (en partant de l'intérieur vers l'extérieur ; la figure 2.4 en donne le schéma) :

- parement intérieur : panneau de particules agglomérées (15 mm) ;
- isolant : laine de verre de conductivité nominale de 35 mW/m.K (160 mm) ;
- contreventement : panneau de particules agglomérées (10 mm) ;
- pare-pluie : film « Ubbink multivap », étanche à l'air et à l'eau liquide, perméable à la vapeur ;
- lame d'air (27 mm) ;
- bardage à claire-voie, mélèze (20 mm).



FIG. 2.5 : Vues de l'intérieur de la cellule : à gauche la double porte, à droite l'équipement

Cette composition constitue la configuration dite « de référence ». Des panneaux de particules ont été préférés à des plaques de plâtre pour le parement intérieur afin de pouvoir le démonter et le remonter aisément et sans dommages.

Une première modification a été effectuée dans le cadre de ce travail : un pare-vapeur a été ajouté, entre le parement intérieur et l'isolant. Sa résistance à la vapeur est $S_d = 78 \text{ m}$.

L'étanchéité à l'air est assurée par la membrane pare-pluie, rendue continue sur les parois verticales par l'utilisation de ruban adhésif. De plus, les panneaux de contreventement sont jointoyés à l'aide de mastic siliconé.

Afin d'avoir une isolation homogène sur toutes les surfaces verticales, le système d'accès à la cellule est constitué de deux portes successives dans l'épaisseur de la paroi (voir figure 2.5). Chaque porte est couverte par du polystyrène extrudé (au total une épaisseur de 200 mm).

Afin de concentrer l'étude sur les parois verticales, le plancher et le plafond sont fortement isolés (400 mm de laine de verre de conductivité thermique nominale de 32 mW/mK); de plus, une double couche de pare-vapeur ($2 \times S_d = 150 \text{ m}$) est installée entre l'isolant et le parement intérieur (plaque de plâtre de 12,5 mm d'épaisseur pour le plafond, OSB de 20 mm d'épaisseur pour le plancher). Ainsi, l'influence des parois horizontales sur le volume est limitée.

La jonction entre le plafond et les parois verticales est traitée de manière à limiter l'effet de pont thermique. Au niveau du plancher, en revanche, la jonction avec

les parois verticales n'a pas pu être traitée pour des raisons constructives. Il existe donc un pont thermique important, qui est de ce fait instrumenté (voir section 2.3). Les détails constructifs de ces jonctions sont donnés en annexe A.

La pièce principale est représentative d'une pièce d'habitation, avec un volume intérieur de $4,56 \text{ m} \times 4,55 \text{ m} \times 2,41 \text{ m} \simeq 50 \text{ m}^3$. La ventilation du comble se fait par le biais de deux ouvertures grillées sur les pignons Est et Ouest.

La cellule est équipée d'un système de ventilation mécanique, permettant d'assurer un renouvellement d'air en simple flux (en extraction ou en insufflation) ou en double flux avec ou sans récupération de chaleur, avec un débit pouvant varier de 0 à $140 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit environ 3 volumes par heure), programmable et contrôlable à distance. Le bloc moteur-échangeur est situé dans le comble. Dans un premier temps, ce système est utilisé en simple flux extraction ; la prise d'air se fait alors par des grilles d'aération situées dans les portes (au Nord), l'extraction par une bouche située dans le plafond à proximité du mur Sud ; le moteur rejette ensuite l'air au travers d'une bouche située en pignon Ouest.

Afin d'étudier la réponse d'une telle maison à ossature bois aux sollicitations liées à une occupation, différents scénarios de charges internes sont mis en œuvre. Toutefois, dans un premier temps, seules des sollicitations simples sont effectuées, et ce afin de mieux analyser le comportement de la cellule, et de valider le modèle pas à pas. Pour effectuer ces scénarios de charges internes, un convecteur électrique, équipé d'un thermostat programmable, est installé dans la cellule, de même qu'un générateur de vapeur par ultrason, branché sur un programmateur horaire. Il génère en réalité du brouillard, c'est à dire de l'eau liquide sous forme de micro-gouttelettes, qui s'évaporent ensuite très rapidement. Cet équipement est présenté sur la figure 2.5.

Récapitulatif des caractéristiques principales de la cellule :

- Maison à ossature bois en grandeur d'emploi ($\simeq 20 \text{ m}^2$, hauteur sous plafond $\simeq 2,40 \text{ m}$), en exposition extérieure ;
- Proportion de bois importante dans les parois ;
- Modularité de la construction, pour modifications multiples ;
- Équipement permettant de générer des charges internes ;
- Dans sa configuration initiale, les parois, en partie courante, ont les coefficients de transmission suivants :
 - $U_{\text{parois verticales}} = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ (la RT2005 impose $U < 0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$),
 - $U_{\text{porte}} = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ (valeur indicative, présence d'une lame d'air),
 - $U_{\text{parois horizontales}} = 0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- Les ponts thermiques sont principalement ceux liés aux montants, et à la jonction entre le plancher et les murs.

2.3 Instrumentation

L'objectif principal fixé au système de mesures est de pouvoir connaître le comportement hygrothermique de l'ensemble de la cellule test : comportement de l'enveloppe, y compris les points singuliers, réponse du volume, consommation énergétique.

2.3.1 Capteurs utilisés

Pour le choix des capteurs, nous nous sommes inspirés d'un travail réalisé précédemment au CSTB : [Pratinthong, 2004] a étudié les transferts d'humidité dans des panneaux « sandwich », utilisés comme parois de bâtiments exposés à des climats critiques (Guyane, Finlande).

Les principaux capteurs utilisés sont de 3 types : thermohygromètres, thermocouples, fluxmètres. Ils sont décrits ci-après. Le tableau 2.1 (page 32) récapitule le nombre et les principales caractéristiques de chaque type de capteur (gamme de fonctionnement, précision : ces données sont fournies par les fabricants).

Thermohygromètres

Les thermohygromètres sont utilisés pour mesurer la température et l'humidité relative de l'air. La figure 2.6 montre un tel capteur. Le modèle utilisé est le Vaisala Humichip 17204HM, de type capacitif : l'élément sensible du capteur est un film polymère dont la capacité électrique varie selon l'humidité relative ambiante. La mesure de température correspondante est effectuée par une thermistance platine (la résistance électrique du matériau dépend de la température).

L'électronique embarquée dans le capteur permet de convertir ces deux grandeurs en tensions (sortie analogique 0 – 1 V), directement proportionnelles à l'humidité relative ou à la température. Ses dimensions (7 mm × 12 mm × 29 mm) lui permettent d'être inséré dans une paroi en perturbant peu les conditions. Nous mesurons donc la température et l'humidité relative dans la poche d'air entourant le capteur, supposée être à l'équilibre avec le matériau environnant. En outre, un filtre protège l'élément sensible de la poussière.

Des tests ont été effectués afin de vérifier que les capteurs réagissaient correctement à des échelons de température, d'humidité relative, et à des variations de température et d'humidité relative couplées correspondant à une pression de vapeur constante (voir annexe B).

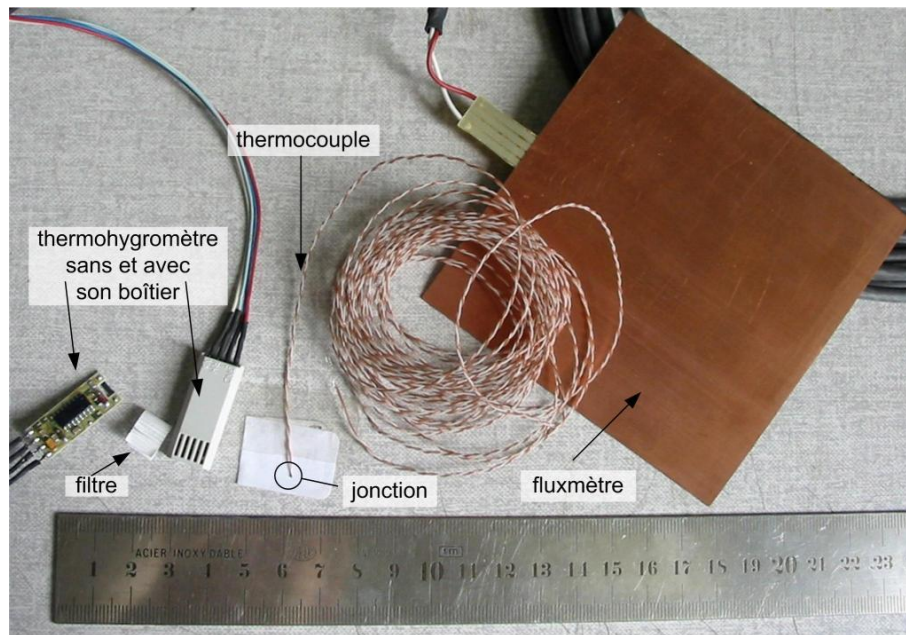


FIG. 2.6 : Principaux capteurs installés dans la cellule : un thermohygromètre, un thermocouple et un fluxmètre

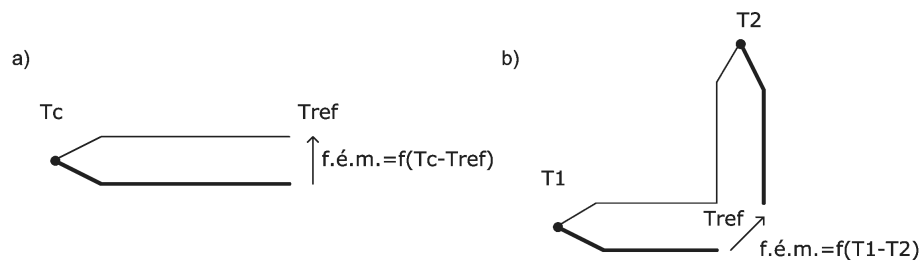


FIG. 2.7 : Principes de mesures par thermocouples : a) en direct, b) en différentiel

Thermocouples

Un thermocouple est constitué de deux matériaux conducteurs différents, soudés à une extrémité (la jonction de mesure ou soudure chaude) ; l'écart de température entre ce point (placé à l'endroit où l'on souhaite effectuer une mesure) et la jonction dite de référence (ou soudure froide) génère une force électromotrice (f.é.m.) mesurable entre les deux bornes constituant la soudure froide. La mesure (par thermistance par exemple) de la température de référence permet alors d'accéder à la valeur de la température recherchée. Il s'agit dans ce cas d'une mesure « directe ».

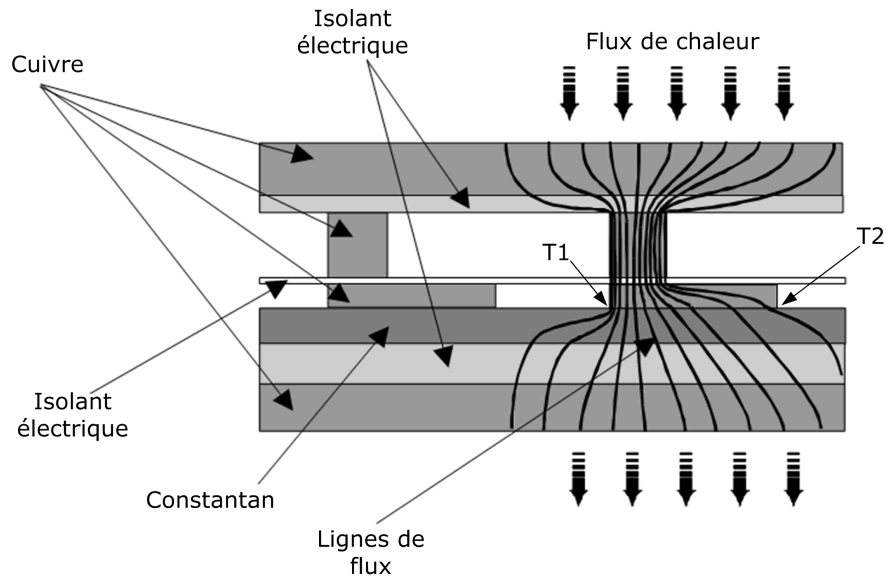


FIG. 2.8 : Principe de fonctionnement d'un fluxmètre tangentiel (source : [Kada *et al.*, 2004])

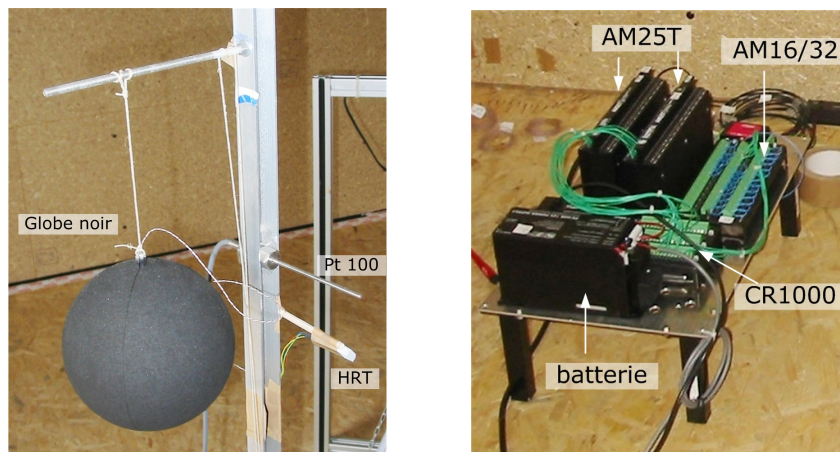


FIG. 2.9 : À gauche : globe noir et sonde platine ; à droite : une centrale d'acquisition et 3 multiplexeurs

Lorsque seul l'écart de température entre deux points est nécessaire, le branchement sera effectué « en différentiel », ce qui consiste à brancher en série deux thermocouples : cette méthode permet de s'affranchir de la mesure d'une température de référence, et d'obtenir une plus grande précision. La figure 2.7 donne un schéma de principe pour les deux types de branchements. Les thermocouples sont classés suivant les métaux associés ; chaque couple possède une caractéristique (f.é.m. - écart de température) propre. Les thermocouples installés dans la cellule sont de type T (cuivre-constantan : le constantan est un alliage cuivre/nickel). Leur diamètre est de 0,5 mm, ils perturbent donc très peu le milieu environnant.

Fluxmètres

Les fluxmètres sont utilisés pour mesurer la densité de flux de chaleur traversant une surface donnée. Généralement, un fluxmètre est constitué par un ensemble de thermocouples en série, placés de part et d'autre d'une plaque métallique mince de conductivité thermique bien connue. L'écart de température entre les deux faces crée une tension que l'on mesure ; la conductivité étant connue, le flux de chaleur se déduit d'après la loi de Fourier (équation 1.1).

Les fluxmètres mis en place dans la cellule, fournis par Captec, sont de type tangentiel : le schéma 2.8 en illustre le fonctionnement. Des plots en cuivre sont utilisés pour concentrer le flux de chaleur transversal ; lorsque la section s'élargit, de manière dissymétrique, l'écart de température $T_1 - T_2$ est fonction de l'intensité du flux de chaleur. Le thermocouple créé par l'association cuivre-constantan délivre alors une tension, fonction de cet écart. L'association en série d'un grand nombre de ces thermocouples accroît la sensibilité du fluxmètre. Cette technique permet d'obtenir des capteurs d'épaisseur totale très faible (0,4 mm).

Autres mesures

Une sonde platine (Pt100, thermistance dont l'élément sensible est un enroulement de platine) est utilisée afin de mesurer la température d'air plus précisément qu'avec les thermohygromètres. Le capteur est de plus placé dans un « doigt de gant » métallique, permettant de diminuer fortement l'influence du rayonnement sur la température d'équilibre du capteur, approchant mieux la température d'air. La sonde platine possède une inertie plus importante que les autres capteurs.

À l'inverse, une mesure de température résultante est effectuée à l'aide d'un globe noir : un thermocouple est placé à l'intérieur d'une sphère noire et mat de 10 cm de diamètre. Celle-ci échange par rayonnement et par convection avec l'air qui l'entoure, et permet de mieux rendre compte de la sensation perçue par un occupant. Ces deux capteurs sont présentés sur la figure 2.9.

Type	Nombre	Précision	Gamme de mesure
Thermocouples	87	$\pm 1^{\circ}C$	$-40^{\circ}C$ à $+133^{\circ}C$
Thermohygromètres	55	$\pm 5\%$ HR, $\pm 0.8^{\circ}C$	0% à 100% HR, $-19^{\circ}C$ à $+80^{\circ}C$
Fluxmètres	7	$\pm 3\%$	
Sonde platine	1	$\pm 0,03^{\circ}C$; à $0^{\circ}C$, $\pm 0,12^{\circ}C$ à $100^{\circ}C$	$-50^{\circ}C$ à $+350^{\circ}C$
Capteurs d'intensité	2	$\pm 1,5\%$	0 à 20 A
Capteur de masse	1	$\pm 1,5$ g	0 à 10 kg

TAB. 2.1 : Récapitulatif des capteurs utilisés

Enfin, pour connaître les charges internes générées par l'équipement de la cellule, deux capteurs mesurent l'intensité électrique, permettant de déterminer la puissance électrique dissipée dans la cellule en multipliant par la tension (220 V). L'un est utilisé pour la puissance totale entrant, le second pour la puissance dissipée par le moteur de la ventilation, situé dans le comble ; la différence donne la puissance dissipée dans la pièce principale. Un capteur de masse permet de connaître le débit de vapeur produite en suivant la décroissance de la masse du générateur de vapeur.

Système d'acquisition

L'acquisition des données se fait par la lecture et l'enregistrement des tensions délivrées par chacun des capteurs. Ce double travail est effectué par le biais de centrales d'acquisition Campbell. Les centrales effectuent une mesure par minute, puis une moyenne est calculée toutes les dix minutes. Les fichiers de données enregistrent donc une valeur par pas de temps de dix minutes.

Trois centrales sont utilisées : deux sont du type CR1000, une du type CR800 (la différence principale tient au nombre de voies de mesure). Ces centrales représentent le maillon final de la chaîne d'acquisition : elles sont complétées par des multiplexeurs, dont le rôle est de démultiplier le nombre de voies de mesures. Ils sont de deux types : AM16/32 et AM25T. Ces derniers comportent 25 voies de mesure, et sont spécialement conçus pour les thermocouples : un barreau de cuivre homogénéise la température de soudure froide pour toutes les voies ; celle-ci est mesurée par une sonde platine. Les AM16/32 sont plus généralistes, et comportent 32 voies de mesures. Pour réaliser nos mesures, 4 AM16/32 et 5 AM25T sont installés. La figure 2.9 (à droite) présente une centrale CR1000, deux AM25T et un AM16/32.

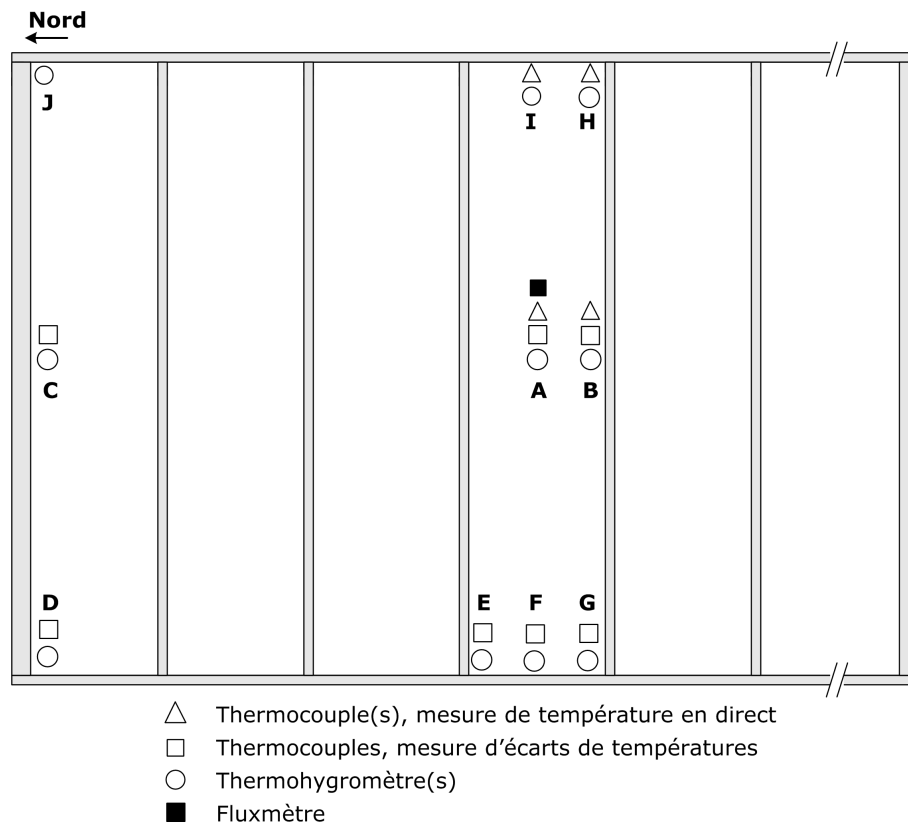


FIG. 2.10 : Emplacements instrumentés dans la paroi Est (vue de l'intérieur)

2.3.2 Placements des capteurs

Afin de suivre le comportement hygrothermique de l'enveloppe, des capteurs ont été installés à la fois dans la partie courante de la paroi et à proximité des points singuliers liés à l'ossature. La paroi Est a été privilégiée en termes d'instrumentation, c'est en effet celle qui présente les plus forts contrastes en termes de température (lever du soleil). La figure 2.10 montre les emplacements qui y sont instrumentés. L'angle Nord-Est en particulier a été fortement instrumenté, étant celui qui semblait le plus soumis au risque de condensation.

Sur les murs Nord, Sud et Ouest, seuls les emplacements A et B sont équipés de capteurs (à l'exception de l'angle Nord-Est, équipé symétriquement). Des capteurs sont également placés dans le plancher et le plafond, ainsi que dans le volume de la pièce, dans le comble, et sous la cellule. Enfin, des capteurs sont installés sur le cadre de la porte, et sur celui de la future fenêtre.

Les deux emplacements (A et B) correspondent aux parois verticales modélisées dans le cadre de ces travaux (voir chapitre 3.3); leur instrumentation est détaillée ci-après. L'instrumentation des zones C à J est détaillée en annexe C.

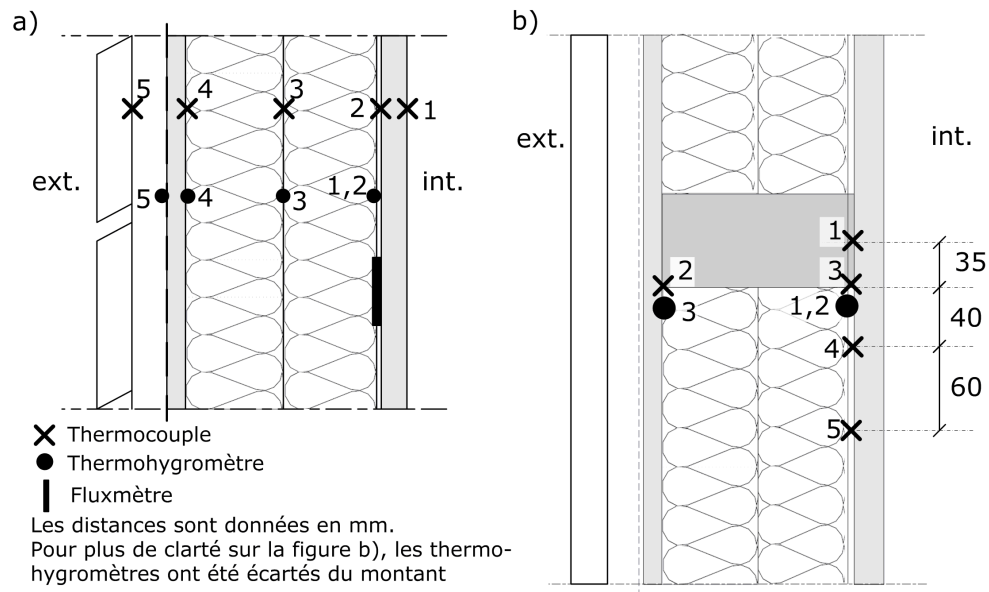


FIG. 2.11 : Placement des capteurs dans la paroi : a) emplacement A, coupe verticale, b) emplacement B, coupe horizontale

En section courante de l'enveloppe, mi-hauteur : emplacement A

Cette zone correspond à la partie isolée de l'enveloppe ; le schéma de placement des capteurs est donné par la figure 2.11.a (vue en coupe verticale). Des thermohygromètres sont placés à différentes profondeurs dans la paroi (le thermohygromètre 1 est installé entre le parement intérieur et le pare-vapeur, lorsque celui-ci est en place). Ils permettent de déterminer le profil de la température et de l'humidité relative dans la paroi. Les thermocouples 2, 3 et 4 sont branchés en différentiel : ils mesurent l'écart de température avec la température de surface, au niveau du thermocouple 1. L'objectif était de « doubler » les thermohygromètres, afin de s'assurer de leur fiabilité en température : les mesures effectuées montrent que les 2 types de capteurs concordent (voir en annexe B). Le thermohygromètre 5 permet de connaître les conditions à la surface extérieure de la paroi (surface du pare-pluie). Le thermocouple 5 donne la température à l'arrière du bardage. Un fluxmètre est placé dans cette section, derrière le parement intérieur. En pratique, les capteurs sont légèrement décalés les uns par rapport aux autres, afin que chaque capteur perturbe le moins possible les conditions mesurées par les autres capteurs. En paroi Nord et Sud, seuls les thermohygromètres 1,2 et 4, en section courante, et 1, 2 et 3 au niveau des montants sont installés.

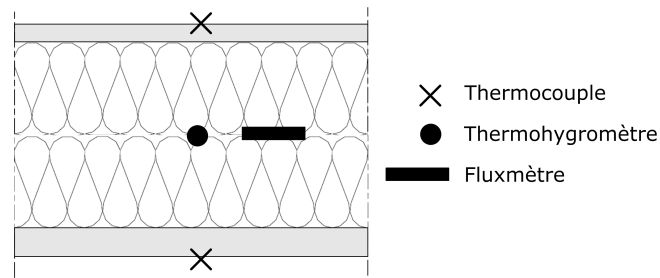


FIG. 2.12 : Placement des capteurs dans les parois horizontales (coupe verticale)

Au niveau des montants verticaux, mi-hauteur : emplacement B

Les montants étant traversant, et nombreux, ils représentent un pont thermique potentiel important ; l'un d'eux est donc instrumenté (le schéma de la figure 2.11.b en donne une coupe horizontale). Des simulations numériques ont été effectuées afin de nous aider à choisir l'emplacement des capteurs, en particulier pour prévoir l'étendue latérale de l'effet du pont thermique. Cette étude préliminaire est présentée dans [Piot *et al.*, 2008]. Deux thermohygromètres (trois lorsqu'un pare-vapeur est installé) sont placés de part et d'autre de l'isolant, contre le montant. Des thermocouples sont utilisés en différentiel pour évaluer l'effet latéral du pont thermique (thermocouples 4 et 5), la valeur de référence étant prise en 3. De même qu'en partie courante, une mesure différentielle double les thermohygromètres (thermocouple 2, température de référence en 3). De plus, un thermocouple (1) mesure la température au centre du montant, contre le parement intérieur.

Autres emplacements

Outre les parois verticales, le plancher et le plafond sont également instrumentés (voir figure 2.12) : un thermohygromètre et un fluxmètre sont placés au milieu de l'épaisseur, au centre ; deux thermocouples mesurent les températures en surface. Les seuls ponts thermiques considérés sont la jonction avec les parois verticales : en effet, les solives ne traversent pas l'isolant dans ces parois. L'instrumentation de ces jonctions est détaillée en annexe C.

Dans le volume de la pièce principale, deux mâts supportant des thermohygromètres permettent de connaître les conditions à deux emplacements (dont l'un au centre de la pièce), et à trois hauteurs différentes : à 0,25 m du plancher et du plafond, et à mi-hauteur. De plus, au centre de la pièce, à mi-hauteur, sont installés une sonde platine et une mesure par globe noir (voir figure 2.9, gauche).

Enfin, un thermohygromètre et un globe noir sont placés dans le comble, et un thermohygromètre mesure les conditions sous le plancher de la cellule.



FIG. 2.13 : Détails de la station de mesures météorologiques

2.4 Mesures effectuées en parallèle

2.4.1 Station météo

Une station de mesures des conditions météorologiques est présente sur le site du CSTB, à quelques mètres de l'emplacement de la cellule (voir figures 2.1 page 23, et 2.13). Les paramètres suivants y sont relevés :

- la température d'air ;
- l'humidité relative ;
- la vitesse et la direction du vent ;
- le rayonnement solaire global sur une surface horizontale ;
- le rayonnement solaire diffus sur une surface horizontale ;
- le rayonnement solaire global sur une surface verticale, au Sud ;
- la pression atmosphérique ;
- la pluviométrie.

Ces mesures sont effectuées toutes les dix secondes, et une moyenne est réalisée toutes les dix minutes. Nous disposons donc de valeurs moyennes par pas de temps de dix minutes. L'enregistrement des données se fait automatiquement sur un poste dédié.

La température et l'humidité relative sont mesurées par une sonde Vaisala HMP45A, placée sous un capot de protection contre le rayonnement afin de mesurer la température d'air. La sonde a une précision de $\pm 0,5^{\circ}C$ et $\pm 1\%$ HR.

Un anémomètre et une girouette de marque Young (modèle 03002) sont placés sur un mât à 3,50 m du sol. Le seuil de sensibilité des deux appareils est à 1,3 m/s.

Le rayonnement solaire global est mesuré avec un pyranomètre Kipp & Zonen de type CM11. Celui-ci mesure le rayonnement de 340 à 2200 nm (domaine infra-rouge et visible), sur un angle solide de $2\pi sr$ (la moitié de l'espace). Pour la mesure du rayonnement diffus, le même appareil est utilisé, et équipé d'un anneau permettant de masquer le rayonnement solaire direct. Le réglage de celui-ci tout au long de l'année est manuel, ce qui peut occasionner des erreurs de mesure ponctuelles sur une ou plusieurs journées.

2.4.2 Caractérisation des matériaux

Au chapitre 1.3.1, nous avons présenté des bases de données recensant des propriétés de matériaux de construction. Toutefois, ces bases de données sont parfois insuffisantes : en effet, les matériaux utilisés en construction sont très divers, de plus leurs caractéristiques peuvent varier fortement suivant l'origine du produit. Il est donc souvent nécessaire de procéder à des mesures afin de caractériser un produit donné. C'est la démarche que nous avons adoptée, le CSTB ayant une bonne expertise en matière de caractérisation des matériaux [Quenard *et al.*, 1986; Quenard et Sallée, 1988]. L'annexe D liste l'ensemble des propriétés qui seront déterminées dans le cadre du PREBAT « opti-MOB » (évoqué en 1.2), et donne un descriptif des méthodes de mesures utilisées.

Une première partie des mesures a d'ores et déjà été réalisée. Le tableau 2.2 indique les caractéristiques qui ont été déterminées pour les matériaux utilisés dans la construction de la cellule (les résultats figurent dans l'annexe D).

Les propriétés mesurées sont utilisées comme données d'entrée pour les simulations numériques (voir chapitre 3), afin de valider le modèle développé en minimisant les erreurs dues aux incertitudes sur les propriétés des matériaux employés. Ces mesures sont complétées de données issues de la littérature.

Matériau	$C_{p,sec}^1$	ρ_{sec}^2	α^3	ϵ^4	$\delta(w)^5$	λ_{sec}^6	$\lambda(w)^7$	$w = f(HR)^8$
OSB	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Épicéa	✓	✓			✓	✓	✓	✓
Panneau de particule	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Pare-pluie				✓	✓			
Plaque de plâtre	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Mélèze			✓	✓		✓		
Laine de verre	✓	✓			✓	✓	✓	✓

¹Chaleur spécifique

²Masse volumique

³Absorptivité solaire

⁴Émissivité

⁵Perméabilité à la vapeur

⁶Conductivité thermique sèche

⁷Conductivité thermique en fonction de l'humidité

⁸Courbe de sorption

TAB. 2.2 : Tableau de synthèse des mesures effectuées sur les matériaux utilisés dans la cellule expérimentale

2.5 Caractérisation de la cellule test

Notations : dans la suite de ce document, la notation « TC » désignera les thermocouples, la notation « HRT » désignera les thermohygromètres. Le numéro se référera à la position du capteur, comme présenté plus tôt dans ce chapitre, à la figure 2.11 (page 34). Ainsi, en section courante, « HRT 5 » désigne le thermohygromètre n°5, c'est à dire celui placé sur le pare-pluie.

Afin de compléter la description de la cellule expérimentale, nous présentons ici quelques éléments issus des mesures effectuées. Deux configurations de parois ont pu être testées dans le cadre de ces travaux : la configuration de référence, présentée au chapitre 2.2, pour laquelle des mesures ont été effectuées du 24 juillet 2008 au 5 février 2009, puis un pare-vapeur a été ajouté, pour des mesures du 19 février au 29 avril 2009. Les différentes périodes présentées ci-après (appelées par la suite « séquences ») correspondent à des sollicitations internes spécifiques. Elles sont décrites dans le tableau 2.3.

Séquence	Température	Humidité	Ventilation mécanique	Grille ¹	Pare-vapeur
A	évolution libre	évolution libre	non	ouverte	non
B	20°C ²	évolution libre	0,5 vol./h	ouverte	non
C	20°C ²	génération continue de vapeur, 60 g/h	non	ouverte	non
D	20°C ²	génération continue de vapeur, 60 g/h	non	fermée	oui

¹grille de ventilation, voir 2.5.1

²dans tous les cas où la température est maintenue, un ventilateur assure le brassage de l'air intérieur

TAB. 2.3 : Description des séquences permettant de caractériser le comportement de la cellule

D'autres sollicitations ont également été générées (production de vapeur intermittente, intermittence du chauffage, sur-ventilation nocturne...); elles seront utilisées dans la suite de l'étude opti-MOB (chapitre 1.2). Toutefois, elles ne font pas l'objet du présent travail : dans un premier temps, seules des sollicitations simples sont étudiées.



FIG. 2.14 : Mesures de perméabilité à l'air : à gauche mesure à la fausse porte, à droite mesure avec un perméoscope

2.5.1 Perméabilité à l'air

Des mesures de perméabilité à l'air ont été effectuées sur la cellule expérimentale. Deux techniques de mesure ont été employées : une première mesure a été effectuée par la technique dite « porte soufflante » (ou « fausse porte »). Par la suite, les mesures ont été effectuées avec un perméoscope. Les rapports de mesures sont donnés en annexe E.

Les deux techniques fonctionnent sur le même principe : le bâtiment est mis en dépression à l'aide d'un ventilateur ; le débit d'air extrait est mesuré pour différents écarts de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. La courbe caractéristique est alors donnée sous la forme :

$$Q_V = C \cdot \Delta P^n \quad (2.1)$$

où ΔP est la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, et Q_V le débit d'air extrait (m^3/h). Les coefficients C et n caractérisent la perméabilité à l'air du bâtiment : plus l'étanchéité du bâtiment est grande, plus le débit extrait sera faible pour une même différence de pression. La norme NF EN 13829 précise les conditions opératoires à respecter et la méthode de calcul à employer.

Dans la méthode de la porte soufflante, une porte étanche est installée à la place de la porte habituelle. L'air est extrait de la cellule au moyen d'un ventilateur situé dans la fausse porte (voir figure 2.14, à gauche).

La technique du perméoscope (figure 2.14, à droite) utilise les bouches de ventilation pour rejeter l'air. Le moteur d'extraction est placé dans le bâtiment à

caractériser, et l'air extrait est rejeté dans le système de ventilation. Cette technique permet ainsi d'inclure la perméabilité due à la porte.

Des mesures ont été effectuées avant et après la pose du pare-vapeur. La première mesure a été effectuée avec la porte soufflante, avant la mise en place de l'isolant, du parement intérieur et du bardage. Puis, des mesures ont été effectuées avec un perméascope : sans pare-vapeur, puis avec. Habituellement, les grilles de ventilation sont fermées durant la mesure. Toutefois, nous avons effectué une mesure supplémentaire avec les grilles d'entrée d'air ouvertes : en effet, durant les premiers mois, nous les avons laissées ouvertes y compris lorsque le système de renouvellement d'air n'était pas en fonctionnement. Ces grilles de prise d'air étant situées dans la porte, la question de leur ouverture ne s'était pas posée lors de la première mesure à la porte soufflante.

Le tableau 2.4 donne les caractéristiques de perméabilité à l'air de la cellule résultant de ces mesures ; la valeur de n_{50} est donnée à titre indicatif ; elle représente le taux de renouvellement d'air sous une différence de pression de 50 Pa (le standard « Passiv Haus » exige un $n_{50} < 0,6$ volumes/h).

Configuration	C	n	$n_{50} (h^{-1})$
Sans pare-vapeur, porte soufflante	2,64	0,73	0,79
Sans pare-vapeur, perméascope, grille fermée	5,39	0,63	1,3
(*)Sans pare-vapeur, grille ouverte	21,49	0,52	3,3
Avec pare-vapeur, perméascope, grille fermée	2,16	0,70	0,67
Avec pare-vapeur, perméascope, grille ouverte	18,19	0,51	2,7

TAB. 2.4 : Caractéristiques de perméabilité à l'air de la cellule ; le cas marqué (*) a été déterminé par calcul, à partir des mesures faites dans les autres cas

L'étude des résultats fait apparaître la prépondérance de l'ouverture de la grille de ventilation sur la perméabilité de la cellule : elle est responsable d'une part plus grande des infiltrations d'air que le reste de l'enveloppe. Ceci s'explique par la grande section de passage que représente la grille de ventilation (100 cm^2).

L'importance du pare-vapeur est également notable : sa pose a permis de diviser par 2 le taux d'infiltration (dans le cas où la grille de ventilation est fermée). Ceci signifie que, malgré les précautions prises à la construction (joints entre les panneaux de contreventement, ruban adhésif spécial apposé sur les agrafes qui maintiennent le pare-pluie), des infiltrations d'air sont possibles au travers des parois (partie courante ou assemblages).

La comparaison des mesures sans pare-vapeur réalisées à la porte soufflante et au perméascope permet d'évaluer l'influence des infiltrations par la porte, responsable d'environ la moitié du débit sans le pare-vapeur.

2.5.2 Comportement thermique

Séquence A : été, sans pare-vapeur, sans sollicitations internes

La figure 2.15 présente l'évolution de la température intérieure, ainsi que les températures en surface du pare-pluie sur les parois Est et Ouest. Malgré la présence d'un bardage, ces températures sont bien plus élevées, en journée, que la température d'air extérieur (jusqu'à 10°C), du fait du rayonnement solaire. Durant la nuit, nous ne relevons pas de sur-refroidissement nocturne, conséquence possible d'un ciel grenoblois brumeux en été. Côté Est, l'évolution de la température a une forme particulière : au lieu d'un simple pic, comme à l'Ouest, la chute de température qui fait suite à l'interruption du rayonnement solaire sur cette face est ralentie par la hausse de la température extérieure qui se poursuit après midi. On observe alors un palier. Cette dynamique plus complexe aura des conséquences sur la modélisation des transferts d'humidité (voir chapitre 4). Elle rend également les courbes moins lisibles, c'est pourquoi dans la suite de ce chapitre, sauf exception, nous avons choisi de représenter les évolutions en paroi Ouest.

Malgré les températures diurnes élevées, la température à l'intérieur varie peu au cours d'une journée : environ 3°C d'amplitude. Toutefois la chaleur s'accumule, n'étant pas évacuée la nuit : sur la période de 4 jours présentée ici, la température moyenne augmente de près de 5°C , autant que la température extérieure sur la même période. Enfin, le maximum de température est déphasé de 6 h.

Par ailleurs, les mesures effectuées à différentes hauteurs montrent l'absence de stratification des températures dans la pièce. De plus, les thermohygromètres sont affectés d'un bruit de mesure (il sera mis en évidence au chapitre 4, figure 4.12). Ce bruit peut provenir d'un parasitage électromagnétique dans la cellule ; en effet, lors des tests effectués en laboratoire, ce bruit n'apparaît pas (voir en annexe B).

Séquence B : automne, sans pare-vapeur, température constante maintenue

Dans tous les cas où le convecteur est en fonctionnement, un ventilateur assure le brassage de l'air à l'intérieur de la pièce.

Durant la période choisie ici, les 3 derniers jours se caractérisent par de faibles variations de température. La figure 2.16 montre la répartition des températures dans la paroi Ouest, en partie courante, lorsqu'un écart de température est maintenu : la température derrière le parement intérieur reste très proche de la température dans la pièce (consigne de thermostat à 20°C), malgré l'écart de température allant jusqu'à 16°C entre l'intérieur et l'extérieur : la bonne isolation souhaitée lors de la construction de la cellule est effective. Ceci se traduit par des mesures (non présentées ici) de température résultante très proches des mesures de température d'air.

2.5 Caractérisation de la cellule test

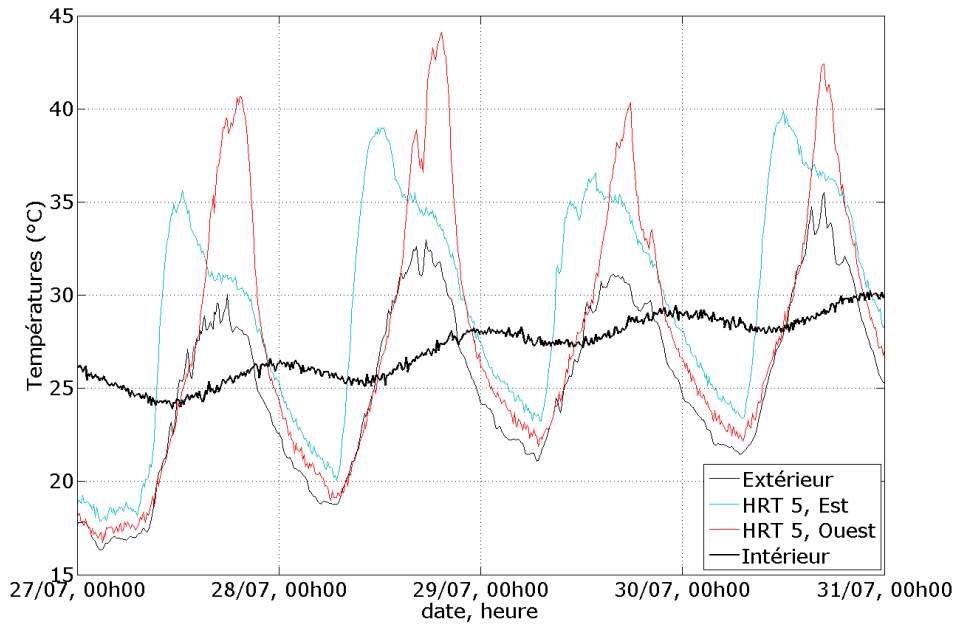


FIG. 2.15 : Température à l'extérieur, en surface Est et Ouest des parois, et à l'intérieur, du 27 au 31 juillet 2008

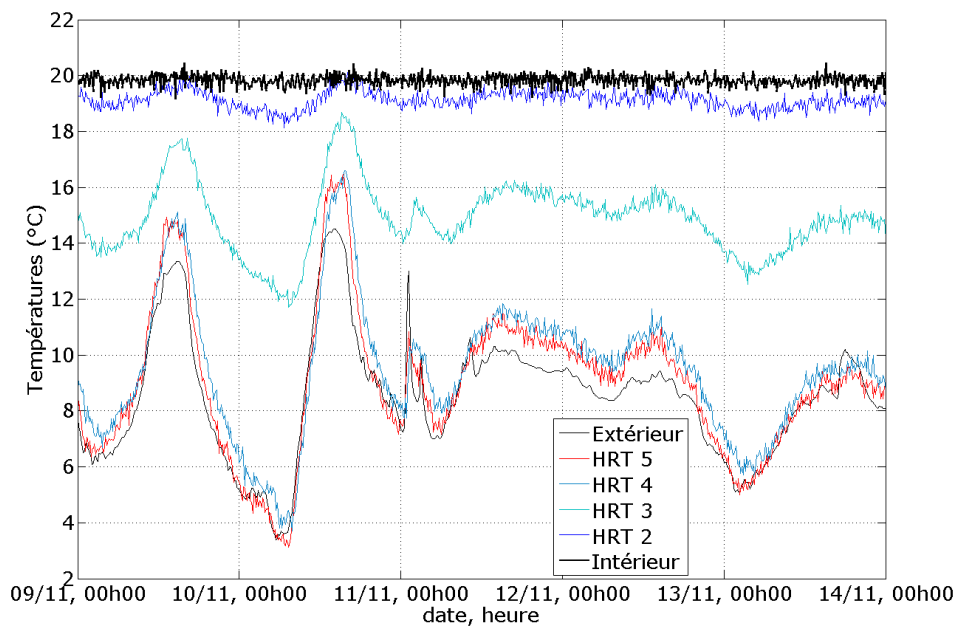


FIG. 2.16 : Températures dans la paroi Ouest en section courante, à l'intérieur et à l'extérieur, du 09 au 14 novembre 2008

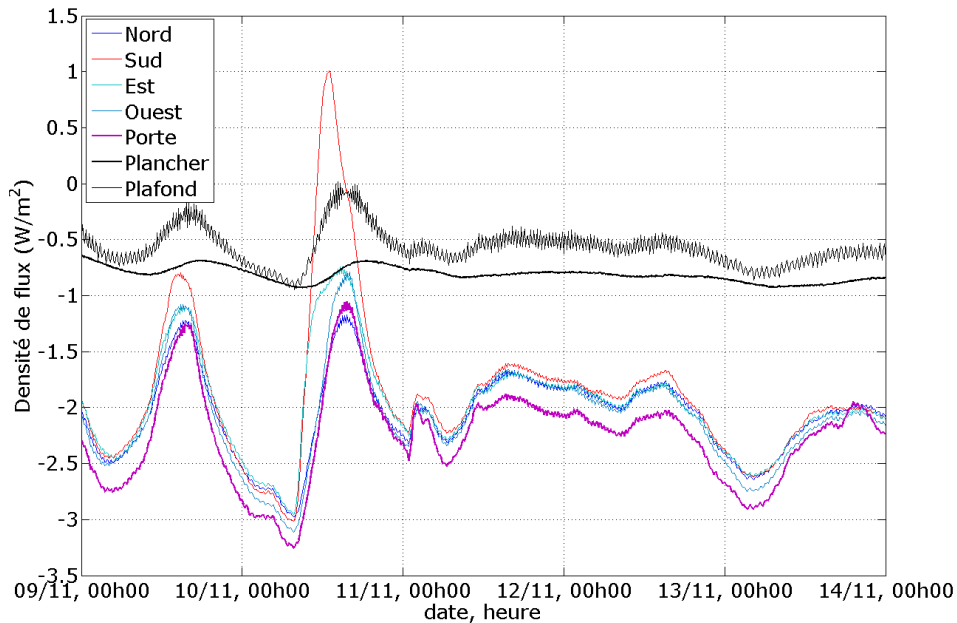


FIG. 2.17 : Densités de flux au travers des parois en section courante, du 09 au 14 novembre 2008

Les densités de flux traversant les parois sont présentées sur la figure 2.17. Ces valeurs proviennent des mesures des fluxmètres placés en section courante des parois. Les valeurs négatives correspondent à des flux sortant de la pièce (le flux devient positif au Sud grâce à l'apport solaire). Les flux traversant le plancher et le plafond, s'ils sont généralement plus faibles (en valeur absolue) que ceux traversant les parois verticales, ne sont pour autant pas négligeables.

Enfin, le flux au travers de la porte est au même niveau (légèrement plus important) que le flux en paroi Nord : la cellule possède donc bien des parois verticales homogènes.

Le bardage

Les mesures présentées ici s'étendent sur une période plus large que celle présentée précédemment (séquence B), afin de permettre une certaine variété dans les conditions extérieures : une période ensoleillée, suivie d'une période au ciel couvert ; un vent de force et direction variable (voir en annexe F les conditions climatiques pour cette période). La figure 2.18 montre les températures en section courante de la paroi à l'arrière du bardage (mesurées par les thermocouples TC 5 à l'Est et à l'Ouest), sur le pare-pluie (HRT 5), et la température extérieure. Pour des raisons de lisibilité, la courbe a été scindée en deux parties (attention, les échelles verticales différentes).

2.5 Caractérisation de la cellule test

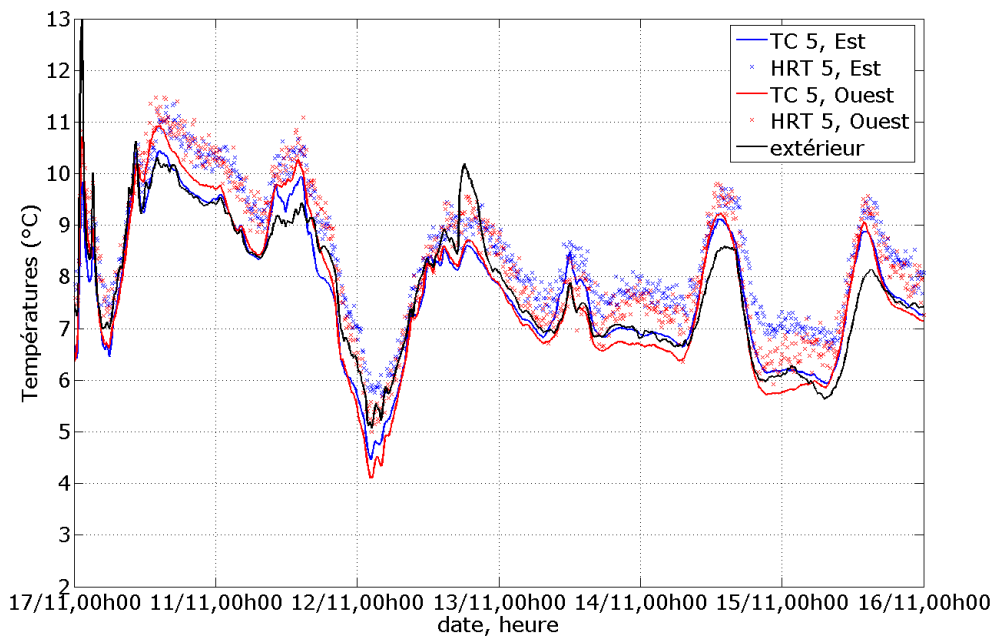
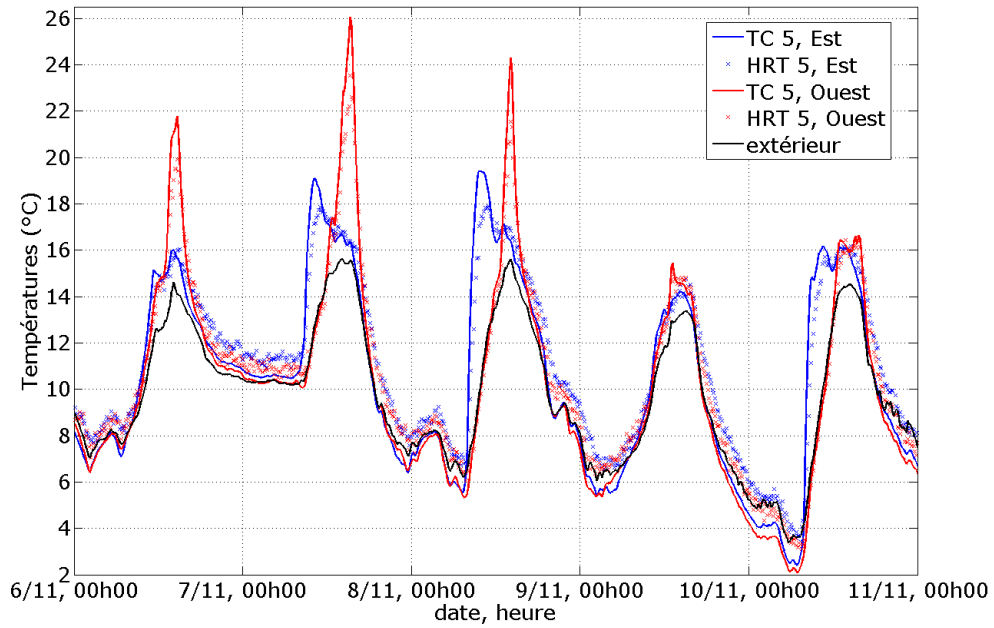


FIG. 2.18 : Températures à l'arrière du bardage (TC 5) et sur le pare-pluie (HRT 5), en parois Est et Ouest, et température extérieure, du 6 novembre au 17 novembre 2008

Durant les 3 premiers jours, le soleil n'est pas voilé : le rayonnement solaire direct fait augmenter fortement les températures (qui sont supérieures à la température d'air), à l'Ouest plus encore qu'à l'Est. La nuit, un sur-refroidissement (jusqu'à $1^{\circ}C$) apparaît sur la face arrière du bardage. La surface du pare-pluie est protégée, tant des hautes que des basses températures, subissant des variations d'amplitude moindre.

La dernière période est marquée par une très faible variation des températures, et l'absence de rayonnement direct. Les températures mesurées à l'arrière du bardage sont très proches de la température d'air, voire très légèrement inférieures, le refroidissement par rayonnement avec le ciel existe donc malgré le ciel couvert. En outre, même de nuit, et par ciel couvert, les parois Est et Ouest semblent se comporter différemment. Plusieurs causes peuvent expliquer cette dissymétrie : le vent, qui selon sa direction influence différemment les 2 parois ; ou bien encore le sol et l'environnement proche qui sont différents à l'Est et à l'Ouest de la cellule (bitume à l'Est, pelouse à l'Ouest, ce qui peut expliquer les températures légèrement plus élevées à l'Est, y compris la nuit, en raison du stockage et de la ré-émission de l'énergie). Toutefois, les écarts étant inférieurs à la précision des capteurs, cette différence peut ne pas être significative.

2.5.3 Comportement en humidité

Les mesures effectuées, tout comme les calculs (voir chapitre 3), donnent des valeurs d'humidité relative. Toutefois, pour mieux comprendre les phénomènes en humidité, il est indispensable de s'affranchir de la température, et de transformer ces données en valeurs absolues : nous avons choisi l'humidité absolue HA, définie à partir de la pression de vapeur par l'équation 1.12. La pression de vapeur est calculée comme suit [Hens, 1996] (expression valable dans la gamme de température $0^{\circ}C < T < 80^{\circ}C$) :

$$p_v = \Phi \cdot P_{sat} = \Phi \cdot \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T + 273,15 - 37,58}\right) \quad (2.2)$$

L'humidité absolue donne la masse d'humidité par unité de masse d'air sec. Il nous faut souligner ici que nous effectuons nos mesures en surface des panneaux, ou dans l'isolant, c'est à dire dans une petite poche d'air, que l'on suppose en permanence à l'équilibre avec le matériau dont nous souhaitons connaître le comportement. C'est pour cette raison que nous choisissons l'humidité absolue de l'air plutôt que le taux d'humidité d'un matériau. De plus, ce dernier n'est pas continu aux interfaces entre matériaux.

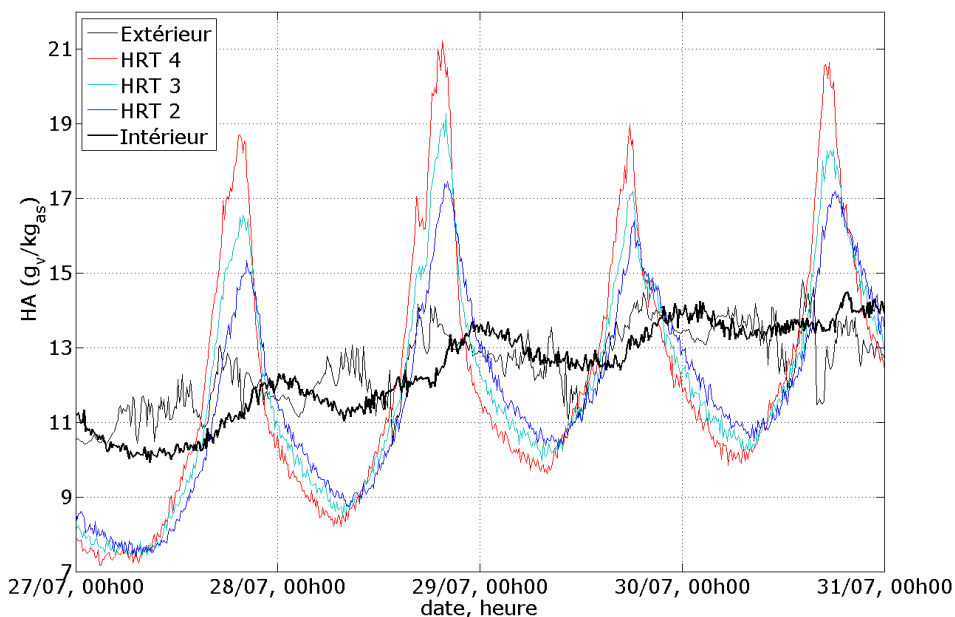


FIG. 2.19 : Humidité absolue à l'extérieur, dans la paroi Ouest (en section courante) et à l'intérieur, du 27 au 31 juillet 2008

Séquence A : été, sans pare-vapeur, sans sollicitations internes

La figure 2.19 présente le profil de l'humidité absolue dans la paroi Ouest, ainsi qu'à l'extérieur et à l'intérieur. Il existe une forte corrélation entre la variation journalière des températures et celle de l'humidité dans la paroi : ceci s'explique par le caractère fortement hygroscopique du matériau de contreventement (panneau de particules agglomérées). En effet, le panneau de contreventement voit sa température augmenter fortement en journée (rayonnement solaire). Localement, l'humidité relative baisse « mécaniquement », le panneau va donc, pour assurer l'équilibre de sorption, voir son taux d'humidité diminuer : l'eau ainsi libérée est responsable de la hausse d'humidité absolue à l'intérieur de la paroi. Ce phénomène est mis en évidence par [Derome *et al.*, 2009], sur des échelles de temps plus longues (plusieurs semaines ou mois).

L'humidité mesurée dans la pièce est très similaire à celle de l'air extérieur : la grille de ventilation étant ouverte durant cette séquence, la perméabilité à l'air de la cellule dans cette configuration est grande (voir tableau 2.4), permettant des échanges de vapeur importants avec l'extérieur.

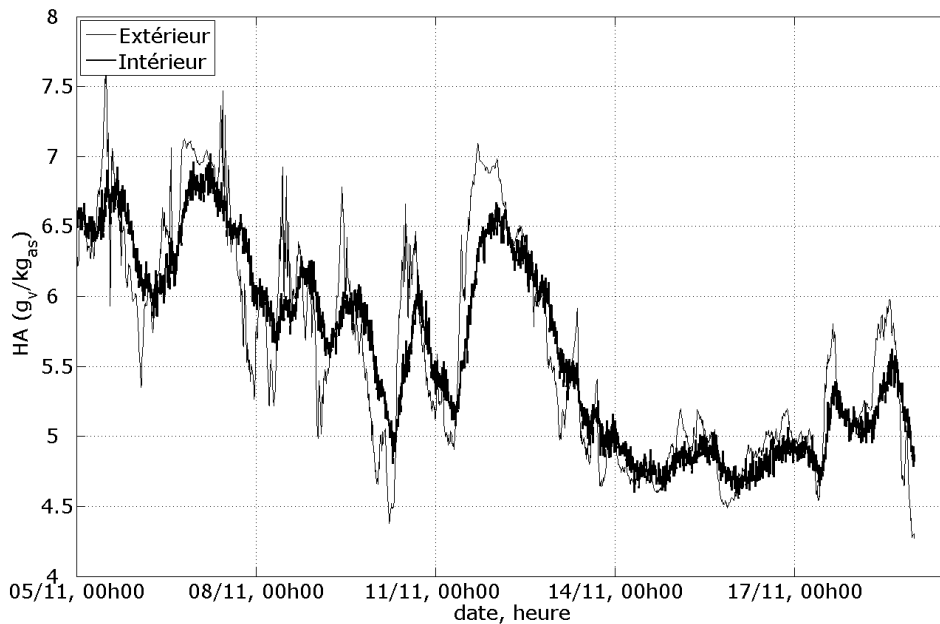


FIG. 2.20 : Humidité absolue à l'extérieur et à l'intérieur, du 05 au 19 novembre 2008

Séquence B : automne, sans pare-vapeur, température constante maintenue

De même que précédemment, l'humidité absolue dans la pièce est principalement contrôlée par l'humidité externe (figure 2.20), ceci en raison du renouvellement d'air mécanique. L'amplitude des variations journalières est moindre à l'intérieur qu'à l'extérieur, ce qui montre le caractère hygroscopique des matériaux de parement intérieur.

Séquence C : hiver, sans pare-vapeur, échelon de génération de vapeur

Un débit de vapeur continu de 60 g/h a été généré durant les 3 premiers jours de cette séquence, puis la cellule a été laissée en évolution « libre », seule la température étant maintenue. La figure 2.21 montre l'évolution de l'humidité intérieure, dans la paroi Ouest et à l'extérieur. De même que pour la séquence A, les variations d'humidité dans la paroi sont liées aux températures ; de plus, la sollicitation interne se répercute peu dans la paroi, malgré l'absence de pare-vapeur. La grille de ventilation étant ouverte, une part de l'humidité a pu être évacuée par infiltration d'air. Un palier semble atteint dans l'évolution de l'humidité dans la pièce. Celle-ci redevient, en 3 jours, proche de son niveau initial et des conditions observées à l'extérieur.

2.5 Caractérisation de la cellule test

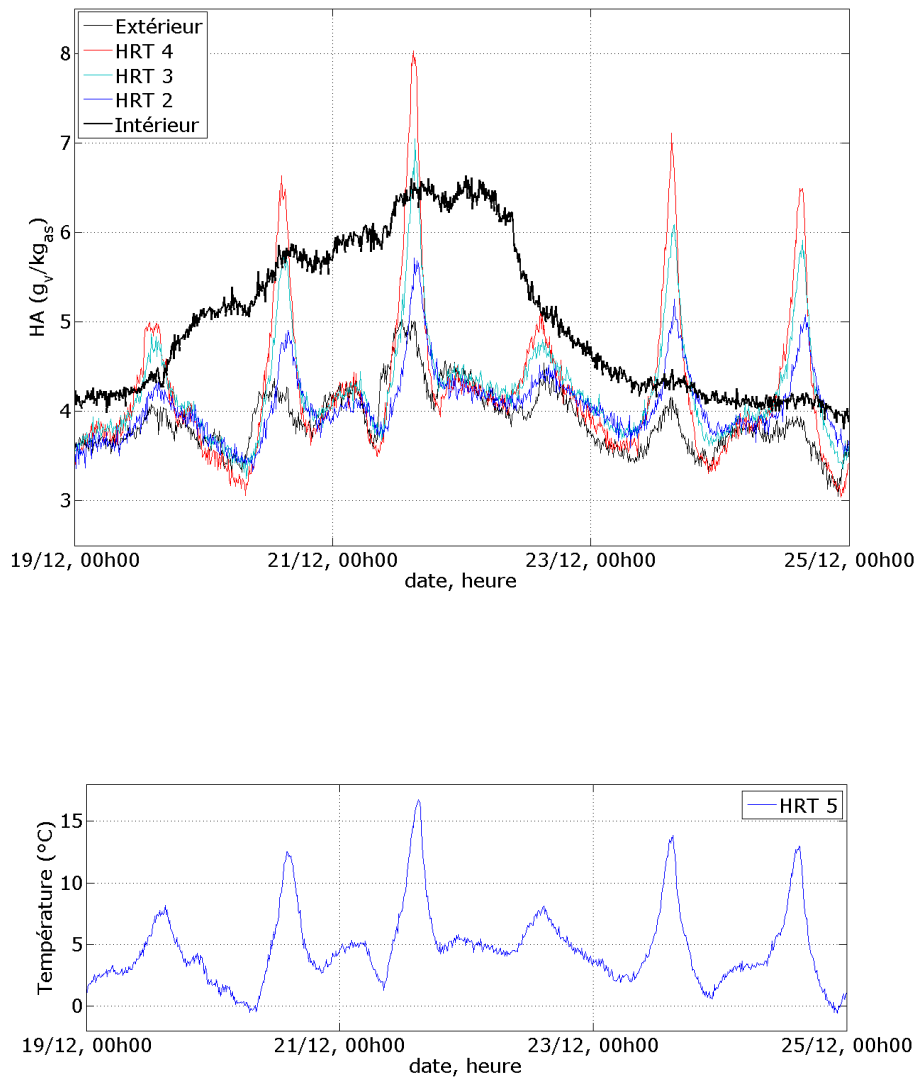


FIG. 2.21 : Humidité absolue à l'extérieur, dans la paroi Ouest (section courante) et à l'intérieur, du 19 au 25 décembre 2008, et température de surface (HRT 5)

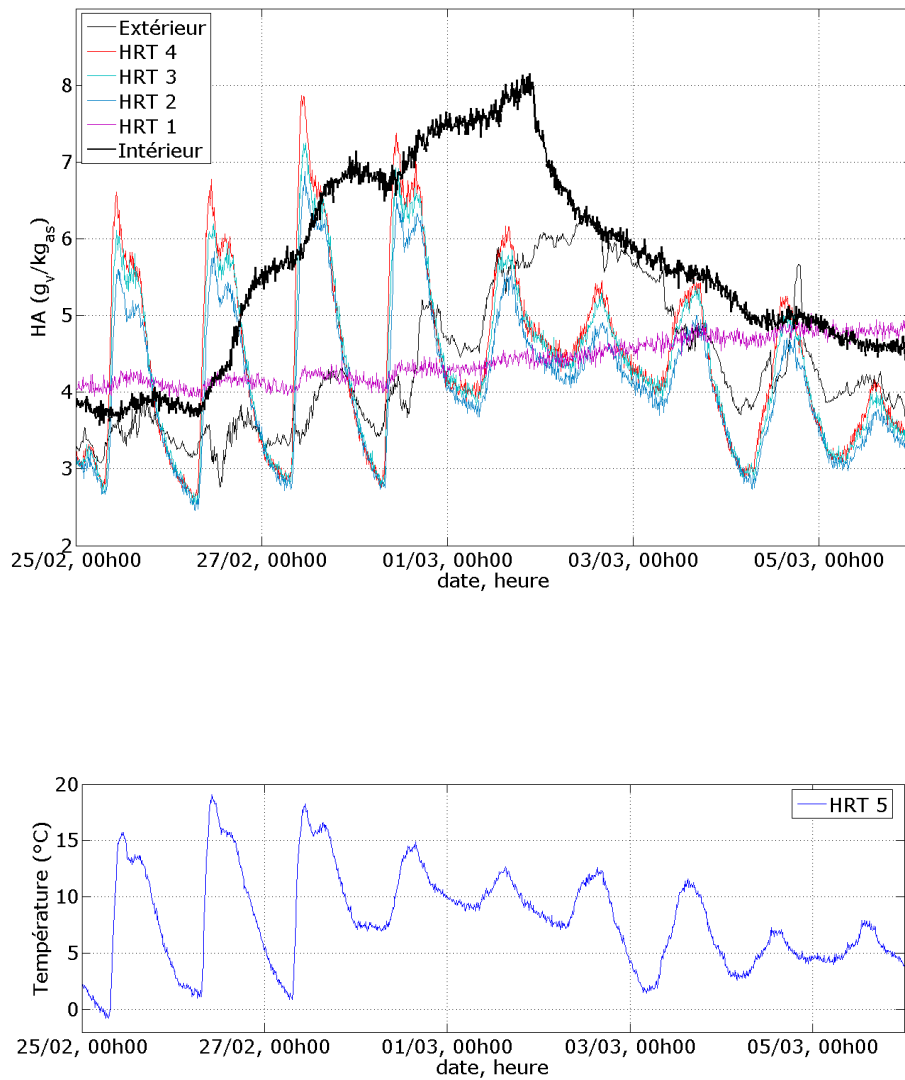


FIG. 2.22 : Humidité absolue à l'extérieur, dans la paroi Est (section courante) et à l'intérieur, du 25 février au 06 mars 2009, et température de surface (HRT 5)

Séquence D : hiver, avec pare-vapeur, échelon de génération de vapeur

Durant cette séquence, le pare-vapeur est en place, et la grille de ventilation fermée. Un débit de vapeur constant de 60 g/h est généré du 26 février au 2 mars. La figure 2.22 montre tout d'abord que l'élévation de l'humidité dans la pièce est plus importante que dans le cas précédent, sans pour autant avoir atteint un palier. Elle diminue également plus lentement, puisqu'au 5^{ème} jour elle n'est pas encore tout à fait au niveau extérieur. Ceci provient de la meilleure étanchéité à l'air de la cellule.

C'est l'intérieur de la paroi Est qui est présenté ici ; en effet, une fuite dans le pare-vapeur, faible mais non négligeable, a été mise en évidence en paroi Ouest. On retrouve la forme caractéristique de l'évolution de température à l'Est mentionnée plus haut (séquence A), mettant clairement en évidence le lien de causalité entre l'évolution de la température et la variation d'humidité dans la paroi.

Les mesures du capteur HRT 1 montrent l'effet du pare-vapeur : celui-ci découple totalement la variation d'humidité entre le côté extérieur et le côté intérieur. Il permet ainsi d'isoler le panneau de parement intérieur du reste de la paroi. Celui-ci agit comme un tampon : la variation d'humidité derrière le parement suit celle de la zone, mais avec un déphasage d'environ 3 jours, et de manière extrêmement atténuée. Cela résulte de la forte capacité hygroscopique de ce matériau (à base de bois ; voir l'isotherme de sorption en annexe D). Cette constatation permet d'expliquer pourquoi, même sans pare-vapeur, les sollicitations intérieures ou extérieures ont un impact lent sur l'intérieur de la paroi.

À l'échelle des différentes saisons, l'humidité absolue dans la paroi a fortement diminué entre l'été (aux alentours de 13 g_v/kg_{as}) et l'hiver (environ 4 ou 5 g_v/kg_{as}), suivant en cela la tendance de l'air extérieur. C'est donc à l'échelle saisonnière qu'il convient d'étudier les interactions entre la paroi et l'air extérieur.

2.6 Synthèse

Les traits principaux du comportement de la cellule test sont donc :

- des parois verticales thermiquement toutes similaires, conformément au cahier des charges ;
- une répartition homogène de la température et de l'humidité dans la pièce principale ;
- une perméabilité à l'air importante dans la configuration de référence, en particulier lorsque les grilles de ventilations sont ouvertes ;
- une bonne étanchéité à l'air obtenue grâce au pare-vapeur ;

Chapitre 2 Support expérimental

- dans tous les cas, la porte est responsable d'une part importante de la perméabilité à l'air de la cellule ;
- des panneaux de contreventement et de parement intérieur très hygroscopiques, agissant en tampon des sollicitations hygriques subies par la paroi, mais générant des flux de vapeur internes suivant la variation de température, à l'échelle de la journée ;
- une variation saisonnière de l'humidité dans les parois suivant l'humidité extérieure.

Ce support permettra d'étudier différentes configurations constructives d'une maison à ossature bois, en conditions climatiques naturelles. Un modèle de cette cellule expérimentale a été développé en parallèle (voir chapitre 3) : l'instrumentation de la cellule vise à permettre sa validation. Les conditions climatiques relevées en continu, ainsi que la détermination des caractéristiques des matériaux utilisés aideront à cette étape indispensable. Le modèle, une fois validé, permettra d'étudier un plus grand nombre de paramètres que la cellule expérimentale : dimensions ou climat différents, autres matériaux...

Chapitre 3

Modélisation numérique

3.1 Choix d'un outil de modélisation numérique : HAM-tools

La complexité des problèmes rencontrés en physique du bâtiment (géométrie, exposition climatique, inconnues multiples...) rend généralement impossible la résolution analytique des équations présentées en 1.1, de surcroît non linéaires. Aussi, des modèles ont été développés, se fondant sur des hypothèses permettant de réduire la complexité des systèmes. Des méthodes numériques, basées sur une discrétisation spatiale et temporelle, sont utilisées pour résoudre les problèmes ainsi écrits.

3.1.1 Différents types de modèles existants

Des modèles de comportement hygrothermique ont été développés à différentes échelles : transferts au sein d'un matériau (à 1, 2 ou 3 dimensions) ou à l'échelle du bâtiment entier. Parmi les modèles existants, citons WUFI [Künzel et Kiessl, 1996; Künzel, 1995], et HygIRC [Maref *et al.*, 2004], qui traitent tous deux la paroi, et existent en 1 et 2 dimensions.

Les modèles de bâtiment sont généralement constitués du couplage d'un modèle pour les parois et d'un modèle pour le(s) volume(s) d'air (ou « zone(s) »). Un grand nombre de modèles existants sont décrits et comparés dans [Woloszyn et Rode, 2008a,b] : ce sont les modèles ayant contribué aux exercices communs de validation de l'annexe 41 (voir chapitre 1.2).

Différents types de discrétisation spatiale sont possibles, aussi bien pour les parois que pour le volume d'air : du modèle très fin (type CFD) au modèle à grain grossier (type fonction de transfert). Ce niveau de discrétisation, ou « granularité », est choisi en fonction du niveau de simplification adopté pour décrire les différents phénomènes (thermiques, hygriques, aérauliques) en jeu.

L'annexe 41 de l'AIE a retenu 4 niveaux :

- *très fin* : code de mécanique des fluides (CFD), modèles tridimensionnels d'enveloppe ;
- *fin* : les pièces sont subdivisées en multiples zones de calculs, modèles bidimensionnels d'enveloppe ;
- *intermédiaire* : chaque pièce est modélisée comme une zone unique, modèles unidimensionnels d'enveloppe ;
- *grossier* : une seule zone pour l'ensemble d'un bâtiment, fonctions de transfert pour l'enveloppe.

Il peut exister des différences dans les niveaux de finesse entre les modèles d'enveloppe et les modèles de volume ; ceci dépend généralement de l'histoire du développement du modèle (modèle développé pour l'enveloppe puis étendu au bâtiment, modèle de calculs énergétiques étendus à l'humidité). Quelques exemples de couplages considérés comme classiques sont donnés dans le tableau 3.1. Les modèles inscrits dans le tableau sont ceux que nous avons pu tester dans le cadre de ces travaux.

Air \ Parois	Grossier	Intermédiaire	Fin	Très fin
Grossier	✓	✓ Wufi+ [Holm <i>et al.</i> , 2003]		✓
Intermédiaire	✓ TRNSYS [TRNSYS, 2005]	✓ HAM-tools [Kalagasidis, 2004]	✓	
Fin		✓		
Très fin		✓		✓ HAMLab [van Schijndel, 2007]

TAB. 3.1 : Associations typiques de modèles, d'après [Woloszyn et Rode, 2008a], et quelques exemples

D'autres distinctions sont possibles : selon les potentiels moteurs choisis pour écrire le système d'équations à résoudre, le traitement des conditions aux limites, le mode de résolution numérique choisi (éléments finis ou différences finies, schéma de résolution temporelle explicite, implicite, mixte, etc.) ou encore leur usage (logiciel commercial, ouvert, ou destiné principalement à l'équipe le développant).

3.1.2 Le choix de HAM-tools

Après avoir testé différents modèles (voir tableau 3.1), nous avons choisi le modèle HAM-Tools pour nos travaux. Il s'agit d'un modèle développé conjointement par l'Université de Technologie de Chalmers (Suède), et par l'Université de Technologie du Danemark (Copenhague). Ce modèle a été évalué et étalonné dans le cadre des exercices de comparaison de l'annexe 41 de l'AIE, et validé expérimentalement [Kalagasidis, 2004; Kalagasidis *et al.*, 2007].

Les raisons suivantes ont motivé notre choix :

- c'est un logiciel ouvert, c'est à dire que l'ensemble des chercheurs est appelé à contribuer à son développement, pourvu que le but poursuivi soit la recherche ou l'éducation. Il est disponible au téléchargement à l'adresse <http://www.ibpt.org>. Sa structure permet ainsi à l'utilisateur de modifier ou d'étendre le modèle à sa guise ;
- sa structure modulaire en fait un outil très souple d'utilisation ;
- l'écriture du modèle est « transparente », c'est à dire que l'utilisateur a accès à la fois aux équations de base utilisées, à la description du maillage des parois, ou encore à la définition des échanges surfaciques ;
- la documentation, à la fois sur ses principes de fonctionnement et son utilisation pratique, est détaillée et accessible aisément [Kalagasidis, 2003; Rode *et al.*, 2003].

3.1.3 Principes généraux - description fonctionnelle

HAM-tools (« Heat, Air and Moisture Toolbox ») consiste en une bibliothèque de composants développés dans l'environnement de simulation Matlab-Simulink. Le bâtiment est décrit comme un assemblage de différents composants (parois, zones, systèmes, etc., voir figure 3.1), chacun étant composé de modules plus élémentaires : une paroi se décompose en plusieurs couches d'un matériau unique ; chaque couche comporte plusieurs nœuds. La bibliothèque de HAM-tools permet d'utiliser aussi bien ces modules élémentaires que les composants plus complexes.

Le modèle est de type *intermédiaire* à *fin*. Les parois sont décrites en 1 dimension. Plusieurs zones peuvent être définies. Les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité (vapeur et liquide) sont déterminés, en conditions dynamiques, et en prenant en compte des propriétés de matériaux dépendant des conditions de température et/ou d'humidité.

Différents modèles de parois prédéfinies existent (cloison, mur extérieur, vitrage), chacune ayant une composition et un maillage particulier. Une bibliothèque

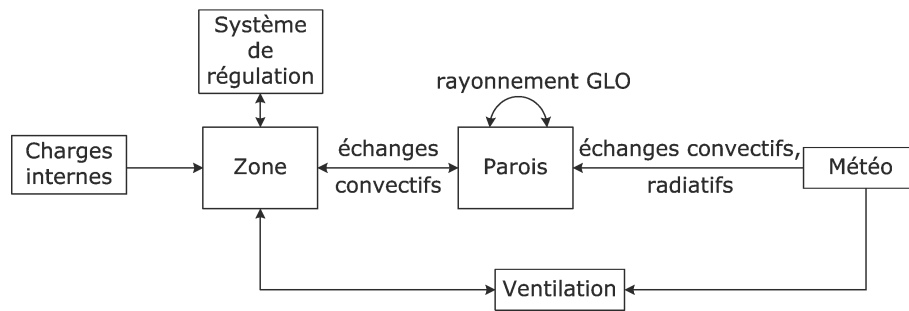


FIG. 3.1 : Schéma fonctionnel de HAM-tools

de matériaux est disponible, issue principalement des travaux de l'annexe 24 de l'AIE, et peut être étendue ou modifiée par l'utilisateur. Les caractéristiques des matériaux nécessaires sont :

- la densité sèche ;
- la capacité calorifique sèche ;
- la conductivité thermique, éventuellement fonction de la température et de l'humidité ;
- la perméabilité à la vapeur, éventuellement fonction de l'humidité ;
- la courbe de sorption ;
- la conductivité liquide, éventuellement fonction de l'humidité ;
- l'émissivité grandes longueurs d'ondes et l'absorptivité solaire.

La conductivité est définie comme une fonction linéaire de la température et/ou de l'humidité $\lambda(w, T) = \lambda_0 + a \cdot w + b \cdot T$; les caractéristiques hygriques sont tabulées, et interpolées linéairement entre deux valeurs connues.

Des charges internes, correspondant à une occupation du bâtiment (dégagement de chaleur, de vapeur), peuvent être prises en compte dans le bilan de la (des) zone(s) d'air.

La bibliothèque de systèmes (chauffage, rafraîchissement, renouvellement d'air) est relativement réduite : seuls quelques systèmes simples sont définis.

Un module de calculs d'infiltrations d'air par des ouvertures (intentionnelles ou non) est également disponible.

Un module de lecture de données climatiques permet à l'utilisateur de définir ses propres sollicitations ; les données requises sont :

- la température d'air ;
- la température de rosée ;
- le rayonnement solaire global sur une surface horizontale ;
- le rayonnement solaire diffus sur une surface horizontale ;

- le rayonnement solaire direct sur une surface normale à l'incidence solaire ;
- le rayonnement grandes longueurs d'ondes sur une surface horizontale ;
- la vitesse et la direction du vent.

À l'aide de ces données, HAM-tools dispose d'un module qui calcule le rayonnement reçu sur les parois du bâtiment, en fonction de la latitude et de la longitude du lieu, de l'heure, de l'inclinaison et de l'orientation de chaque paroi.

3.2 La modélisation des transferts dans HAM-Tools

3.2.1 Transferts dans les parois

Les hypothèses retenues pour l'écriture de HAM-tools sont présentées ci-après, résultant en un système d'équations simplifiées décrivant les transferts dans les parois. Le schéma de résolution numérique associé est également précisé.

Simplifications effectuées

Les hypothèses suivantes ont été faites :

1. le modèle est écrit en supposant les transferts unidirectionnels ;
2. les contacts entre deux matériaux sont supposés n'opposer aucune résistance aux transferts ;
3. pour une épaisseur élémentaire dx , la variation spatiale de conductivité est supposée négligeable :

$$\frac{\partial \lambda}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \ll \lambda(w, T) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

4. toutes les propriétés utilisées sont prises à pression atmosphérique. En particulier, l'humidité spécifique de l'air s'écrit :

$$HA = 0,622 \cdot \frac{p_v}{P - p_v} \simeq 6,21 \cdot 10^{-6} \cdot p_v$$

5. pour le calcul de la chaleur spécifique du matériau humide, la masse de vapeur et la masse d'air sont négligées devant la masse d'eau liquide : $w \simeq w_l$;
6. nous considérons ici les chaleurs spécifiques de l'eau (liquide et vapeur) comme négligeables devant la chaleur latente de vaporisation de l'eau :

$$C_{p,v} \ll L \quad \text{et} \quad C_{p,l} \ll L$$

7. le modèle étant unidirectionnel, l'effet de la gravité sur le flux liquide n'est pas pris en compte, afin d'être valable aussi bien pour des parois horizontales que verticales ;
8. le flux d'air est constant au travers de la structure, ne dépendant à chaque instant que des pressions de part et d'autre de la structure. Il est compté positivement de l'extérieur vers l'intérieur ;

Le système d'équations vu précédemment (1.21) peut alors s'écrire (le développement mathématique complet figure dans [Hens, 2007, chap.3]) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C_p(w) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(w, T) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ \quad + L \cdot \frac{\partial g_v}{\partial x} \\ \quad + C_{p,a} \cdot g_a \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial t} = - \left(\frac{\partial g_l}{\partial x} + \frac{\partial g_v}{\partial x} \right) \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$\text{avec : } \left\{ \begin{array}{l} C_p(w) = C_{p,0} + \frac{1}{\rho_0} \cdot C_{p,l} \cdot w \\ g_l = K(w) \cdot \frac{\partial P_{succ}}{\partial x} \\ g_v = -\delta_v(w) \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} - 6, 21 \cdot 10^{-6} \cdot p_v \cdot g_a \\ g_a = -K_a \cdot \Delta(P) \end{array} \right.$$

Écriture numérique

Le modèle est écrit aux différences finies ; pour une maille intérieure au matériau de largeur d (voir figure 3.2), le bilan au nœud i s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} &= \frac{1}{C_p^n \cdot \rho \cdot d} \cdot \left[\left(\frac{T_{i-1} - T_i}{R_{i-1} + R_i} + \frac{T_{i+1} - T_i}{R_{i+1} + R_i} \right)^n \right. \\ &\quad - L \cdot \left(\frac{p_{v,i-1} - p_{v,i}}{R_{v,i-1} + R_{v,i}} + \frac{p_{v,i+1} - p_{v,i}}{R_{v,i+1} + R_{v,i}} \right)^n \\ &\quad \left. + \begin{cases} g_a \cdot (C_{p,a} \cdot (T_{i-1} - T_i) - 6, 21 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot (p_{v,i-1} - p_{v,i}))^n & , \text{ si } g_a > 0 \\ g_a \cdot (C_{p,a} \cdot (T_i - T_{i+1}) - 6, 21 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot (p_{v,i} - p_{v,i+1}))^n & , \text{ si } g_a < 0 \end{cases} \right] \end{aligned} \quad (3.2)$$

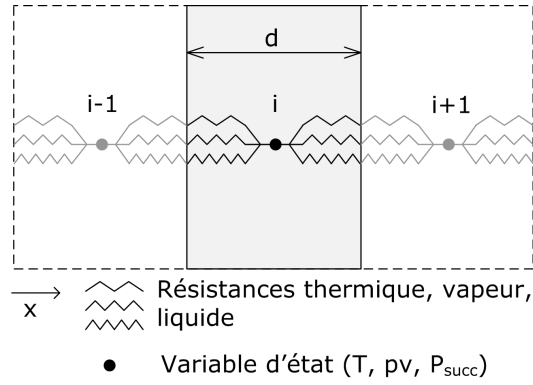


FIG. 3.2 : Schéma d'un nœud du maillage

$$\begin{aligned}
 \frac{w_i^{n+1} - w_i^n}{\Delta t} &= \frac{1}{d} \left[\left(\frac{p_{v,i-1} - p_{v,i}}{R_{v,i-1} + R_{v,i}} + \frac{p_{v,i+1} - p_{v,i}}{R_{v,i+1} + R_{v,i}} \right)^n \right. \\
 &\quad \left. - \left(\frac{p_{succ,i-1} - p_{succ,i}}{R_{succ,i-1} + R_{succ,i}} + \frac{p_{succ,i+1} - p_{succ,i}}{R_{succ,i+1} + R_{succ,i}} \right)^n \right. \\
 &\quad \left. + \begin{cases} 6, 21 \cdot 10^{-6} \cdot g_a \cdot (p_{v,i-1} - p_{v,i})^n & , \text{ si } g_a > 0 \\ 6, 21 \cdot 10^{-6} \cdot g_a \cdot (p_{v,i} - p_{v,i+1})^n & , \text{ si } g_a < 0 \end{cases} \right] \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

Les indices i se rapportent au numéro du nœud, les exposants n au pas de temps. Les résistances sont définies comme suit :

$$R = \frac{d/2}{\lambda} \quad , \quad R_v = \frac{d/2}{\delta_p} \quad , \quad R_{succ} = \frac{d/2}{K}$$

Le flux d'air est calculé indépendamment. Comme indiqué par les exposants n , les propriétés des matériaux sont calculées avec les valeurs de température et d'humidité du pas de temps précédent. Le schéma de résolution est de type explicite, la résolution est faite par l'un des solveurs de Matlab, à pas de temps variable.

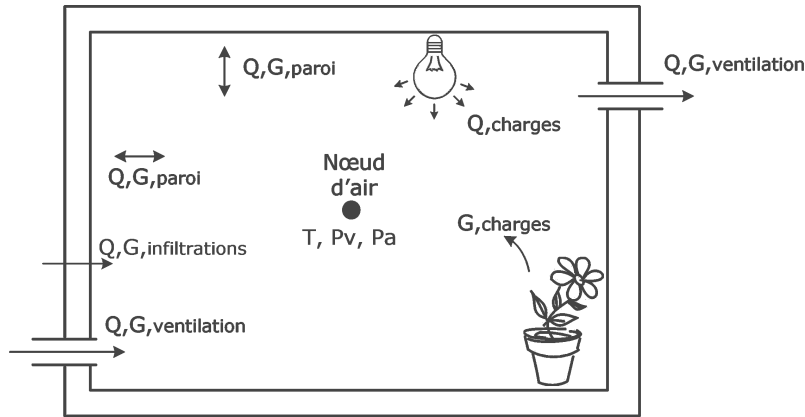


FIG. 3.3 : Schéma de principe du bilan de la zone

3.2.2 Modèle de bâtiment

Modèle de zone

Une zone est définie comme un volume d'air, homogène en pression, température, humidité, fermée par une ou des parois. Elle ne comporte donc qu'un nœud de calcul, où sont effectués les bilans énergétique, hygrique et aéraulique. Ceux-ci incluent les effets des charges internes, les échanges avec les parois, et les gains et pertes liés à la ventilation (voir figure 3.3).

La pression intérieure est déterminée par l'expression :

$$\sum_i Q_{V,i} = \sum_i K_{a,i}(P_{ext,i} - P_{int}) + Q_{V,insufflation} - Q_{V,extraction} = 0 \quad (3.4)$$

La somme s'étend à l'ensemble des parois, ainsi qu'à toutes les ouvertures, caractérisées par une conductance vis-à-vis de l'air. Si une ouverture i a une caractéristique non linéaire (par exemple de la forme $Q_V = C_i \cdot \Delta P^{n_i}$), une conductivité équivalente est calculée à chaque pas de temps :

$$K_{a,i} = \frac{Q_V}{(P_{ext,i} - P_{int})} = C_i \cdot (P_{ext,i} - P_{int})^{n_i-1} \quad (3.5)$$

$P_{ext,i}$ désigne la pression à la surface externe correspondant à l'ouverture ou à la paroi i . Elle est calculée à l'aide de coefficients de surpression, qui dépendent de la vitesse et de l'orientation du vent vis-à-vis de la surface. Leur détermination est détaillée dans [Kalagasidis et Hagentoft, 2003].

Le bilan énergétique de la zone tient compte de la capacité calorifique additionnelle liée à l'humidité ; les bilans, thermique et hygrique, s'écrivent :

$$(\rho_a \cdot C_{p,a} + \rho_v \cdot C_{p,v}) \cdot V \cdot \frac{\partial T_{int}}{\partial t} + L \cdot \frac{\partial m_v}{\partial t} = \sum Q_{paroi} + Q_{ventil.} + Q_{charges} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial t} = 6,21 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_a \cdot V \cdot \frac{\partial p_{v,int}}{\partial t} = \sum G_{paroi} + G_{ventil.} + G_{charges} \quad (3.7)$$

L'indice *charges* correspond aux apports des charges internes (occupants, système de chauffage/rafraîchissement, etc.) L'indice *ventil.* se réfère aux entrées d'air, par un système de ventilation contrôlée aussi bien que par des infiltrations (y compris le flux d'air au travers des parois). Les flux de chaleur et d'humidité en provenance des parois sont détaillés ci-après.

Échanges avec et entre les parois

Les flux échangés entre une paroi *i* et le volume d'air s'écrivent :

$$Q_i = A_i \cdot h_{c,int} \cdot (T_{int} - T_{surf,i}) + L \cdot G_i \quad (3.8)$$

$$G_i = A_i \cdot h_{v,int} \cdot (p_{v,int} - p_{v,surf,i}) \quad (3.9)$$

A_i représente l'aire de la paroi, $h_{c,int}$ et $h_{v,int}$ sont les coefficients d'échanges convectif et massique respectivement ; ils sont par défaut pris constants. Leur valeur est à définir par l'utilisateur. Nous détaillerons plus loin (chapitre 4) les valeurs choisies dans notre cas.

Par ailleurs, les parois échangent entre elles par rayonnement à grande longueur d'onde. Ces échanges sont simplifiés et linéarisés, sous la forme d'un flux radiatif net (les détails sont décrits dans [Kalagasidis, 2004]) :

$$q_{r,i} = h_{r,int} \cdot (\overline{T_{surf}} - T_{surf,i}) \quad (3.10)$$

Où $\overline{T_{surf}}$ représente la température moyenne de l'ensemble des surfaces en présence. $h_{r,int}$ est pris constant et égal à 6 W/m²K (valeur par défaut).

Conditions aux limites extérieures

Les densités de flux incidents sur la surface extérieure sont décrits par :

$$q = h_{c,ext} \cdot (T_{ext} - T_{surf,i}) + L \cdot g_v + q_{r,ext} \quad (3.11)$$

$$g_v = h_{v,ext} \cdot (p_{v,ext} - p_{v,surf,i}) \quad (3.12)$$

q_r désigne les flux échangés par rayonnement :

$$q_{r,ext} = \alpha \cdot (E_{dir} + E_{dif}) + \epsilon \cdot (E_{GLO} - \sigma_0 \cdot T_{surf}^4) \quad (3.13)$$

σ_0 est la constante de Stefan-Boltzmann. E_{dir} et E_{dif} désignent respectivement le rayonnement solaire direct et diffus sur une surface, selon son orientation et sa pente, E_{GLO} le rayonnement grandes longueurs d'ondes incident sur cette même surface. α et ϵ désignent respectivement son absorptivité solaire et son émissivité.

3.3 Modélisation de la cellule expérimentale

La construction d'une cellule expérimentale en grandeur réelle fait apparaître de nombreuses singularités : montants d'ossature traversant les parois verticales, solives en plancher et plafond, porte, présence d'un comble qui modifie les échanges avec l'extérieur, infiltrations par des joints imparfaits, perforations dans les membranes... Tous ces éléments rendent la modélisation complexe, et ne peuvent pas être pris en compte ensemble dans un premier temps : étant donnée la multiplicité des facteurs, la validation globale risquerait d'être impossible (nombreuses sources d'erreurs possibles, ou erreurs se compensant les unes les autres). De ce fait, des choix ont dû être faits dans les éléments à modéliser, et ceux à laisser de côté dans un premier temps, et qui devront être abordés lors d'une deuxième phase.

3.3.1 Choix de modélisations effectués pour la cellule

A l'aide des composants de HAM-tools, un modèle de la cellule expérimentale a été créé ; il se compose au total d'une zone, de 11 parois, d'un système de chauffage-humidification, d'un système de ventilation, et d'un système de calculs des infiltrations d'air. La figure 3.4 montre une capture d'écran du modèle ainsi défini.

Les parois se décomposent en 3 groupes : les parois horizontales, les parois verticales, en partie courante (la partie isolée), y compris la porte, et les montants verticaux. Ceux-ci ont en effet été modélisés à part, comme des parois en parallèle, soumises comme les autres parois à des flux unidirectionnels.

Toutes les parois verticales sont définies de manière similaire, comportant chacune 3 couches. La figure 3.5 présente les 3 couches d'une paroi en section courante et leur discrétisation spatiale. Les montants sont modélisés de manière identique, seul le matériau central étant différent (épicéa de 165 mm d'épaisseur au lieu de laine de verre). Les numéros indiquent les nœuds qui serviront de comparaison avec les mesures.

Lorsque la paroi comporte un pare-vapeur, celui-ci est modélisé comme une simple résistance au transfert de vapeur et d'eau liquide, situé entre le parement intérieur et l'isolant.

3.3 Modélisation de la cellule expérimentale

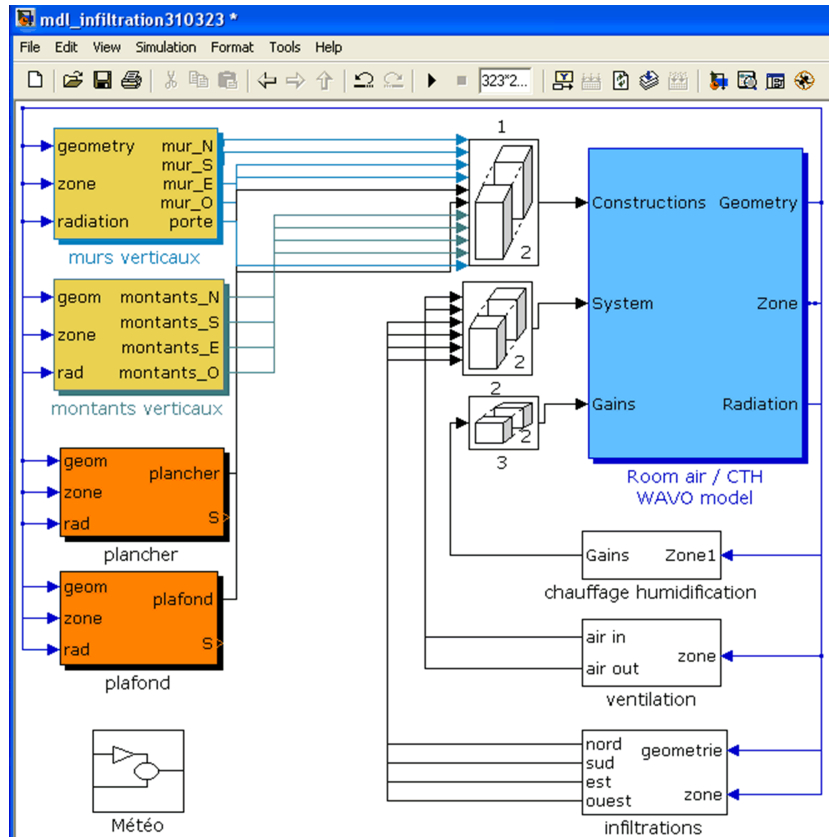


FIG. 3.4 : Capture d'écran du modèle de la cellule expérimentale dans HAM-tools

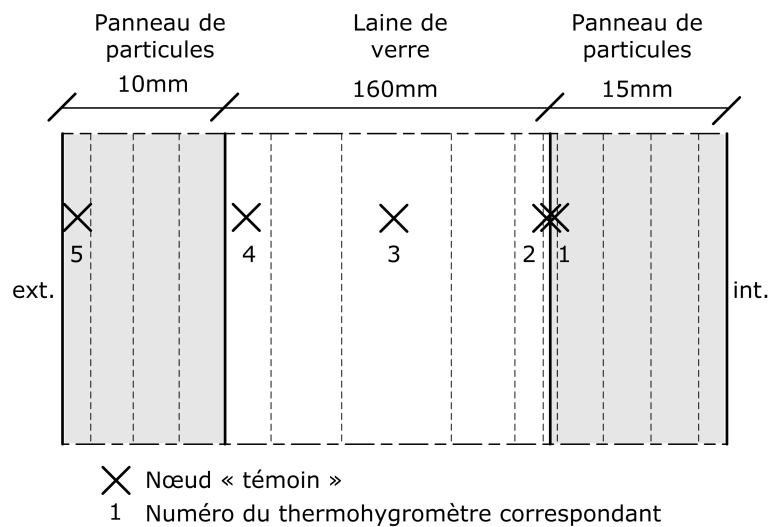


FIG. 3.5 : Maillage des parois à 3 couches et position des points de comparaison modèle-expérimentation, pour les murs Est et Ouest

Le pare-air n'est pas modélisé, étant supposé très perméable à la vapeur, et sans influence thermique; en revanche, les transferts d'air dans la paroi sont considérés comme nuls, du fait de sa présence.

Afin de pouvoir comparer les résultats des simulations numériques avec les valeurs expérimentales, un pas de temps de 10 minutes a été choisi pour la sortie des résultats. Les nœuds « témoins » ont été choisis pour être aussi près que possible de l'emplacement des capteurs dans la paroi de la cellule : leur emplacement est précisé sur la figure 3.5 pour les murs Est et Ouest, les murs Nord et Sud étant définis de manière analogue.

De manière à nous concentrer sur les parois verticales, le plancher et le plafond n'ont pas été modélisés en détail : seule la couche intérieure (plaque de plâtre ou OSB) est modélisée, pour son impact sur l'humidité dans la pièce. La température mesurée en surface intérieure (côté pièce principale) est utilisée comme condition limite extérieure (la faible résistance thermique de la couche permet de limiter fortement l'erreur commise). Une forte résistance hygrique modélise le pare-vapeur, rendant ces parois insensibles à l'humidité utilisée comme condition extérieure. Ce modèle est présenté sur la figure 3.6.

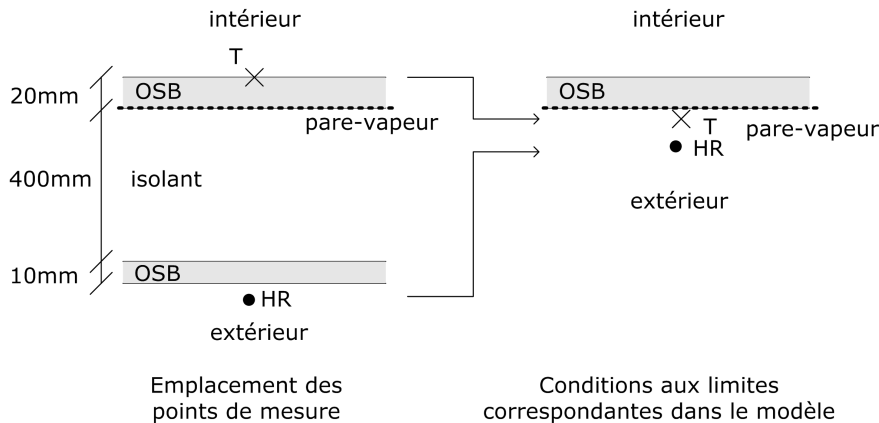


FIG. 3.6 : Modèle de plancher et conditions aux limites choisies

La perméabilité à l'air de la cellule a été modélisée comme la somme d'infiltrations sur les 4 faces de la cellule : en effet, les coefficients de surpression dépendent de l'orientation relative du vent et de la face, affectant ainsi la différence de pression entre l'intérieur et la surface extérieure, et donc le débit résultant. Les mesures de perméabilité à l'air réalisées sur la cellule expérimentale (voir chapitre 2.5.1) nous donnent la caractéristique globale $Q_V = C \cdot \Delta P^n$. Dans le modèle, nous répartissons les infiltrations d'air de la manière suivante :

$$Q_{V,Nord} = \frac{C}{2} \cdot \Delta P_{Nord}^n \quad Q_{V,Sud} = \frac{C}{6} \cdot \Delta P_{Sud}^n$$

$$Q_{V,Est} = \frac{C}{6} \cdot \Delta P_{Est}^n \quad Q_{V,Ouest} = \frac{C}{6} \cdot \Delta P_{Ouest}^n$$

3.3 Modélisation de la cellule expérimentale

La moitié de la perméabilité a été définie comme orientée au Nord, en raison de la présence de la porte. Lorsque la grille de ventilation est ouverte, celle-ci est entièrement affectée au Nord.

Le système de ventilation mécanique est modélisé par un débit volumique fixé par consigne.

3.3.2 Ajout d'un modèle de bardage

Principe

L'équation 3.13 ne permet pas de prendre en compte un bardage. Un premier modèle thermique a été développé dans le cadre de ces travaux, afin de pouvoir modéliser la paroi dans son ensemble. Le modèle est donc unidirectionnel. De plus, nous avons supposé le bardage sans effet sur les échanges d'humidité entre la paroi et l'air extérieur, seuls les effets thermiques sont modélisés. Un schéma du système de bardage est donné par la figure 3.7.

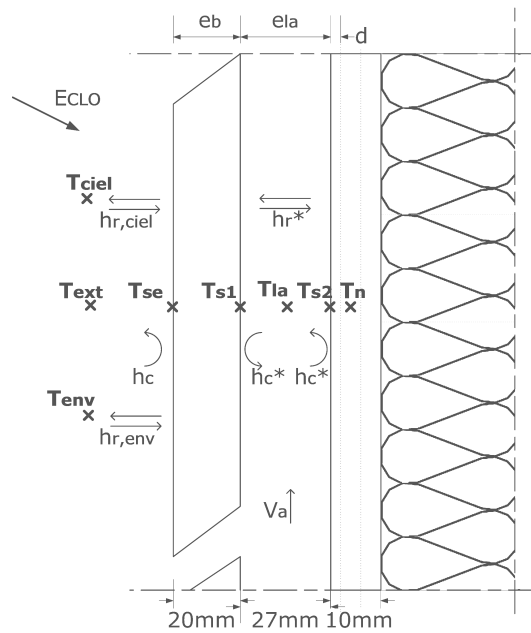


FIG. 3.7 : Schéma du système de bardage de la cellule test

Le schéma analogue utilisé est donné figure 3.8. L'hypothèse a été faite, dans un premier temps, de négliger la capacité calorifique du bardage et de considérer celui-ci comme une résistance pure. La surface externe du bardage, d'absorptivité solaire α_b , et d'émissivité ϵ_b (prise égale à son absorptivité en grandes longueurs d'ondes) absorbe un flux courtes longueurs d'ondes $\alpha_b \cdot (E_{dir} + E_{dif}) = \alpha_b \cdot E_{CLO}$.

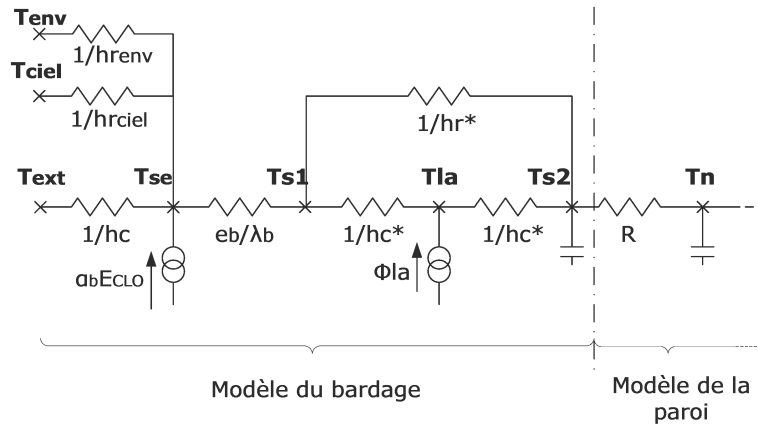


FIG. 3.8 : Schéma électrique utilisé pour modéliser les échanges thermiques liés au bardage

Elle échange également, en grandes longueurs d'ondes, avec la voûte céleste pour laquelle est définie une température radiative équivalente T_{ciel} , et l'environnement proche (sol, végétation, bâtiments), qu'on supposera à température ambiante T_{ext} . Enfin, un échange convectif a lieu entre l'air ambiant et la surface externe du bardage. L'épaisseur du bardage sera notée e_b .

La lame d'air a une épaisseur $e_{la} = 27$ mm, une largeur $L = 4,94$ m et une hauteur $H = 3,11$ m (correspondant à la hauteur des murs Nord et Sud). La température T_{la} y est supposée uniforme. Le flux d'air, vertical, induit un échange de chaleur entre le nœud de la lame d'air et l'air y entrant, supposé à la température extérieure.

La surface de la paroi proprement dite (surface du pare-pluie, à température T_{S2} , correspondant au positionnement du capteur HRT 5) échange par convection avec la lame d'air; les échanges radiatifs avec la surface T_{S1} (correspondant au positionnement du capteur TC 5) seront linéarisés (coefficient d'échange radiatif h_r^*).

Bilan au nœud T_{SE}

Le bilan énergétique au nœud de surface extérieure du bardage T_{SE} est donné par :

$$0 = \alpha_b \cdot E_{CLO} + h_c \cdot (T_{ext} - T_{SE}) + \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{S1} - T_{SE}) + \epsilon_b \sigma_0 \cdot (F \cdot (T_{ciel}^4 - T_{SE}^4) + (1 - F) \cdot (T_{env}^4 - T_{SE}^4)) \quad (3.14)$$

F désigne le facteur de forme selon lequel la surface du bardage « voit » la voûte céleste.

3.3 Modélisation de la cellule expérimentale

Cette relation est linéarisée sous la forme suivante :

$$0 = \alpha_b \cdot E_{CLO} + h_c \cdot (T_{ext} - T_{SE}) + \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{S1} - T_{SE}) + h_{r,ciel} \cdot (T_{ciel} - T_{SE}) + h_{r,env} \cdot (T_{env} - T_{SE}) \quad (3.15)$$

Les coefficients $h_{r,ciel}$ et $h_{r,env}$ seront déterminés (voir chapitre 4.3.1) en fonction de l'émissivité du bardage, ainsi que du facteur de forme F (respectivement $(1 - F)$).

En faisant l'hypothèse que l'environnement proche est à température ambiante $T_{env} = T_{ext}$, on obtient :

$$0 = \alpha_b \cdot E_{CLO} + (h_c + h_{r,env}) \cdot (T_{ext} - T_{SE}) + \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{S1} - T_{SE}) + h_{r,ciel} \cdot (T_{ciel} - T_{SE}) \quad (3.16)$$

Bilan aux autres nœuds

Les bilans énergétiques aux autres nœuds du modèle s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{SE} - T_{S1}) + h_c^* \cdot (T_{la} - T_{S1}) + h_r^* \cdot (T_{S2} - T_{S1}) \\ 0 = h_c^* \cdot (T_{S1} - T_{la}) + h_c^* \cdot (T_{S2} - T_{la}) + \Phi_{la} \\ d \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T_{S2}}{\partial t} = h_c^* \cdot (T_{la} - T_{S2}) + h_r^* \cdot (T_{S1} - T_{S2}) + \frac{1}{R} \cdot (T_n - T_{S2}) \end{array} \right. \quad (3.17)$$

Le bilan sur la partie « à droite » du nœud T_{S2} est inchangé par rapport au modèle initial de paroi présent dans HAM-Tools.

Flux solaire incident

Le calcul du rayonnement solaire incident sur les parois verticales a été écrit d'après [Bernard *et al.*, 1979; Jan, 1983]. Il se décompose en une part directe et une part diffuse :

$$\begin{aligned} E_{dir} &= E_{\perp} \cdot \cos h \cdot \cos(A - \gamma) \\ E_{dif} &= \frac{1}{2} \cdot E_{dif,horiz} + \frac{1}{2} \cdot albedo \cdot (E_{dif,horiz} + E_{dir,horiz}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Où $E_{dir,horiz}$ et $E_{dif,horiz}$ désignent respectivement le rayonnement solaire direct et diffus mesurés sur une surface horizontale, E_{\perp} le rayonnement sur une surface normale à la direction du soleil (équation 3.19). h et A sont la hauteur et l'azimut solaire, γ est l'orientation de la surface (0° au Sud, -90° à l'Est, $+90^\circ$ à l'Ouest, 180° au Nord).

$$E_{\perp} = E_{dir,horiz} \cdot \sin h \quad (3.19)$$

Flux apporté par la circulation d'air Φ_{la}

Le flux apporté par la circulation d'air au nœud T_{la} est donné par :

$$\Phi_{la} = C_{p,a}\rho_a \cdot (T_{ext} - T_{la}) \cdot \frac{v_a \cdot \text{Section de passage}}{\text{Surface de la paroi}}$$

$$\Phi_{la} = C_{p,a}\rho_a \cdot v_a \cdot \frac{e_{la}}{H} \cdot (T_{ext} - T_{la})$$

Ce flux est exprimé en W/m^2 de surface de la paroi. C_{pa} , ρ_a , et v_a sont respectivement la capacité calorifique, la masse volumique, et la vitesse de l'air dans la lame d'air. Cette même approche est décrite dans [Grau et Rode, 2006]; une approche similaire est également présentée dans [Künzel *et al.*, 2008].

Coefficients d'échanges convectifs

Les coefficients d'échanges convectifs h_c et h_c^* doivent également être déterminés; plusieurs approches sont possibles :

- Utilisation d'une valeur constante
- Valeur fonction de la vitesse du vent
- Valeur fonction de la vitesse et de l'orientation du vent vis-à-vis de la paroi
- Utilisation de corrélations de convection (nombres adimensionnels)
- Détermination à l'aide d'un code de mécanique des fluides

Étant donné la modélisation simplifiée mise en œuvre pour le bardage, seules les 3 premières approches ont été utilisées (voir chapitre 4).

Échanges radiatifs

Les échanges radiatifs entre deux surfaces peuvent être linéarisés. [Hagentoft, 2001] donne l'expression suivante pour un coefficient d'échanges radiatifs entre 2 surfaces i et j :

$$h_r = \frac{4 \cdot \sigma_0 \cdot \overline{T_{i,j}}^{-3}}{\frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i} + \frac{1}{F_{i,j}} + \frac{1-\epsilon_j}{\epsilon_j} \cdot \frac{A_i}{A_j}} \quad (3.20)$$

Dans le cas des deux surfaces S_1 et S_2 , planes, parallèles, de mêmes dimensions et peu espacées (les facteurs de formes sont tels que $F_{12} = F_{21} = 1$), [Hagentoft, 2001] donne la relation suivante :

$$h_r^* = 4 \cdot \sigma_0 \cdot \left(\frac{T_{S1} + T_{S2}}{2} \right)^3 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_b} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (3.21)$$

où ϵ_2 désigne l'émissivité de la surface de la paroi, dans notre cas celle du pare-pluie.

3.3 Modélisation de la cellule expérimentale

Dans le cas d'une paroi et de la voûte céleste, le rapport A_i/A_j tend vers 0. Si cette paroi est verticale, et l'horizon dégagé, on a $F_{i,j} = 0,5$. Le coefficient d'échange radiatif s'écrit alors :

$$h_{r,ciel} = 4 \cdot \sigma_0 \cdot \left(\frac{T_i + T_{ciel}}{2} \right)^3 \cdot \frac{\epsilon_i}{1 + \epsilon_i} \quad (3.22)$$

Il en ira de même pour $h_{r,env}$:

$$h_{r,env} = 4 \cdot \sigma_0 \cdot \left(\frac{T_i + T_{ext}}{2} \right)^3 \cdot \frac{\epsilon_i}{1 + \epsilon_i} \quad (3.23)$$

Pour déterminer totalement ces échanges, il reste à calculer la température du ciel, le rayonnement grandes longueurs d'ondes incident au sol n'étant pas mesuré. Différentes corrélations donnent la température du ciel en fonction de la température d'air, de la nébulosité du ciel, ou de l'humidité (nous l'évoquerons au chapitre 4.3.1).

3.3.3 Propriétés des matériaux utilisées dans le modèle

Au chapitre 2.4.2, nous avons évoqué une campagne de détermination des caractéristiques des matériaux employés dans la cellule expérimentale. Les détails des procédures de mesures sont présentés en annexe D. Cette campagne se poursuit, du fait des longs délais de stabilisation pour certains matériaux. Nous détaillons ici les valeurs prises pour le modèle. Quand les données mesurées étaient disponibles, nous les avons utilisées. Dans le cas contraire, nous avons utilisé des valeurs issues de la littérature. Dans plusieurs cas, nous avons dû extrapoler les valeurs à partir des premières mesures, tous les résultats n'étant pas encore disponibles au moment de mener les calculs.

La conductivité thermique est prise constante, égale à la valeur obtenue pour un matériau sec.

HAM-tools utilise les propriétés hygriques des matériaux sous forme de tableau de valeurs, et effectue une interpolation linéaire entre les valeurs connues. La courbe de sorption est entrée sous la forme $w = f(\text{HR})$, la perméabilité à la vapeur sous la forme $\delta_p = f(w)$.

Ne disposant pas de valeurs pour la conductivité liquide, nous avons utilisé la base de données du modèle WUFI (voir au chapitre 3.1.1). Celle-ci donne une conductivité liquide nulle pour les panneaux de particules. Par ailleurs, [Mendoza, 2004] a montré que, lorsque l'humidité relative ambiante reste dans la zone *hygroscopique* de la courbe de sorption (moins de 90% HR), les résultats de calculs d'un modèle ne prenant pas en compte les transferts d'eau sous forme liquides sont très

proches de ceux donnés par un modèle plus complet. La conductivité liquide a été prise constante à $K = 10^{-50}$ s, ne pouvant être annulée pour des raisons numériques.

Panneau de particules

Grandeur	Valeur	Source
ρ_0	700 kg/m ³	Mesures
C_p	1400 J/kgK	Mesures
λ	0,107 W/mK	Mesures
ϵ	0,88	Mesures

TAB. 3.2 : Caractéristiques thermiques des panneaux de particules

HR (-)	0	0,3	0,5	0,65	0,8	0,9	1
w (kg/m ³)	0	26,2	40,6	57,4	130	170	400
Source		Mesures			Extrapolation		

TAB. 3.3 : Capacité hygroscopique des panneaux de particules

w (kg/m ³)	0	26,2	130	400
δ_p (s)	1.10^{-12}	$2,85.10^{-12}$	$4,5.10^{-12}$	8.10^{-12}
Source		Mesure ¹	Extrapolation	

¹Valeur issue d'une première série de mesures, non présentée en annexe

TAB. 3.4 : Perméabilité à la vapeur des panneaux de particules

Panneau d'OSB

Grandeur	Valeur	Source
ρ_0	601 kg/m ³	Mesures
C_p	1450 J/kgK	Mesures
λ	0,098 W/mK	Mesures
ϵ	0,89	Mesures

TAB. 3.5 : Caractéristiques thermiques des panneaux d'OSB

3.3 Modélisation de la cellule expérimentale

HR (-)	0	0,3	0,5	0,65	0,8	1
w (kg/m ³)	0	22,8	35,2	48,8	88	350
Source		Mesures			Extrapolation	

TAB. 3.6 : Capacité hygroscopique des panneaux d'OSB

w (kg/m ³)	0	22,8	48,8	350
δ_p (s)	1.10^{-12}	$1,81.10^{-12}$	2.10^{-12}	5.10^{-12}
Source		Mesure ¹	Extrapolation	

¹Valeur issue d'une première série de mesures, non présentée en annexe

TAB. 3.7 : Perméabilité à la vapeur des panneaux d'OSB

Plaque de plâtre

Grandeur	Valeur	Source
ρ_0	712 kg/m ³	Mesures
C_p	870 J/kgK	[Kumaran, 1996]
λ	0,190 W/mK	Mesures
ϵ	0,85	Mesures

TAB. 3.8 : Caractéristiques thermiques des plaques de plâtre

HR (-)	0	0,3	0,5	0,65	1
w (kg/m ³)	0	0,904	1,69	2,39	10
Source		Mesures			Extrapolation

TAB. 3.9 : Capacité hygroscopique des plaques de plâtre

w (kg/m ³)	0	0,904	10
δ_p (s)	2.10^{-11}	$2,17.10^{-11}$	5.10^{-11}
Source		Mesure ¹	Extrapolation

¹Valeur issue d'une première série de mesures, non présentée en annexe

TAB. 3.10 : Perméabilité à la vapeur des plaques de plâtre

Laine de verre

Grandeur	Valeur	Source
ρ_0	19,4 kg/m ³	Mesures
C_p	840 J/kgK	[Kumaran, 1996]
λ	0,032 W/mK	Mesures

TAB. 3.11 : Caractéristiques thermiques de la laine de verre

HR (-)	0	0,2	0,43	0,64	0,849	0,951	0,98	1
w (kg/m ³)	0	0,17	0,23	0,27	0,32	0,36	0,49	0,95
Source	[Kumaran, 1996]							

TAB. 3.12 : Capacité hygroscopique de la laine de verre

La perméabilité à la vapeur est prise constante et égale à $\delta_p = 1,57 \cdot 10^{-10}$ s [Kumaran, 1996].

Épicéa (montants)

Les caractéristiques thermiques sont prises constantes, égales aux valeurs pour un matériau sec.

Grandeur	Valeur	Source
ρ_0	378 kg/m ³	Mesures
C_p	1500 J/kgK	Mesures
λ	0,107 W/mK	Mesures

TAB. 3.13 : Caractéristiques thermiques de l'épicéa

HR (-)	0	0,3	0,5	0,65	0,88	1
w (kg/m ³)	0	12,1	24,0	38,4	66,8	748
Source	Mesures				[Kumaran <i>et al.</i> , 2002]	

TAB. 3.14 : Capacité hygroscopique de l'épicéa

w (kg/m ³)	0	12,1	24,0	38,4	66,8	748
δ_p (s)	1.10^{-13}	$1,08.10^{-12}$	$3,13.10^{-12}$	$7,2.10^{-12}$	$2,5.10^{-11}$	$5,68.10^{-11}$
Source	[Kumaran <i>et al.</i> , 2002]					

TAB. 3.15 : Perméabilité à la vapeur de l'épicéa

Mélèze (bardage)

Seuls la conductivité thermique, l'absorptivité solaire et l'émissivité du bardage sont nécessaires au modèle.

Grandeur	Valeur	Source
λ	0,13 W/mK	Mesures
α	0,4	Mesures
ϵ	0,86	Mesures

TAB. 3.16 : Caractéristiques thermiques du mélèze

Film pare-pluie

L'émissivité du pare-pluie est de $\epsilon = 0,75$ (mesures).

3.4 Synthèse

Un modèle de la cellule expérimentale a été développé dans HAM-tools, en raison de la bonne adéquation de ce modèle à nos besoins : celui-ci permet une description détaillée des champs de température et d'humidité dans les parois d'un bâtiment, tout en déterminant le climat interne résultant de diverses sollicitations (conditions météorologiques, charges internes). En outre, le modèle de HAM-tools prend en compte de manière détaillée les couplages entre transferts de chaleur et d'humidité. Enfin, sa structure modulaire et son caractère « transparent » en font un outil souple et le modèle de base peut être étendu ou modifié aisément.

En raison de la complexité de la construction expérimentale, et afin de valider le modèle pas à pas, des simplifications ont dû être faites, en négligeant en particulier les effets bi- et tri-dimensionnels. Les points clés du modèle de la cellule expérimentale sont listés ci-dessous :

- seule la pièce principale est prise en compte dans le modèle ;

- seules les parois verticales sont modélisées : en partie courante, les montants traversants, et la porte ;
- la première couche des parois horizontales est prise en compte pour son effet sur l'humidité dans la pièce ;
- les transferts d'air au travers des parois sont supposés nuls ;
- l'infiltration d'air dans la pièce est déterminée selon la vitesse et la direction du vent ;
- un modèle de bardage a été créé ; il comporte 3 paramètres principaux inconnus : la vitesse d'air v_a , la température de ciel T_{ciel} , et les coefficients d'échange convectifs h_c et h_c^* ;
- les caractéristiques des matériaux utilisées dans les calculs sont, pour partie, issues de mesures effectuées durant ce travail.

Le modèle de bâtiment développé et présenté ici nécessite d'être validé. En effet, il nous faut vérifier qu'il est capable de prévoir le comportement hygrothermique de la cellule correctement ; certains paramètres doivent être ajustés pour ce faire. Nous avons utilisé certaines des séquences expérimentales présentées au chapitre 2.5 à cet effet. La démarche et les résultats de la confrontation du modèle et de l'expérimentation sont présentés au chapitre 4.

Chapitre 4

Confrontation - Modélisation et expérimentation

Notations : dans ce chapitre, la notation « TC » désignera les thermocouples, la notation « HRT » désignera les thermohygromètres. Les nœuds de calculs seront désignés par le nom du capteur correspondant (voir figure 3.5). Le numéro se réfère à la position du capteur, comme présenté à la figure 2.11, rappelée ci-dessous. Ainsi, en partie courante, « HRT 3, mesures » désigne le thermohygromètre n°3, c'est à dire celui placé au milieu de l'isolant. « HRT 3, modèle », se réfère aux résultats du modèle pour le nœud situé au même endroit dans la paroi.

Les séquences présentées par la suite correspondent à celles présentées au chapitre 2.5, tableau 2.3 page 39.

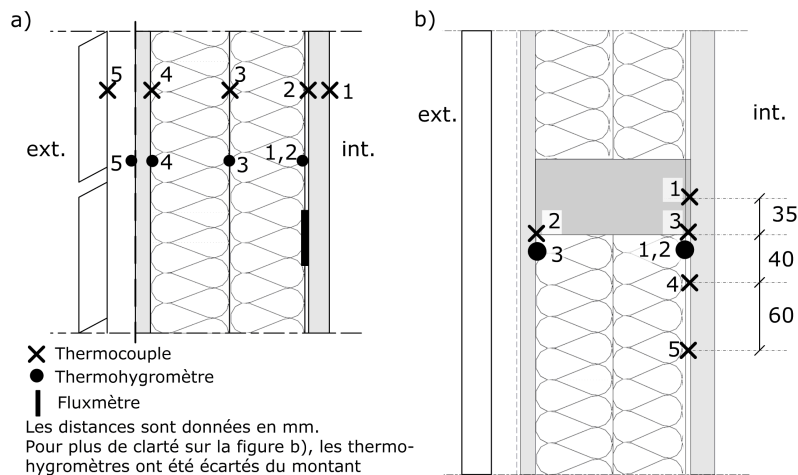


FIG. 4.1 : Rappel du positionnement des capteurs : a) en section courante, b) au niveau d'un montant Est

Le modèle présenté au chapitre 3 a été utilisé pour simuler certaines des séquences réalisées sur la cellule expérimentale, afin d'évaluer sa validité. Ce travail a été réalisé en différentes étapes successives. La structure modulaire du modèle permet en effet de découpler certains éléments les uns des autres ; ainsi, le modèle de paroi verticale seule a tout d'abord été ajusté. Ensuite, le modèle de la zone y a été couplé. Enfin, le modèle de bardage est traité, lui aussi couplé à la paroi verticale.

4.1 Modèle de paroi

Afin de s'affranchir dans un premier temps du comportement du bardage, la température mesurée en surface de la paroi proprement dite (capteur HRT 5) a été imposée, dans le modèle, comme étant la température du premier nœud en surface (voir figure 3.5). Côté intérieur, la température mesurée par la sonde platine a été utilisée comme condition limite. Seul le coefficient d'échange convectif avec l'intérieur est donc à déterminer.

Pour les calculs de transferts d'humidité, côté intérieur, l'humidité relative mesurée par le thermohygromètre placé au centre de la cellule est utilisée comme donnée d'entrée. Côté extérieur, nous considérons que le bardage n'a pas d'impact sur l'humidité en contact avec la paroi. Nous utiliserons donc directement la pression de vapeur extérieure (déterminée par la mesure de température et d'humidité relative à la station météo) comme condition limite.

4.1.1 Comportement thermique

Paroi en partie courante

La figure 4.2 présente les résultats de calculs, ainsi que les mesures de température dans la paroi Est, pour la séquence B (automne, chauffage constant à 20°C). Les variations et le niveau des températures sont bien reproduits par le modèle : la figure 4.3 donne les écarts, calculés comme suit :

$$\Delta T = T_{calc} - T_{mes}$$

Un paramètre inconnu était à déterminer : le coefficient d'échange convectif $h_{c,int}$. [Miranville, 2002] propose la valeur de $h_{c,int} = 4,09 \text{ W/m}^2\text{K}$; cette valeur a été utilisée comme point de départ, puis plusieurs valeurs ont été utilisées pour ajuster au mieux le modèle. Le tableau 4.1 donne les écarts moyens et maximums observés, en valeur absolue, pour trois valeurs. C'est la valeur de $h_{c,int} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$ qui minimise les écarts, tant moyens que maximums. C'est avec cette valeur qu'ont

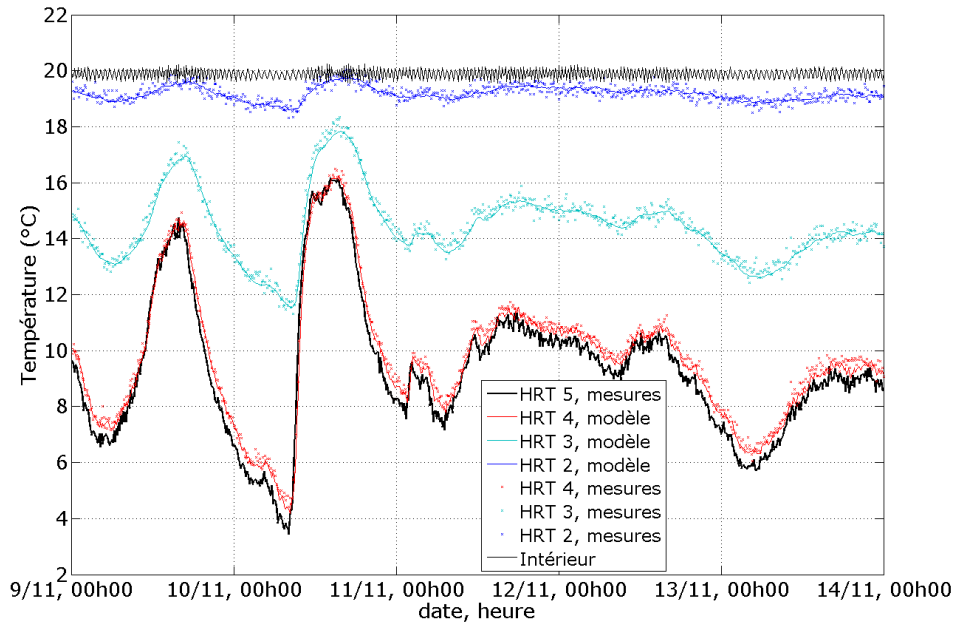


FIG. 4.2 : Température sur le pare- pluie, dans la paroi Est, et à l'intérieur, du 9 au 14 novembre 2008 ; $h_{c,int} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$

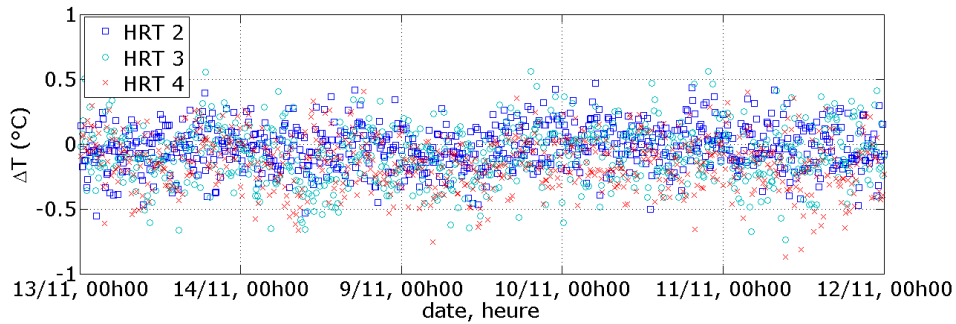


FIG. 4.3 : Écart entre les températures calculées et mesurées dans la paroi Est, du 9 au 14 novembre 2008 ; $h_{c,int} = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$

$h_{c,int}$	$ \Delta T _{moyen}$	$ \Delta T _{maximum}$
4,09 $\text{W/m}^2\text{K}$	0,197°C	1,00°C
6 $\text{W/m}^2\text{K}$	0,176°C	0,872°C
8 $\text{W/m}^2\text{K}$	0,189°C	0,926°C

TAB. 4.1 : Séquence B, écarts de températures entre le modèle et les mesures, pour différents coefficients d'échange convectif intérieur

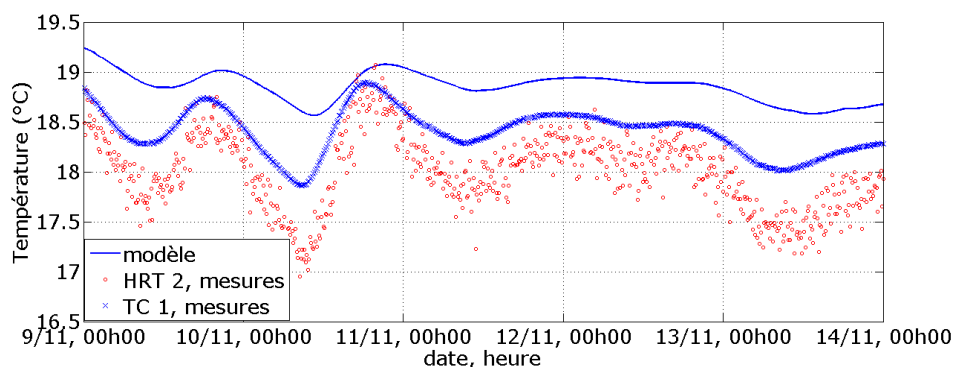


FIG. 4.4 : Température derrière le parement intérieur, au niveau du montant Est, mesurée et calculée en une dimension, du 9 au 14 novembre 2008

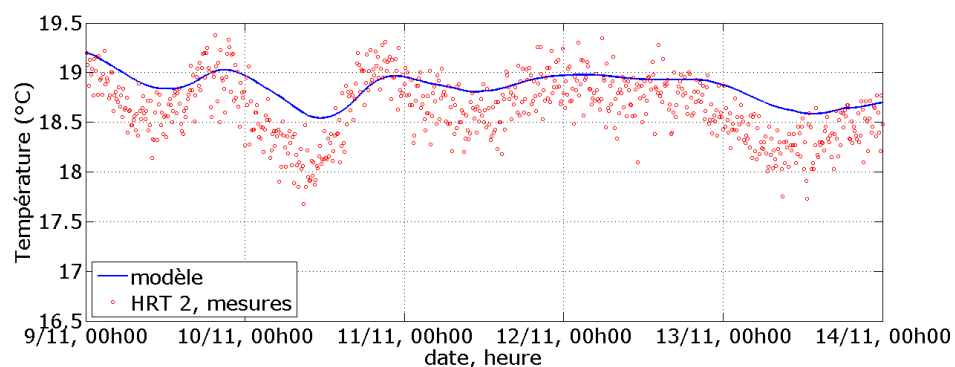


FIG. 4.5 : Température derrière le parement intérieur, au niveau du montant Ouest, mesurée et calculée en une dimension, du 9 au 14 novembre 2008

été obtenues les courbes présentées sur la figure 4.2. Toutefois, l'incidence de ce paramètre est relativement faible, en raison du faible écart entre la température de surface et la pièce. Par ailleurs, nous avons pu vérifier que les conditions initiales de température dans la paroi n'influençaient les valeurs calculées que sur une très courte période (1 à 2h). Ceci est lié à la faible inertie thermique de la paroi.

Modèle de montant

Comme expliqué au chapitre 3.3, les montants ont été modélisés comme une paroi unidimensionnelle, en parallèle de la partie courante. Les effets bidimensionnels ne sont dans ce cas pas pris en compte. La figure 4.4 montre que la température calculée est supérieure à la température mesurée au centre du montant Est (thermocouple TC 1, voir figure 4.1.b), elle-même légèrement supérieure à la température mesurée à la frontière entre l'isolant et le montant (thermohygromètre HRT 2). Cette situation

semble mettre en évidence des erreurs dans les mesures : elles peuvent provenir soit d'un problème au niveau de l'un ou l'autre des capteurs, soit d'un mauvais positionnement.

La figure 4.5 montre en revanche qu'en paroi Ouest, le modèle donne le même niveau de température que les mesures effectuées. Il en va de même pour les murs Nord et Sud (non présentés ici). En particulier, les niveaux de températures (mesurées et calculées) sont identiques pour ces trois dernières parois, alors que les mesures donnent une température plus basse à l'Est. En se basant sur la figure 4.5, nous pouvons conclure que le modèle unidimensionnel permet, en première approximation, de représenter correctement les ponts thermiques liés aux montants.

Lors du démontage partiel des parois (pour modifier l'isolant), nous avons constaté que ce capteur (HRT 2) avait été légèrement repoussé (1 cm) vers l'extérieur de la paroi, ce qui peut expliquer une température mesurée plus basse ; ce déplacement s'est probablement produit lors de la pose de l'isolant.

4.1.2 Comportement en humidité

C'est la séquence D (hiver, pare-vapeur, génération d'humidité dans la pièce) qui a été choisie pour valider et ajuster le modèle de paroi en humidité. La présence du pare-vapeur permet d'isoler deux parties dans la paroi, régies par des phénomènes différents : côté intérieur, le transfert d'humidité au travers d'un matériau hygroscopique (panneau de particules), en conditions quasi isothermes, et sollicité par une variation lente de l'humidité ambiante. De l'autre, une paroi multi-couches (panneau de particules et laine de verre), soumise à des variations importantes de températures sur une face, et subissant des sollicitations hygriques faibles.

Paroi en partie courante

La figure 4.6 présente l'humidité absolue calculée et mesurée dans la paroi Est. Le modèle reproduit correctement le comportement du côté intérieur (capteur HRT 1). En revanche, côté extérieur, des différences plus importantes apparaissent. En particulier, les pics ne sont pas toujours estimés correctement, malgré un niveau global légèrement trop élevé. La figure 4.7 montre l'écart entre les calculs et les valeurs mesurées :

$$\Delta HA = HA_{calc} - HA_{mes}$$

Durant les premiers jours en particulier, ces figures montrent que le modèle, globalement, surestime le niveau d'humidité. On remarque également les pics, négatifs ($\simeq 1 g_v/kg_a$ d'écart), de l'erreur commise : ils correspondent aux rapides

augmentations d'humidité absolue, et sont pour partie dus à un léger déphasage (environ 1 h) : le modèle réagit plus lentement que ce que donnent les mesures. De plus, il sous-estime la quantité d'eau désorbée par le contreventement, en particulier lors du premier pic de température. Nous n'utilisons pour nos calculs que la courbe de première adsorption, il se peut alors que, dans ce cas, celle-ci ne soit pas suffisante. En revanche, les écarts au niveau du capteur HRT 1 sont très faibles, et inférieurs à l'incertitude sur les capteurs (à 20°C, 5% HR correspondent à 0,73 g_v/kg_a).

Influence des conditions initiales

Comme nous l'avons vu au chapitre 2.5, ce sont les migrations internes à la paroi, dues aux variations de températures, qui sont la cause principale des transferts d'humidité à l'échelle de la journée. Aussi, le niveau initial de l'humidité dans la paroi représente un paramètre très important pour en évaluer correctement le comportement. La figure 4.8 (double page suivante) l'illustre : les conditions initiales choisies sont les suivantes :

- 70% HR dans le contreventement, au lieu de 65% HR dans le cas précédent ; à 2°C (température initiale), 5% HR représentent 0,22 g_v/kg_a
- 40% HR dans la laine de verre, comme précédemment
- 25% HR dans le parement intérieur, au lieu de 30% HR ; à 20°C, 5% HR représentent 0,73 g_v/kg_a

Malgré la différence relativement faible des deux choix, il se produit une nette élévation du niveau global ($\simeq 1g_v/kg_a$) côté extérieur, alors même que les variations calculées restent correctes. La période de 11 jours sur laquelle s'étendent nos calculs n'est pas suffisante pour s'en affranchir. Il est alors probable que les conditions initiales choisies précédemment ne soient pas « optimales », ce qui peut expliquer que le niveau global soit légèrement trop élevé. Différents calculs ont montré que ce n'est pas tant la valeur à l'instant de démarrage des calculs qui compte que le niveau moyen qui précède la séquence étudiée : c'est la masse d'eau présente dans la paroi qui est le facteur déterminant. Du côté intérieur, de même, la période de 11 jours ne permet pas de s'affranchir des conditions initiales, bien que la sollicitation aille dans le sens de la réduction de l'écart. Les mêmes calculs ont été effectués avec une période de pré-simulation de 7 jours, avec des conclusions identiques.

Cette situation est gênante pour la validation du modèle : en effet, nous ne disposons que de séquences courtes (moins de 3 semaines) pour valider le modèle dans chacun des scénarios de production de charges internes mis en œuvre. L'utilisation de plusieurs séquences à la suite les unes des autres est théoriquement possible, les mesures étant réalisées en continu. Toutefois, le fait d'enchaîner différents types de scénarios (ventilation, génération de vapeur continue ou intermittente, chauffage continu ou non) risquerait d'entraîner un cumul d'erreurs ayant des causes différentes, et d'autre part ne permettrait pas une bonne lisibilité des résultats, en l'absence de régime établi.

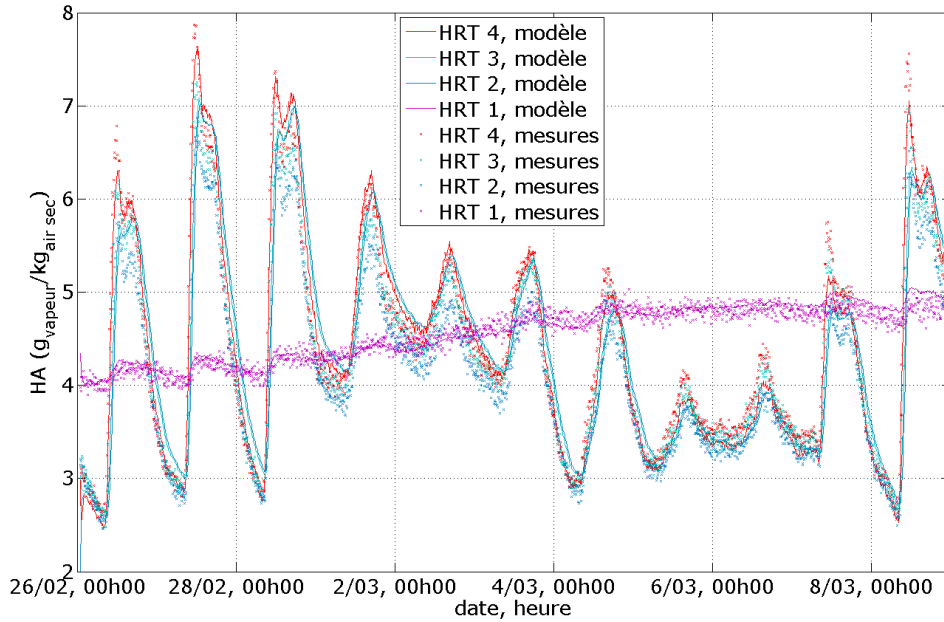


FIG. 4.6 : Humidité absolue dans la paroi Est, du 26 février au 9 mars 2009

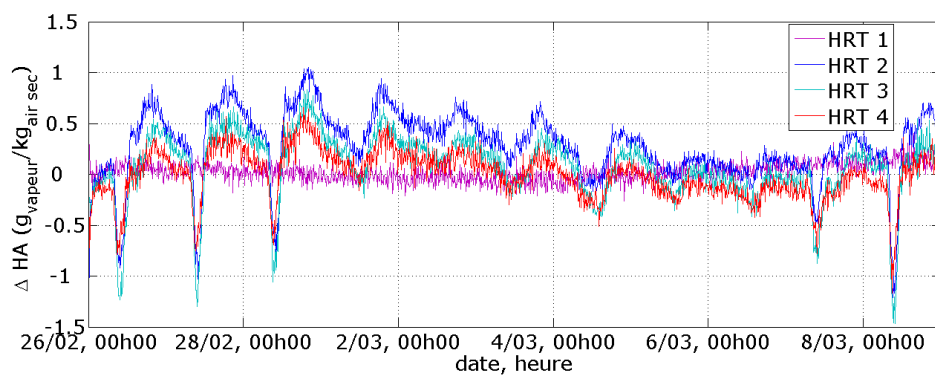


FIG. 4.7 : Écarts entre les résultats de calculs et les mesures d'humidité absolue dans la paroi Est, du 26 février au 9 mars 2009

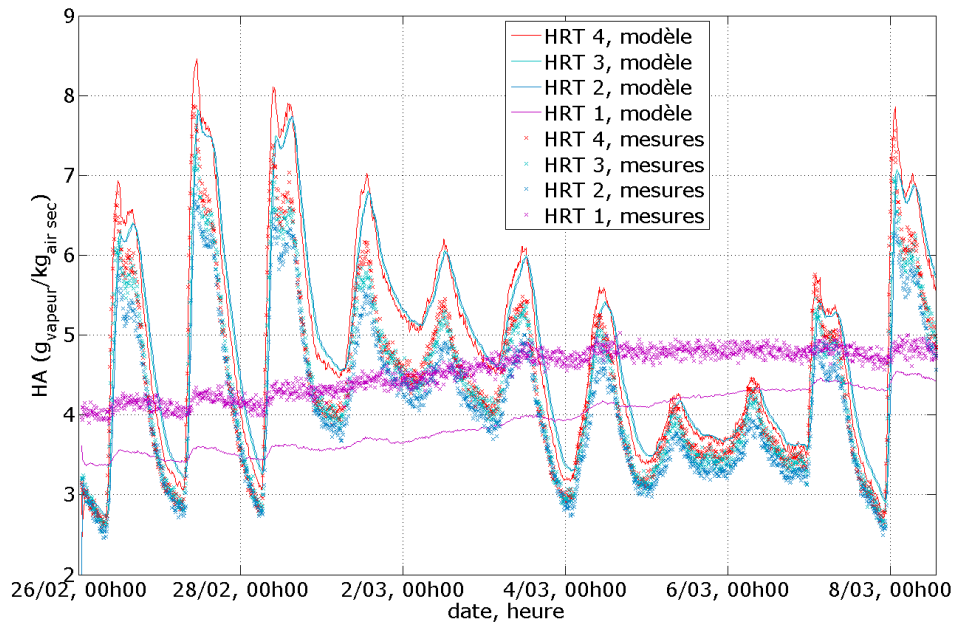


FIG. 4.8 : Humidité absolue dans la paroi Est, du 26 février au 9 mars 2009, avec des conditions initiales inadaptées

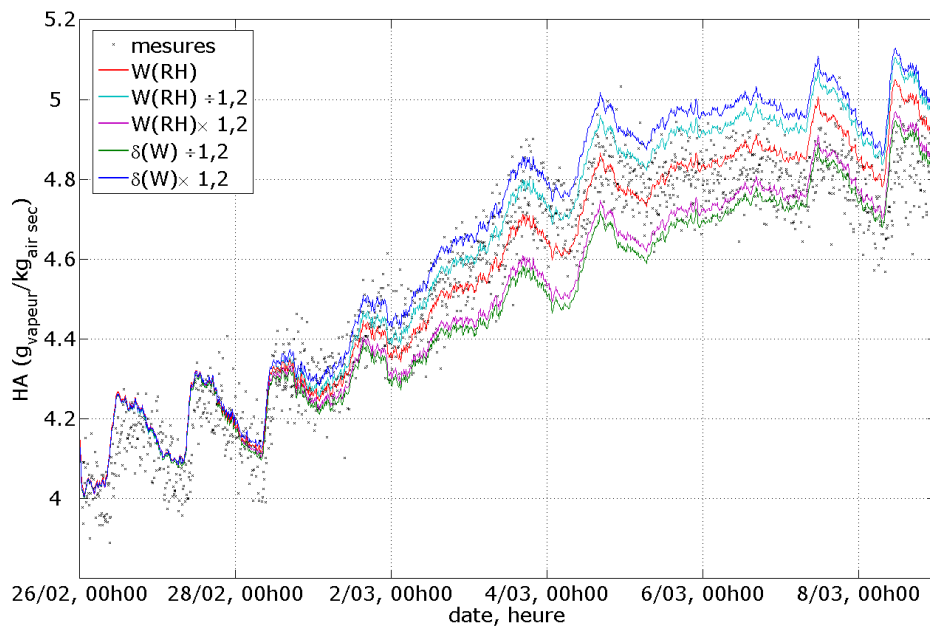


FIG. 4.9 : Humidité absolue derrière le parement intérieur Est (HRT 1), du 26 février au 9 mars 2009, en modifiant les propriétés du matériau

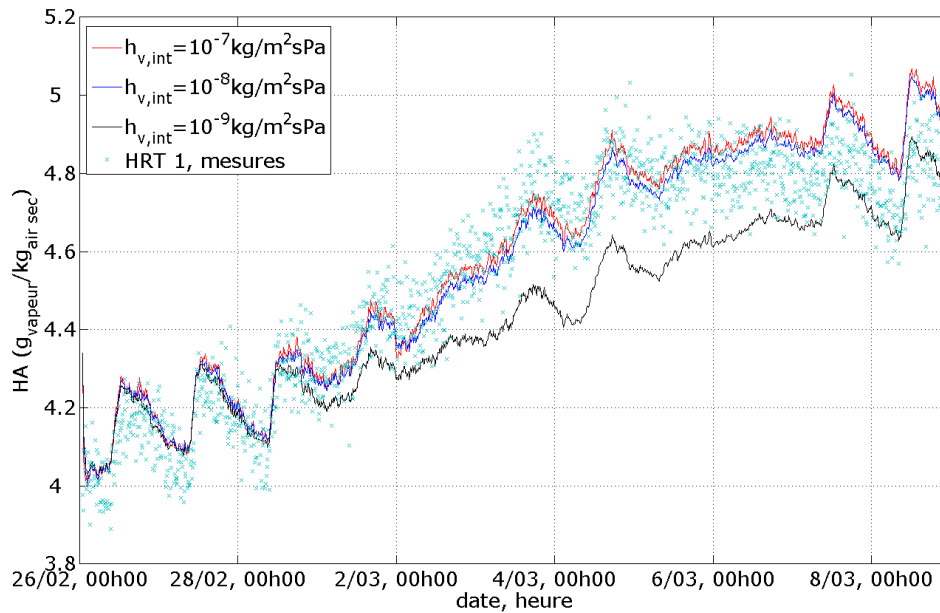


FIG. 4.10 : Humidité absolue derrière le parement intérieur, du 26 février au 9 mars 2009, pour différentes valeurs de coefficients d'échange surfacique massique

Influence des propriétés des matériaux

Les propriétés des matériaux utilisés étant en cours de détermination lors des calculs, nous avons étudié l'effet des incertitudes sur ces données. Nous avons fait varier la perméabilité à la vapeur des panneaux de particules, ainsi que leur courbe de sorption, de $\pm 20\%$. La figure 4.9 montre l'impact de ces variations sur le panneau de parement intérieur. L'influence de ces propriétés est très faible ; malgré ces variations de 20%, nous restons dans l'intervalle de confiance des thermohygromètres. Toutefois, une étude sur une période plus longue permettrait de mieux évaluer l'importance de ces paramètres. Les calculs montrent que l'impact est du même ordre de grandeur sur le côté extérieur de la paroi (capteurs HRT 2, 3 et 4).

Influence du coefficient d'échange surfacique

De même qu'en thermique, nous avons étudié le coefficient d'échange surfacique : la figure 4.10 présente les valeurs mesurées et calculées derrière le parement intérieur (capteur HRT 1) pour 3 valeurs.

La figure 4.10 montre que $h_{v,int} = 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ permet d'approcher au mieux l'évolution de l'humidité. Une valeur de $h_{v,int} = 10^{-9} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ ne permet pas de s'approcher autant des mesures : l'échange avec la zone est trop faible. La

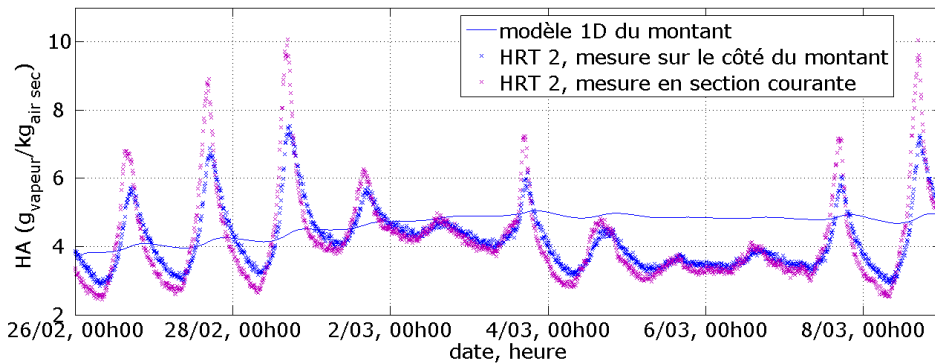


FIG. 4.11 : Humidité absolue dans la paroi Ouest, du 26 février au 9 mars 2009

différence négligeable entre les valeurs $h_{v,int} = 10^{-7} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ et $10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$, séparés pourtant d'un facteur 10, est liée au fait que la résistance de contact ($1/h_v$) devient négligeable devant la résistance offerte par le matériau lui-même. Ce phénomène est montré par [Steskens *et al.*, 2008].

On remarque enfin que l'influence de ce paramètre reste très faible, en particulier devant l'influence des conditions initiales, dans le cas d'une période de calculs courte. Il en va de même côté extérieur, c'est pourquoi nous prendrons des deux côtés une valeur constante de $h_{v,int} = h_{v,ext} = 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$.

Modèle de montant

La figure 4.11 montre l'humidité absolue calculée entre le montant et le pare-vapeur, et la mesure réalisée sur le côté du montant, contre le pare-vapeur également (HRT 2, voir figure 4.1.b). Le capteur étant situé à la frontière avec l'isolant, il subit des variations bien plus importantes que le nœud « témoin » du modèle de montant, placé comme le thermocouple TC 1 : les variations d'humidité sont plus faibles, l'humidité ne transitant qu'au travers du bois, alors que le capteur mesure des variations liées à la désorption/sorption du contreventement (un transfert d'humidité a lieu au travers de la laine de verre). L'instrumentation de la cellule expérimentale, telle que définie actuellement, ne permet donc pas de conclure sur la validité ou non du modèle hygrique unidimensionnel du montant ; elle peut en revanche être utile pour une approche bi-dimensionnelle.

Les mesures montrent des variations de moindre amplitude qu'en section courante de la paroi, en raison de la proximité du bois. Ce constat met en évidence un effet bi-dimensionnel introduit par la présence des montants. La modélisation du montant et de la section courante comme deux parois en parallèle, subissant des transferts unidirectionnels, et sans interaction l'une sur l'autre, sera donc insuffisante.

4.1.3 Synthèse

Nous avons ici montré que le modèle unidimensionnel de paroi permet d'approcher très bien les mesures de température dans la section courante de la paroi, et d'estimer correctement l'effet du pont thermique créé par les montants. Les transferts d'humidité sont bien estimés dans un cas isotherme, avec une sollicitation simple en humidité. Le modèle s'avère également capable de décrire le phénomène de désorption/sorption d'humidité par un panneau de contreventement hygroscopique soumis à des variations de température. Toutefois, l'amplitude de ce phénomène et sa rapidité sont légèrement sous-estimés par le modèle lorsque la variation de la température est très rapide.

4.2 Couplage avec la zone intérieure

Nous avons ensuite procédé à des simulations en couplant ce modèle de paroi avec le modèle de zone, comme présenté au chapitre 3.3. Les conditions aux limites extérieures sont les mêmes que précédemment : température mesurée contre le pare-pluie pour les parois Est et Ouest, entre l'isolation et le contreventement pour les parois Nord et Sud, ainsi que pour les montants. La pression de vapeur extérieure est utilisée comme condition extérieure pour l'ensemble des parois. De plus, les températures mesurées au niveau du plancher et du plafond sont utilisées comme données d'entrée. À partir de ces informations, le modèle effectue le bilan des parois verticales et de la zone, en tenant compte du système de ventilation, des infiltrations et des charges internes.

4.2.1 Comportement thermique

Les résultats obtenus pour la séquence A (été, évolution libre) sont présentés sur la figure 4.12 et dans le tableau 4.2. La figure, pour plus de clarté, ne montre que la température dans la zone. Deux mesures y figurent : celles de la sonde platine, et celles du thermohygromètre au centre de la pièce. Les écarts entre calculs et mesures, calculés comme précédemment, sont présentés sur la figure 4.13. Un bon accord est observé entre les résultats de calculs et les mesures ; le calcul donne systématiquement une température légèrement plus élevée (environ $0,3^{\circ}C$) que la sonde platine. En revanche, la différence avec le thermohygromètre est tantôt positive, tantôt négative ; ce phénomène est en partie dû au bruit de mesure du thermohygromètre. Nous pouvons alors considérer que notre modèle représente convenablement le comportement thermique de la cellule, aux vues des incertitudes expérimentales.

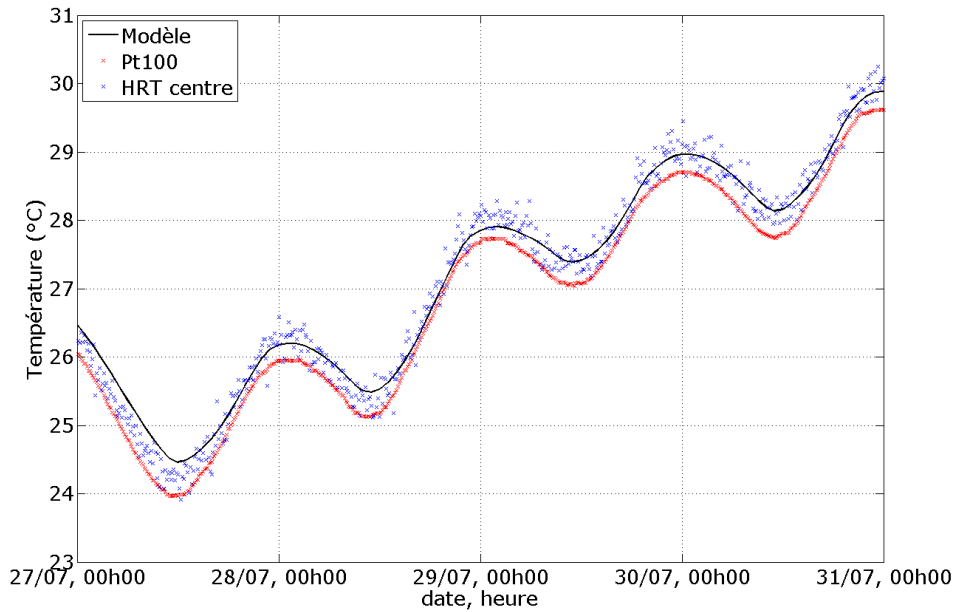


FIG. 4.12 : Température à l'intérieur, du 27 au 31 juillet 2008, mesurée par la sonde platine et par un thermohygromètre

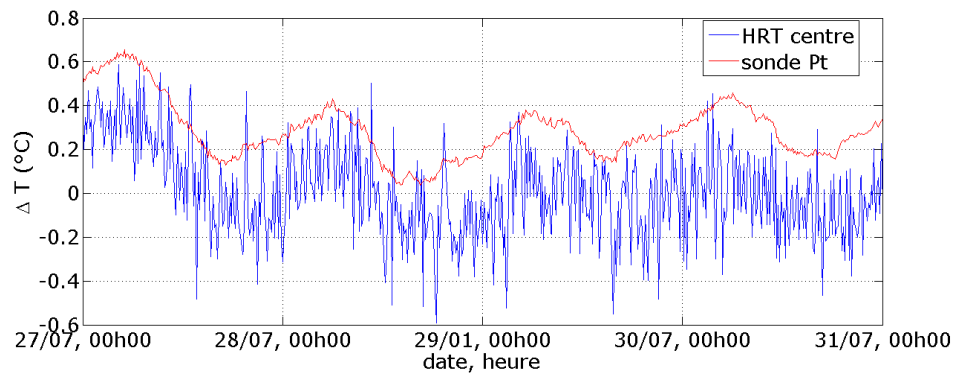


FIG. 4.13 : Écarts entre le modèle et 2 mesures de la température à l'intérieur, du 27 au 31 juillet 2008

localisation	$ \Delta T _{moyen}$	$ \Delta T _{maximum}$
paroi Est	$0,323^{\circ}C$	$1,26^{\circ}C$
intérieur : Pt100	$0,287^{\circ}C$	$0,656^{\circ}C$
intérieur : HRT	$0,171^{\circ}C$	$0,592^{\circ}C$

TAB. 4.2 : Séquence A, écarts en température entre le modèle et les mesures, dans la paroi et dans la pièce, pour deux capteurs

4.2.2 Comportement en humidité

Le renouvellement d'air étant un facteur déterminant dans le bilan en humidité de la pièce, nous distinguons ici deux cas : un renouvellement d'air important, et pour partie contrôlé, ou bien un renouvellement d'air faible et non contrôlé (infiltrations seulement).

Renouvellement d'air mécanique

C'est à nouveau la séquence B qui est utilisée ici : chauffage à 20°C , pas de génération de vapeur, taux de renouvellement d'air de $0,5 \text{ vol./h}$; dans ce cas, la paroi n'est pas munie de pare-vapeur. La figure 4.14 montre l'humidité absolue dans la paroi Est, et à l'intérieur de la cellule, la figure 4.15 donne l'écart calcul-modèle. Les valeurs données par le modèle sont plus proches des mesures que dans le cas présenté en 4.1.2 (figures 4.6 et 4.7 page 81). Cela peut s'expliquer par des variations de température plus lentes (en particulier, le premier pic de température est absent).

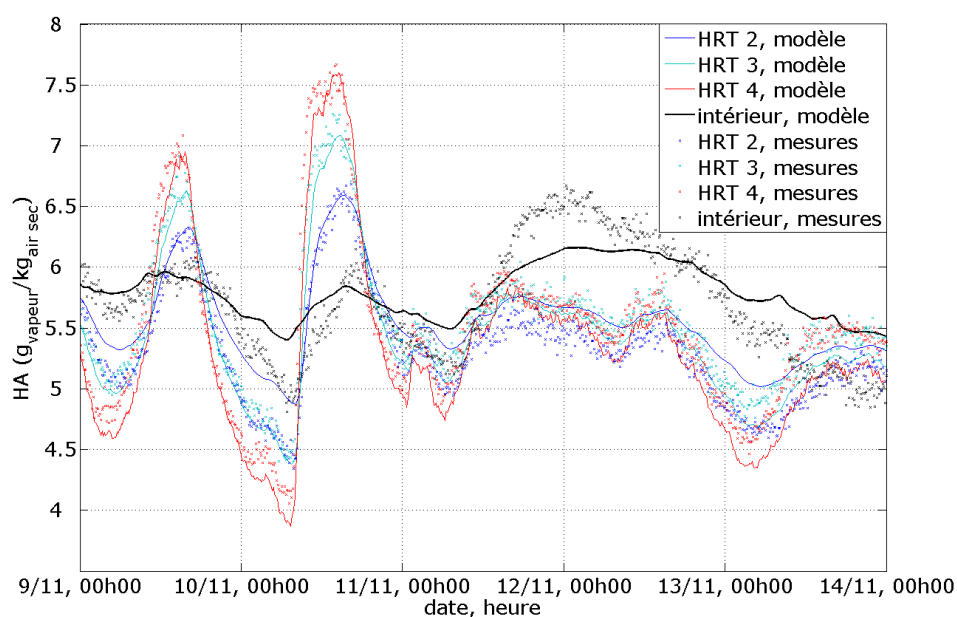


FIG. 4.14 : Humidité absolue dans la paroi Est et à l'intérieur, du 9 au 14 novembre 2008

L'humidité calculée à l'intérieur de la pièce ne reproduit pas correctement les variations mesurées : la courbe est plus lisse que les mesures. Les courbes indiquent qu'un renouvellement d'air supplémentaire permettrait de s'approcher des mesures : nous l'avons vu au chapitre 2.5, l'humidité absolue dans la pièce est fortement

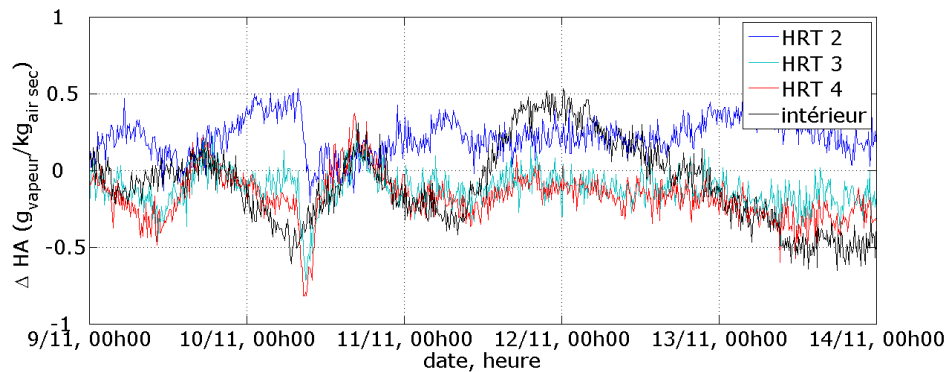


FIG. 4.15 : Écart entre l'humidité absolue calculée et mesurée, dans la paroi Est et à l'intérieur, du 9 au 14 novembre 2008

contrôlée par l'extérieur. Le renouvellement d'air, dans le modèle, se fait par infiltrations ainsi que par un débit volumique correspondant à la consigne donnée expérimentalement. Plusieurs explications nous semblent possibles :

- le renouvellement d'air mécanique n'est pas parfaitement contrôlé; le débit volumique utilisé pour les calculs ne serait dans ce cas pas égal au débit extrait dans l'expérimentation.
- Les calculs d'infiltration ne sont pas corrects : ceci peut être dû à l'écriture du modèle, ou aux calculs des coefficients de surpression. Il se peut également que la méthode de mesure de la perméabilité à l'air de la cellule soit inadaptée : lorsque l'étanchéité est assurée par une membrane, la mesure par mise en dépression, en plaquant la membrane contre la paroi, peut sous-estimer la valeur de la perméabilité. Différents calculs ont montré que l'influence de la répartition des fuites (Nord/Sud/Est/Ouest) était négligeable.
- Une fuite ou entrée de vapeur se produit sans qu'il y ait de débit d'air supplémentaire : fuites au niveau des joints (qui peuvent être étanches à l'air mais pas à la vapeur), ou diffusion de vapeur par les ouvertures (non prise en compte dans le modèle; seule la convection (transport par l'air) est calculée). Cette hypothèse ne permet pas d'expliquer seule les différences observées : les débits impliqués seraient très faibles.
- Les interactions avec la paroi sont trop importantes, et lissent (par effet tampon hygroscopique) les variations d'humidité dans le volume d'air.

Une étude plus détaillée est menée dans le cas suivant.

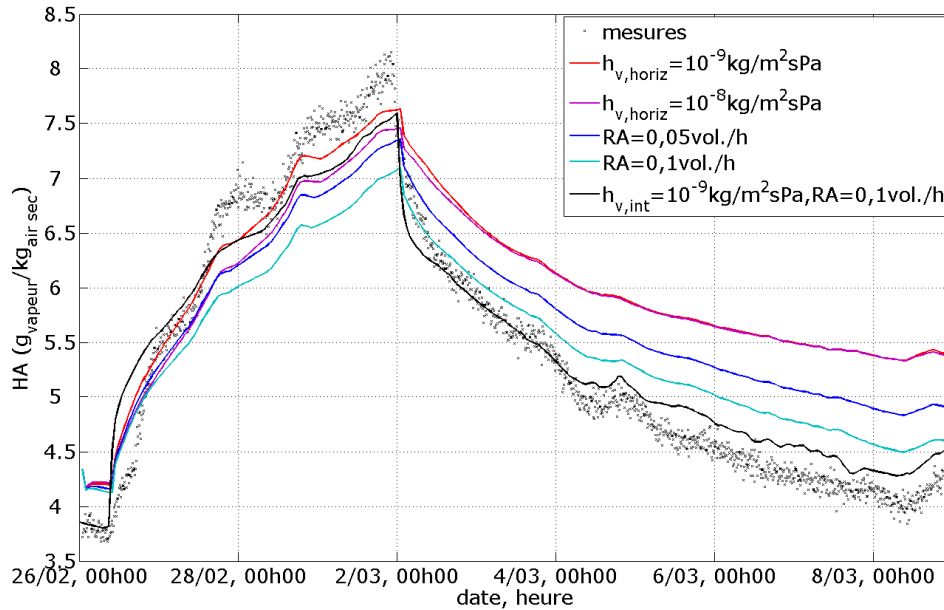


FIG. 4.16 : Humidité absolue à l'intérieur, du 26 février au 9 mars 2009, pour divers jeux de paramètres

Air intérieur contrôlé par les sollicitations internes

Nous nous plaçons à présent dans un cas où l'étanchéité à l'air est très importante, sans renouvellement d'air mécanique. Le comportement en humidité de la zone va donc être principalement influencé par les échanges avec les parois, et les sollicitations internes : pour la séquence D, il s'agit de la génération de vapeur continue durant 3 jours, puis son arrêt.

En plus des incertitudes sur les calculs d'infiltration d'air présentées ci-avant, une inconnue subsiste concernant l'échange avec les parois horizontales, en particulier le plancher, qui dispose d'une forte capacité hygroscopique (panneaux d'OSB). Le coefficient d'échange peut différer entre les parois verticales et les parois horizontales : de même que l'air chaud tend à monter, réduisant la convection dans le cas de flux descendants, l'augmentant pour des flux ascendants, la vapeur est plus légère que l'air, et le sens des échanges peut influencer sur la valeur du coefficient d'échange. Nous choisirons toutefois une valeur constante.

Les résultats de calculs de l'humidité résultante dans la zone sont présentés pour deux valeurs : $h_{v,horiz} = 10^{-9} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ et $h_{v,horiz} = 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$, sur la figure 4.16. L'augmentation du coefficient d'échange s'accompagne d'une valeur maximum atteinte plus faible : plus d'eau est absorbée par les parois horizontales. En revanche, la décroissance devient très vite similaire : dans les 2 cas, le niveau

d'humidité dans la pièce reste trop élevé après l'arrêt de la production de vapeur, et tend vers un palier. La valeur de $h_{v,horiz} = 10^{-9}$ kg/m²sPa permettant d'approcher mieux les mesures, c'est avec cette valeur que seront faits les calculs suivants.

La diminution de l'humidité dans la pièce semble indiquer une infiltration d'air supplémentaire, comme remarqué précédemment. Deux débits supplémentaires de renouvellement d'air (RA) ont été testés : l'augmentation du débit permet de mieux approcher la phase de décroissance (niveau atteint plus bas). Toutefois, un débit de 0,1 vol./h, soit 5 m³/h n'est pas encore suffisant pour représenter correctement le comportement de la zone, alors qu'il s'agit d'un débit important au regard de l'étanchéité à l'air de la cellule. Cette remarque appuie l'hypothèse d'une fuite de vapeur indépendante des fuites d'air, ou bien d'une sous-estimation de la perméabilité à l'air mesurée. En revanche, la phase de croissance est d'autant plus faible que le renouvellement d'air est élevé : l'humidité produite est aussitôt évacuée.

Il semble en fait qu'une combinaison de facteurs agisse : la phase de croissance semble montrer que le modèle surestime la capacité hygroscopique des matériaux de parement ; la phase de décroissance tend à indiquer des fuites de vapeur supplémentaires.

D'autres calculs montrent (figure 4.16, courbe noire) que, pour un coefficient d'échange massique avec les parois verticales plus faible ($h_{v,int} = 10^{-9}$ kg/m²sPa), un renouvellement d'air supplémentaire de 0,1 vol./h permet d'approcher correctement les mesures lors de la phase de décroissance en particulier : ainsi, une interaction trop forte avec les parois (se traduisant par un stockage plus important d'eau) nécessite une ventilation plus importante ; à l'inverse, un effet tampon plus faible (et un moindre stockage) permet de limiter le renouvellement d'air nécessaire pour faire décroître l'humidité. Nous en concluons que la capacité de tampon hygroscopique des matériaux est surestimée, dépendant du triplet (coefficient d'échange surfacique ; perméabilité à la vapeur ; courbes de sorption/désorption).

La figure 4.17 présente, pour ce même cas (avec $h_{v,horiz} = 10^{-9}$ kg/m²sPa, $h_{v,int} = 10^{-8}$ kg/m²sPa et sans renouvellement d'air supplémentaire, correspondant à la première courbe présentée figure 4.16), l'humidité dans la paroi Est. Côté intérieur, la surestimation de l'humidité dans les derniers jours est à mettre en rapport avec l'humidité dans la pièce. Côté extérieur, les résultats de calculs sont identiques à ceux présentés précédemment (4.1.2), du fait de la présence du pare-vapeur.

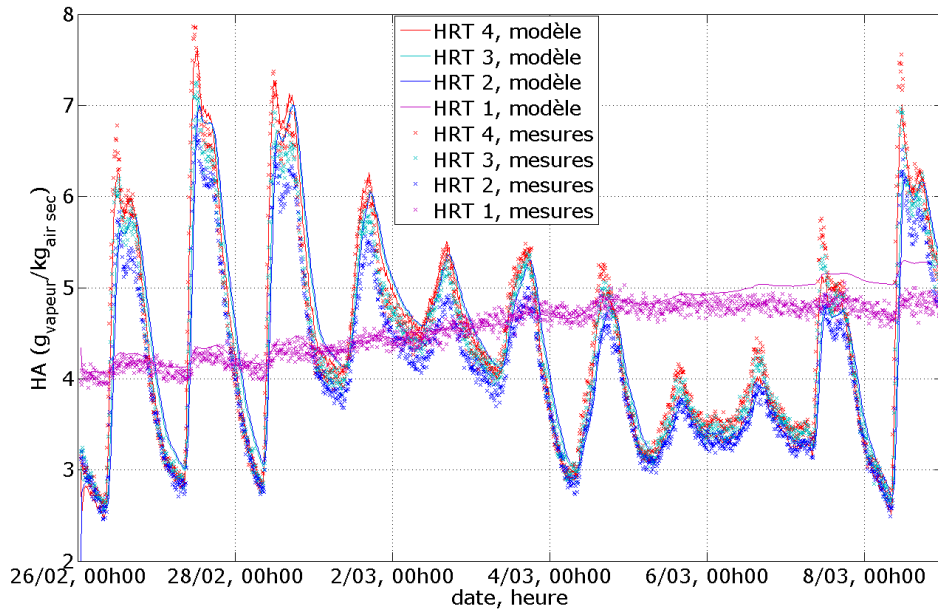


FIG. 4.17 : Humidité absolue dans la paroi Est, du 26 février au 9 mars 2009

Influence des propriétés des matériaux

La perméabilité à la vapeur et la capacité de sorption du panneau de particules ont été modifiées (multipliées et divisées par un facteur 1,2), afin d'étudier leur effet sur les comportements couplés du matériau et de la pièce. En revanche, il n'a pas été possible dans le cadre de ces travaux de modéliser l'hystérésis de la courbe de sorption.

La figure 4.18 (page suivante) montre que de la diminution de la capacité de sorption et de la perméabilité à la vapeur permet d'atteindre des valeurs d'humidité plus élevées (la courbe de référence est la courbe rouge, obtenue avec $h_{v,horiz} = 10^{-9}$ kg/m²sPa et sans renouvellement d'air supplémentaire, correspondant à la première courbe présentée figure 4.16), et inversement lorsqu'on les augmente. En revanche, lors de la phase de décroissance, hormis le décalage initial, les comportements obtenus pour les différentes variations de propriétés sont très proches; ceci tend à confirmer la nécessité d'un débit de fuite de vapeur supplémentaire.

Toutefois, ces variations sont insuffisantes pour retrouver les valeurs mesurées lors de la phase de croissance, en particulier dans l'optique de l'ajout d'un débit de fuite de vapeur supplémentaire. Par ailleurs, une erreur de mesure de 20% sur les courbes de sorption est peu envisageable, étant donnée la simplicité de la méthode (mise à l'équilibre du matériau et pesée). En revanche, les mesures de perméabilité à la vapeur sont plus complexes, et peuvent occasionner des erreurs. Les mesures

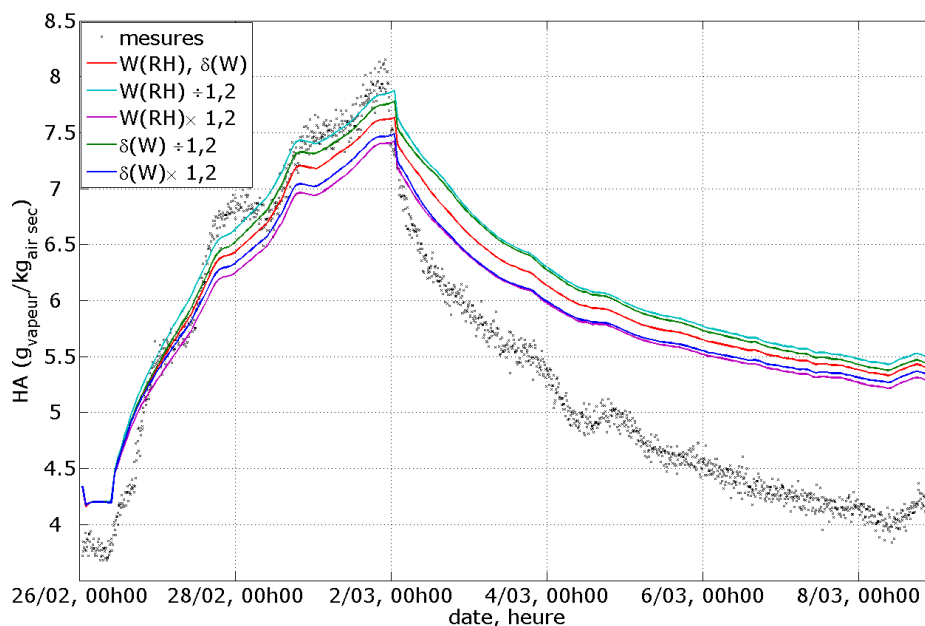


FIG. 4.18 : Humidité absolue à l'intérieur, du 26 février au 9 mars 2009, pour différentes variations des propriétés du panneau de particules

effectuées sur des échantillons issus d'une même plaque de plâtre par différents laboratoires dans le cadre de l'annexe 41 de l'AIE [Roels, 2008] ont montré des écarts très importants. Toutefois, les valeurs mesurées dans le cadre de cette étude concordent avec celles trouvées dans la littérature d'une part, et d'autre part les calculs effectués pour le parement intérieur seul (voir 4.1.2) donnent des résultats satisfaisants, ce qui permet d'avoir confiance en ces valeurs.

Il faut remarquer cependant que les mesures ne nous renseignent que sur l'humidité de part et d'autre du parement ; le comportement à l'intérieur du matériau, et en particulier à proximité de la surface intérieure, n'est lui pas connu.

4.3 Modèle de bardage

Afin d'ajuster au mieux le modèle de bardage aux mesures, nous avons procédé en plusieurs étapes. À partir des températures relevées entre le 5 et le 17 novembre 2008 (présentées figure 2.18), nous avons d'abord travaillé sur la période nuageuse avec de faibles variations de températures (à partir du 13 novembre), la nuit. Puis, la première période a été utilisée pour affiner les échanges convectifs, côté extérieur en particulier. Les données climatiques pour la période considérée (température, rayonnement, vent) sont données en annexe F.

Comme montré au chapitre 4.1.1, le modèle thermique de la paroi est validé, ce qui permet d'affirmer que les écarts entre les mesures et les calculs proviennent du modèle de bardage, et non de celui de la paroi.

4.3.1 Valeurs et corrélations utilisées pour les paramètres

Des valeurs initiales ont été choisies pour les paramètres ; nous les avons ensuite fait varier afin d'étudier leur influence et de déterminer les valeurs qui permettent de s'approcher au mieux des mesures. Lorsque des paramètres ou propriétés des matériaux ont été déterminés expérimentalement, nous les avons considérés comme fiables, et n'avons pas réalisé d'études de sensibilité dessus, eu égard au nombre d'autres paramètres inconnus. Dans cette partie, l'astérisque * est accolé aux coefficients d'échange dans la lame d'air.

Coefficients d'échanges convectifs

Nous choisirons dans un premier temps une valeur constante pour le coefficient d'échange convectif extérieur. [Kumaran et Sanders, 2008] décrivent différentes corrélations, et les valeurs obtenues pour h_c varient entre 8 et 12 W/m²K pour des vitesses de vent faibles (< 2m/s). Nous prendrons donc comme valeur initiale 10 W/m²K. Dans la lame d'air, considérant que la vitesse d'air est plus faible qu'à l'extérieur, nous prendrons $h_c^* = 8$ W/m²K.

Il existe de nombreuses corrélations donnant des relations entre la vitesse du vent V_{vent} , sa direction et le coefficient d'échange convectif ; beaucoup sont linéaires, de la forme $h_c = a + b \cdot V_{vent}$. Dans le cas le plus simple, seule la vitesse du vent entre en considération ; c'est le cas de la corrélation de Jürges (1924), tel que cité dans [Blocken *et al.*, 2006] :

$$h_c = 5,6 + 4 \cdot V_{vent} \quad (4.1)$$

Le plus souvent, deux relations sont données, selon que la façade est au vent ou sous le vent. Ainsi, à partir de mesures effectuées en extérieur sur des parois à échelle réelle [Loveday et Taki, 1996] donnent :

$$h_c = 8,91 + 2 \cdot V_{vent} \quad \text{paroi au vent} \quad (4.2)$$

$$h_c = 4,93 + 1,77 \cdot V_{vent} \quad \text{paroi sous le vent} \quad (4.3)$$

[Palyvos, 2007] recense un grand nombre de corrélations existantes ; à partir de trente d'entre elles, il établit une nouvelle corrélation « moyenne » :

$$h_c = 7,4 + 4 \cdot V_{vent} \quad \text{paroi au vent} \quad (4.4)$$

$$h_c = 4,2 + 3,5 \cdot V_{vent} \quad \text{paroi sous le vent} \quad (4.5)$$

Ces trois corrélations seront utilisées afin d'évaluer l'impact du vent sur le modèle du bardage.

Vitesse dans la lame d'air

Les données de la littérature [Duta, 1998; Künzl *et al.*, 2008] indiquent une vitesse d'air dans la lame d'air de l'ordre de 0,1m/s. Dans notre cas cependant, une telle valeur conduisait à des températures extrêmement basses en journée (plus de 10°C d'écart avec les mesures au Sud), nous amenant à penser que les échanges convectifs sont dans ce cas surestimés. Nous utiliserons donc une valeur plus faible : $v_a = 0,01\text{m/s}$, reportant ainsi l'essentiel des échanges convectifs en face externe du bardage (h_c).

Température de ciel

La température de ciel est la température équivalente qui permet de décrire les échanges radiatifs en grandes longueurs d'ondes subis par une surface en regard du ciel. Elle dépend de la température d'air ambiant T_{ext} , mais également du taux d'ennuagement du ciel. Pour un ciel couvert, il est généralement admis que :

$$T_{ciel} = T_{ext} \quad (4.6)$$

C'est cette valeur qui sera prise comme base. Dans le cas d'un ciel clair, une relation de la forme suivante est couramment employée :

$$T_{ciel} = T_{ext} - \text{constante} \quad (4.7)$$

La constante est fréquemment de 6°C [Duta, 1998; Loveday et Taki, 1996; Miranville, 2002]; nous ferons varier ce niveau de réduction, afin d'étudier son influence.

Enfin, il existe des corrélations donnant la température de ciel en fonction de la température de rosée T_r et de l'ennuagement, l'écart entre les températures d'air et de ciel est alors variable. Ces relations sont de la forme :

$$T_{ciel} = T_{ext} \cdot \epsilon_{ciel}^{0,25} \quad (4.8)$$

Plusieurs sont présentées dans [Tang *et al.*, 2004], dans le cas de ciels clairs. Nous avons retenu celle de [Clark et Allen, 1978], étant celle qui nous permet d'approcher au mieux les mesures. Elle donne :

$$\epsilon_{ciel} = 0,787 + 0,0028 \cdot T_r \quad (4.9)$$

L'état d'ennuagement du ciel est pris en compte par le biais du taux de couverture C_{cov} , défini par l'équation 4.10 [TRNSYS, 2005]. Il est moyenné sur 4h, afin d'éviter

les variations trop brusques dues au rayonnement. De nuit, ce facteur est pris constant et égal à la dernière valeur calculée (sur les 4 dernières heures éclairées).

$$C_{cov} = \sqrt{1,4286 \cdot \frac{E_{dif}}{E_{global, horizontal}} - 0,3} \quad (4.10)$$

La température de ciel est dans ce cas donnée par :

$$T_{ciel} = T_{ext} \cdot (\epsilon_{ciel} + 0,8 \cdot (1 - \epsilon_{ciel}) \cdot C_{cov})^{0,25} \quad (4.11)$$

Coefficients d'échanges radiatifs

Les formules utilisées pour évaluer les coefficients d'échanges radiatifs $h_{r,ciel}$, $h_{r,env}$ et h_r^* sont décrites au chapitre précédent (3.3.2).

Pour la gamme de températures comprises entre -10°C et 50°C , et pour les valeurs d'émissivité des matériaux (0,75 pour le pare-pluie, 0,86 pour le bardage), le coefficient h_r^* varie entre 2,8 et 5,1 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Considérant que cette gamme est représentative des températures atteintes derrière le bardage, nous prendrons la valeur moyenne $h_r^* = 4 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

Dans ce cas, $h_{r,ciel}$ varie entre 1,9 et 3,6 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ pour la même gamme de température. En considérant la température du ciel comme plus faible, nous prendrons la valeur basse $h_{r,ciel} = 2 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. De même, nous prendrons $h_{r,env} = 2 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

Récapitulatif

Par la suite, lorsque rien n'est mentionné pour la valeur d'un paramètre, ce sont les valeurs de base qui sont utilisées (sauf lorsqu'un des paramètres a été ajusté auparavant ; dans ce cas, la valeur d'ajustement est utilisée). Les valeurs de base sont récapitulées ci-après :

$$\begin{aligned} h_c &= 10 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \\ h_c^* &= 8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \\ v_a &= 0,01\text{m/s} \\ T_{ciel} &= T_{ext} \\ h_{r,ciel} &= 2 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \\ h_{r,env} &= 2 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \\ h_r^* &= 4 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \end{aligned}$$

4.3.2 Étude en période nuageuse

Température à l'arrière du bardage

Nous nous intéressons dans un premier temps à la température en face arrière du bardage, la plus directement sensible aux conditions extérieures. Les figures 4.19 et 4.20 montrent la très faible influence du coefficient d'échange convectif h_c , en particulier la nuit, ainsi que de la vitesse d'air dans la lame d'air v_a . Les écarts présentés sont calculés ainsi : $\Delta T = T_{calc} - T_{mes}$. Par la suite, nous n'utiliserons que la valeur de base pour v_a : elle agit de manière similaire au coefficient d'échange convectif, augmentant ou diminuant les échanges avec l'air extérieur. Celui-ci étant également inconnu, il ne nous a pas semblé pertinent de faire varier deux paramètres inconnus ayant un rôle similaire : nous n'aurions pu déterminer « le bon couple ».

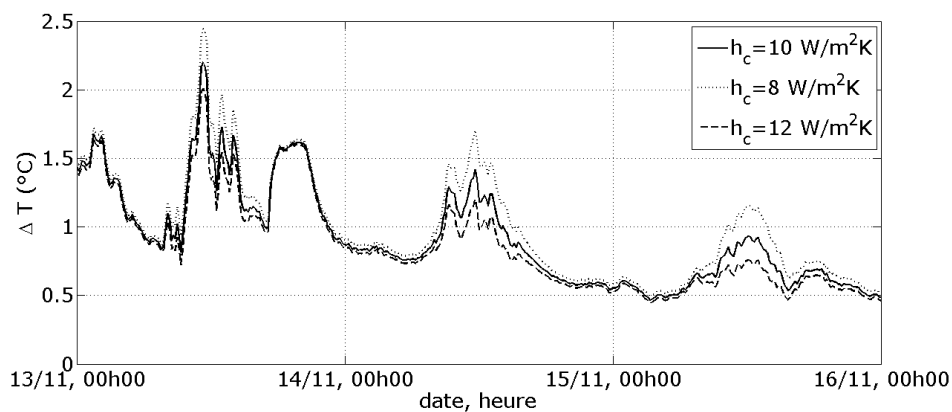


FIG. 4.19 : Écarts entre les résultats de calculs et les mesures de température à l'arrière du bardage en paroi Est, du 13 au 16 novembre, pour 3 valeurs de h_c

La figure 4.21 présente les écarts entre calculs et mesures derrière le bardage et sur le pare-pluie, en fonction du choix effectué pour la température radiative équivalente du ciel T_{ciel} . Il se produit logiquement un abaissement global des températures calculées : l'écart positif entre calculs et mesures a disparu. La température du ciel est donc effectivement un paramètre significatif. Dans les 2 cas, en revanche, l'écart entre la température du bardage et celle du pare-pluie reste le même, et la température sur le pare-pluie est sous-estimée.

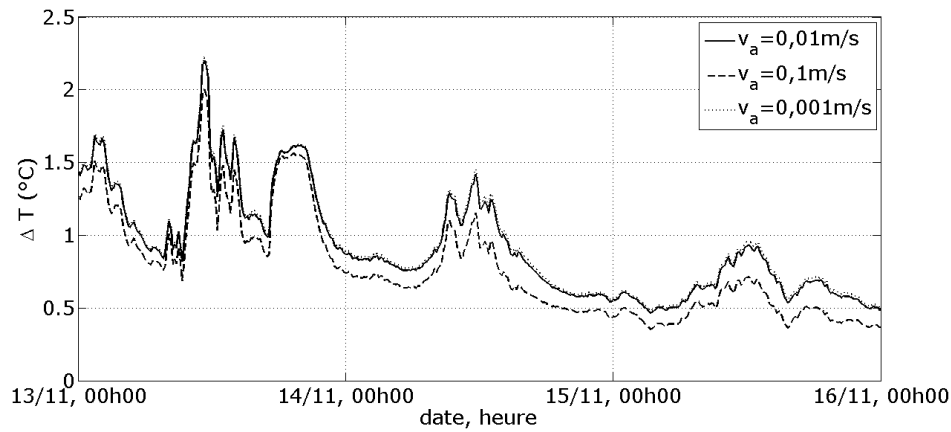


FIG. 4.20 : Écarts entre les résultats de calculs et les mesures de température à l'arrière du bardage en paroi Est, du 13 au 16 novembre, pour 3 valeurs de v_a

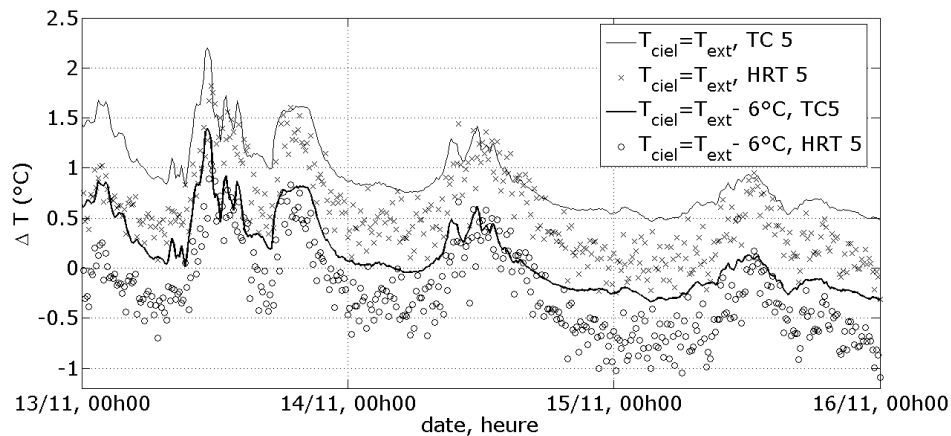


FIG. 4.21 : Écarts entre les résultats de calculs et les mesures de température à l'arrière du bardage et sur le pare-pluie en paroi Est, du 13 au 16 novembre, pour 2 valeurs de T_{ciel}

Écart de température bardage - pare-pluie, de nuit

Nous avons pu montrer (courbes non présentées ici) que la vitesse dans la lame d'air n'influe pas sur l'écart entre ces deux températures. La température trop basse au niveau du pare-pluie peut alors avoir deux causes : un échange radiatif trop important avec le bardage, ou des pertes par convection dans la lame d'air ; rappelons en effet que, du côté intérieur de la paroi, la température est maintenue à 20°C (voir chapitre 4.1.1).

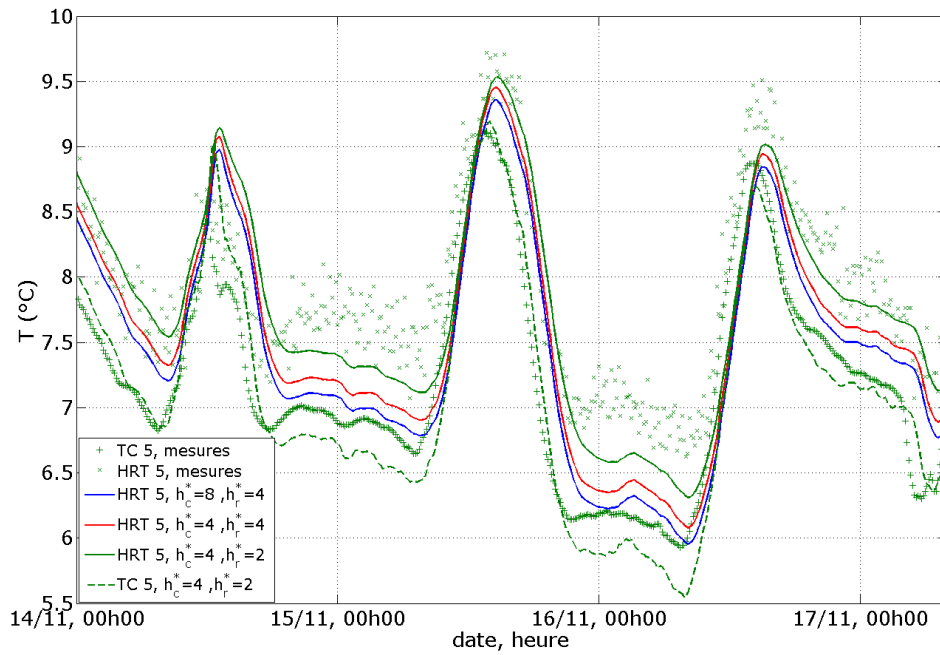


FIG. 4.22 : Températures mesurées et calculées derrière le bardage en paroi Est et sur le pare-pluie, pour différentes combinaisons de h_c^* et h_r^* (pour des raisons de commodité, les unités ont été omises dans la légende)

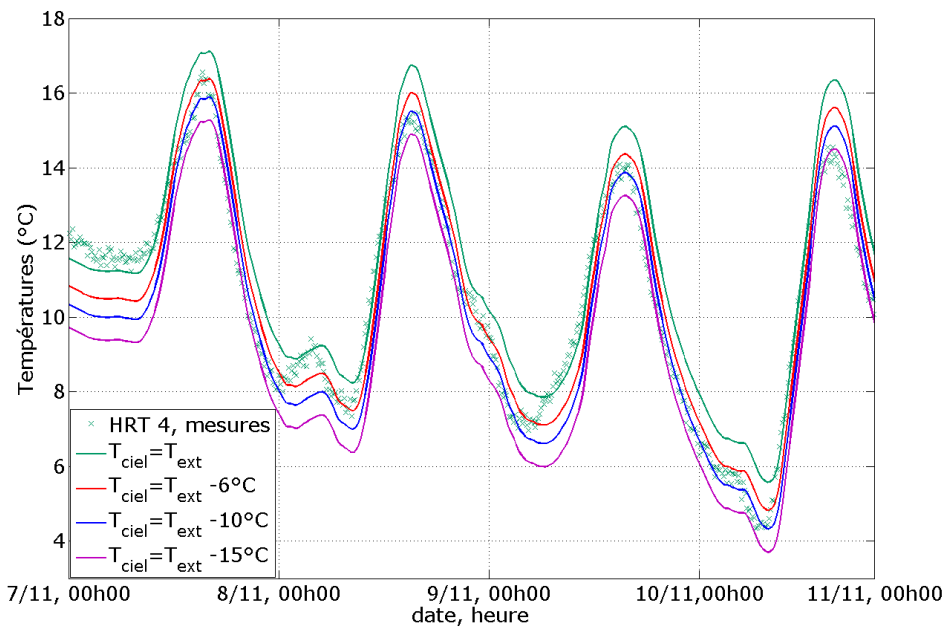


FIG. 4.23 : Températures derrière le contreventement en paroi Nord, mesurées et calculées, pour différentes températures de ciel, du 7 au 11 novembre 2008

La courbe 4.22 montre que diminuer le coefficient d'échange convectif h_c^* de 8 à 4 W/m²K n'est pas suffisant pour maintenir l'écart avec le bardage. Cette valeur étant déjà inférieure à la valeur prise à l'intérieur de la cellule, nous avons réduit le coefficient d'échange radiatif à 2 W/m²K. Bien que les deux températures soient légèrement trop basses, l'écart maintenu est correct. Nous garderons donc ces deux valeurs, malgré leur faiblesse par rapport aux valeurs initiales. Remarquons que le faible coefficient d'échange convectif dans la lame d'air est en cohérence avec l'observation faite plus haut d'une vitesse d'air dans la lame d'air plus faible qu'observée dans la littérature.

4.3.3 Étude en période ensoleillée

Effet de la température de ciel

Par ciel clair, la relation entre température d'air et température de ciel n'est pas la même que par temps couvert : l'écart est généralement plus important. Nous avons donc utilisé trois niveaux de réduction par rapport à la température d'air extérieur. C'est en paroi Nord que nous étudions l'effet de ce paramètre : n'étant pas soumise à un ensoleillement direct, la température du bardage reste proche de la température extérieure. La convection (et donc le coefficient d'échange convectif) a alors un impact moindre, et la température de ciel reste, même de jour, un paramètre important. La figure 4.23 montre les températures mesurées et calculées derrière le contreventement (emplacement de capteur HRT 4), en l'absence de capteur sur le pare-pluie (HRT 5) pour cette paroi.

En premier lieu, nous remarquons qu'aucune des valeurs choisies ne convient sur toute la période : les valeurs calculées sont tantôt trop hautes, tantôt trop basses. Toutefois, ponctuellement, les choix fonctionnent : le choix de $T_{ciel} = T_{ext} - 6^\circ C$ permet d'obtenir de bonnes températures en journée le 7/11, et la nuit du 7 au 8/11. $T_{ciel} = T_{ext} - 10^\circ C$ est un choix adapté aux journées du 8 et 9/11, ainsi qu'à la nuit du 9 au 10/11. Enfin, $T_{ciel} = T_{ext} - 15^\circ C$ permet de s'approcher des mesures du 11/11.

Nous utiliserons donc une corrélation permettant d'obtenir un écart variable entre la température d'air et la température de ciel calculée. La corrélation donnée par [Clark et Allen, 1978] permet d'obtenir un agrément acceptable pour l'ensemble de la période (figure 4.24), sans être toutefois parfaitement adapté. C'est avec cette corrélation que nous travaillerons par la suite. Notons que, de même que pour la vitesse d'air et les coefficients d'échanges convectifs, nous choisissons de ne pas faire varier le coefficient d'échange radiatif avec le ciel, la température du ciel n'étant pas déterminée, ni le coefficient d'échange radiatif avec l'environnement : il vient s'ajouter au coefficient d'échange convectif extérieur, lui-même inconnu.

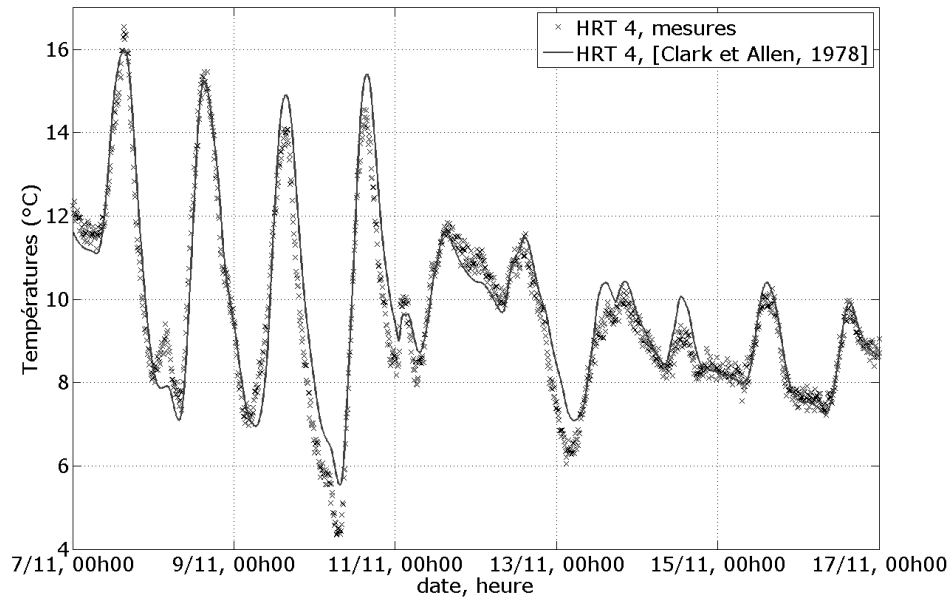


FIG. 4.24 : Températures derrière le contreventement en paroi Nord, mesurées et calculées avec la corrélation de [Clark et Allen, 1978], du 7 au 17 novembre 2008

Échanges convectifs

Comme expliqué précédemment, nous ferons varier le coefficient d'échange convectif sans chercher à modifier la vitesse d'air dans la lame d'air. La figure 4.25 montre, pour un coefficient $h_c = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, les températures obtenues à l'Est et à l'Ouest. Cette valeur semble convenir pour la paroi Ouest ; en revanche, à l'Est, les températures calculées peuvent être, selon les jours, trop hautes (le 6/11) ou trop basses (le 8/11), alors que le 7/11 elles correspondent très bien. La cause probable de ces irrégularités est le vent, majoritairement d'Est sur cette période : il peut influencer fortement les échanges convectifs.

La figure 4.26 présente les résultats obtenus pour différentes corrélations de la littérature. Nous pouvons constater qu'aucune des corrélations n'est véritablement adaptée, ni meilleure que la valeur constante $h_c = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$. En première approximation, nous retiendrons donc cette valeur constante. En effet, les corrélations donnent des résultats très proches les unes des autres, et semblent ne pas suffirent pour s'approcher des mesures.

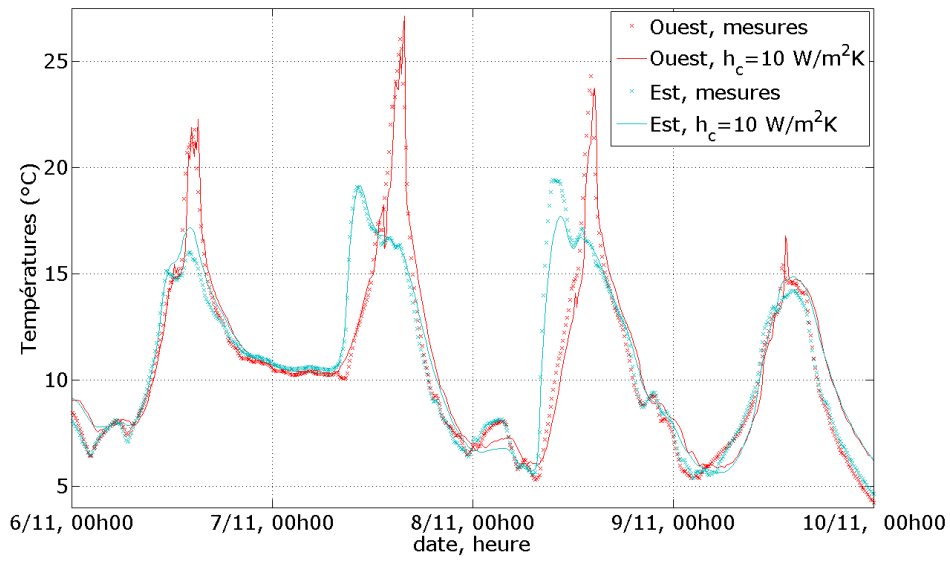


FIG. 4.25 : Températures derrière le bardage, mesurées et calculées en paroi Est et Ouest, du 6 au 10 novembre 2008

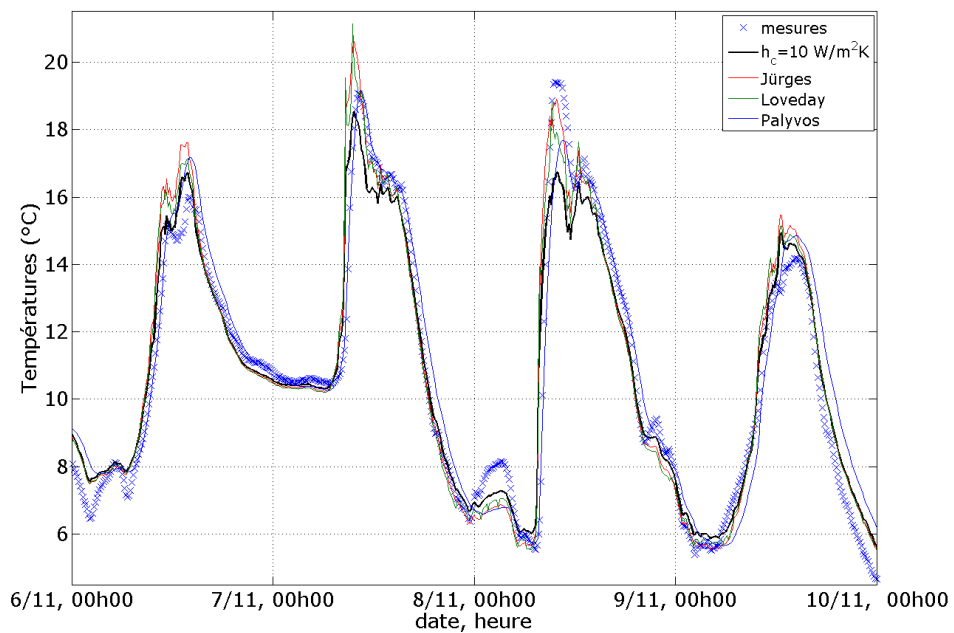


FIG. 4.26 : Températures derrière le bardage, mesurées et calculées en paroi Est pour différentes corrélations sur le coefficient d'échanges convectif, du 6 au 10 novembre 2008

L'annexe F donne les relevés de vitesse et de direction du vent pour cette période ; celles-ci varient très rapidement, la vitesse en particulier. Cette irrégularité peut expliquer les à-coups observés dans les résultats obtenus avec un coefficient d'échange convectif fonction de la vitesse du vent. Les valeurs de vitesse relevées étant inférieures au seuil de sensibilité donné par le constructeur, il convient d'être prudent dans leur utilisation. Ajoutons que, la cellule ayant été construite à proximité du point de mesure, il se peut qu'elle fausse les valeurs mesurées.

Ces variations brusques peuvent être lissées par l'utilisation d'un pas de temps plus long pour les données météo (moyennes sur 1 h). Toutefois, des calculs menés avec un pas de temps d'1h montrent que le rayonnement solaire est alors minimisé (le pic d'intensité est lissé), les températures calculées sont par conséquent trop basses.

4.3.4 Validité du modèle

Sur la figure 4.27 sont présentés les écarts, pour les 4 parois, entre les mesures effectuées derrière le parement (HRT 4) et les calculs. On constate que, hormis la paroi Sud, les écarts sont compris entre -2°C et $+2^{\circ}\text{C}$; les écarts les plus importants se situent au moment où l'éclairement est le plus important sur chacune des parois : à midi au Sud, un peu plus tôt à l'Est, plus tard à l'Ouest. Des écarts de plus de 1°C subsistent en outre au Nord.

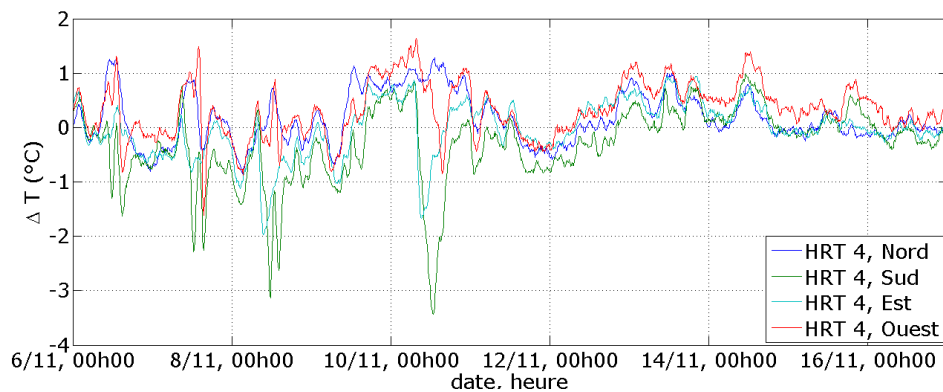


FIG. 4.27 : Écarts entre les résultats de calculs et les mesures de température en paroi Nord, Sud, Est et Ouest, du 6 au 17 novembre 2008

La figure 4.28 montre l'humidité absolue dans la paroi calculée en incluant le modèle de bardage au modèle de paroi : les conditions aux limites sont les données météo côté extérieur, la température et l'humidité relative mesurées côté intérieur. Les écarts de température dus au modèle de bardage ne permettent pas de déterminer correctement le comportement en humidité.

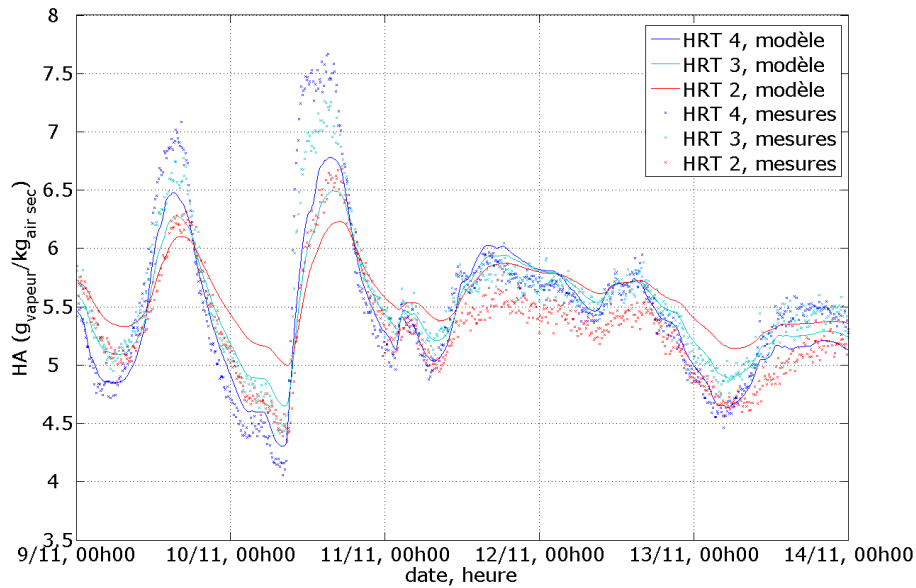


FIG. 4.28 : Humidité absolue, mesurée et calculée en incluant le modèle de bardage, en paroi Est, du 9 au 14 novembre 2008

Ce même modèle a été utilisé sur la séquence A (voir chapitre 2.5), afin d'éprouver son comportement sur d'autres périodes de l'année : durant cette séquence, outre l'ensoleillement et les températures plus élevées, le vent souffle plus fortement. La figure 4.29 montre, comme précédemment, les écarts observés entre mesures et calculs, pour les 4 parois. Les écarts sont ici plus importants, jusqu'à $4^{\circ}C$ à l'Ouest, et $3^{\circ}C$ au Nord. Nous constatons là encore les limites de ce modèle. Il semble, suite à cette étude paramétrique, qu'un modèle unidimensionnel n'est pas suffisant pour prendre en compte la complexité des phénomènes intervenant dans le bilan thermique du bardage.

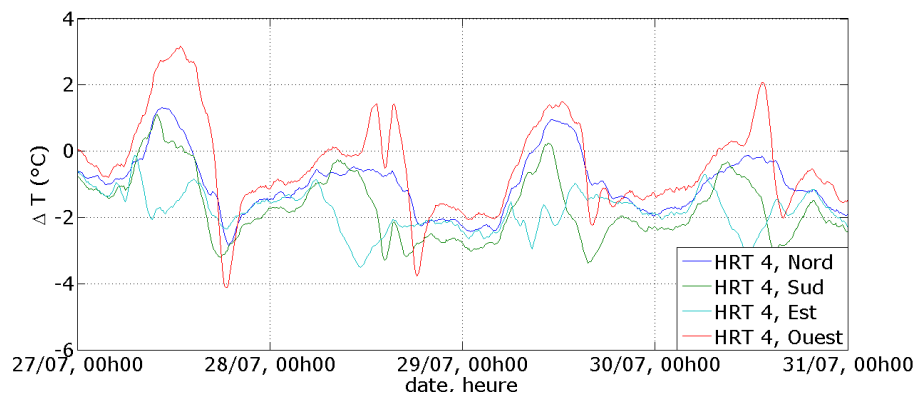


FIG. 4.29 : Écarts entre les résultats de calculs et les mesures de température en paroi Nord, Sud, Est et Ouest, du 27 au 31 juillet 2008

4.4 Discussion

4.4.1 Capacités et limites du modèle développé

Nous avons montré que le modèle thermique de la paroi (à partir de la température de surface), ainsi que le modèle de zone, reproduisaient sans difficulté le comportement de la cellule expérimentale, en été comme en hiver. L'utilisation d'un coefficient d'échange convectif intérieur constant est apparu comme suffisant. De même, nous avons utilisé une conductivité thermique constante. Ce choix est justifié dans notre cas, où le matériau isolant ne s'est pas trouvé exposé à des humidités relatives élevées, et n'est de plus pas hygroscopique.

De plus, la modélisation des montants en une dimension, en parallèle de la partie courante de la paroi permet en première approximation de prendre en compte le pont thermique qu'ils constituent.

Pour le modèle de transferts hygriques dans la paroi, deux cas sont à considérer.

- La réponse d'un matériau hygroscopique, en conditions isothermes, à une sollicitation lente, est évaluée correctement par le modèle. Le coefficient d'échange surfacique massique a une influence réduite sur son comportement.
- Le phénomène de désorption/sorption d'un matériau hygroscopique exposé à des variations journalières de température est bien reproduit dans le cas où ces variations ne sont pas trop rapides. Les migrations d'humidité vers l'intérieur de la paroi sont dans ce cas correctement décrites. Nous avons pu constater que, lorsque les variations de température sont brusques (par exemple à l'Est, le matin, lorsqu'apparaît le soleil), le modèle n'est pas capable de décrire convenablement la désorption d'humidité du matériau extérieur : les résultats donnent une désorption plus lente et plus faible que ce qui est mesuré.

Nous avons en outre pu montrer qu'une détermination précise des conditions de température était indispensable à une évaluation correcte du comportement en humidité. De même, dans le cas de séquences de courte durée, la masse d'eau initialement présente dans la paroi est déterminante, celle-ci échangeant lentement avec l'extérieur.

L'interaction entre le matériau de parement intérieur et la zone n'est pas reproduite de manière satisfaisante. Les matériaux de parement semblent agir trop fortement en tampon hygroscopique, limitant l'amplitude des variations d'humidité dans la pièce.

De plus, une infiltration ou fuite supplémentaire de vapeur est nécessaire : les infiltrations d'air, telles qu'elles sont calculées, ne sont pas suffisantes.

Enfin, le modèle simplifié de bardage développé ne permet pas de décrire convenablement le comportement mesuré. Une étude plus approfondie n'a pas été possible dans le cadre de ces travaux. Néanmoins, nous pouvons avancer quelques éléments d'explications concernant les écarts observés entre les résultats de calculs et les mesures.

- La vitesse dans la lame d'air varie probablement en fonction du vent (bardage à claire-voie), et de l'ensoleillement (tirage thermique).
- Nous avons considéré que le nœud dans la lame d'air échangeait avec de l'air à température extérieure ; bien que les lames du bardage soient non-jointives, il peut exister une stratification des températures. Ce nœud de lame d'air, où sont placés nos capteurs (à mi-hauteur), échangerait donc avec de l'air plus proche de sa température. Le flux échangé serait alors moindre pour une même vitesse d'air.
- Les phénomènes convectifs, mis en jeu dans la lame d'air et côté extérieur, sont plus complexes que ceux décrits par le modèle. Plusieurs approches sont alors possibles : un modèle à 2 dimensions permettrait de prendre en compte la stratification des températures. Une étude en mécanique des fluides (avec un code CFD) sera peut-être également nécessaire. On se référera à [Breton, 1986] pour des études de parois complexes lourdes (structure en béton), et à [Duta, 1998] (paroi doubles textiles), [Miranville, 2002] (toitures munies de films réfléchissants) et [Faure, 2007] (parois légères ventilées) pour les structures légères.
- La température équivalente de ciel n'est pas connue.
- Le comportement du sol autour de la cellule n'est pas pris en compte.

4.4.2 Limites et réserves liées aux conditions expérimentales

La cellule expérimentale présentée au chapitre 2 nous a permis de confronter notre modèle à des mesures réalisées sur une maison à ossature bois en grandeur réelle. Toutefois, certains paramètres restent mal connus ou mal maîtrisés : des fuites ont été mises en évidence dans le pare-vapeur. De même, le pare-pluie et les précautions prises lors de la construction (jointoiement des panneaux, raccords du pare-pluie soignés) ne suffisent pas à garantir l'absence d'entrée d'air dans les parois.

L'exposition aux conditions climatiques naturelles offre une gamme de sollicitations variées, et complexes. Elles peuvent s'avérer un frein dans la première étape de

validation d'un modèle, malgré les mesures des données météo effectuées sur le site. Un doute en particulier subsiste sur les mesures de vitesse du vent : l'anémomètre et la girouette sont en effet placés à une faible hauteur (3,50 m du sol), et à proximité de la cellule expérimentale. Il se peut donc que les mesures relevées soient faussées, ce qui aurait des conséquences sur les calculs d'infiltration d'air, ainsi que sur les échanges convectifs au niveau du bardage.

L'instrumentation installée dans la cellule présente également des limites : outre certains capteurs dont le positionnement exact n'est pas certain, nous avons montré que le placement des thermohygromètres à *proximité* du montant, mais non *dans* le montant, ne permet pas de valider un modèle unidimensionnel du montant en termes d'humidité. Par ailleurs, l'absence de capteur sous le parement du plancher (OSB) et du plafond (plaque de plâtre) rend plus difficile l'estimation de leur comportement. Nous avons également souligné que les capteurs dans la paroi sont placés contre le parement intérieur, mais nous n'avons pas connaissance du comportement au sein même du matériau et en particulier à proximité de la surface intérieure, ce qui semble déterminant pour comprendre l'interaction entre le volume d'air et la paroi. Par ailleurs, il se peut que la méthode de mesure de perméabilité à l'air de la cellule expérimentale sous-estime la perméabilité réelle.

Enfin, les capteurs ne permettent qu'une connaissance ponctuelle du comportement : au niveau du bardage en particulier, il se peut que le comportement ne soit pas homogène sur l'ensemble de la paroi (stratification verticale, mais aussi de possibles variations locales, dues aux littelage vertical), rendant délicate, voire impossible, la comparaison entre les mesures et un modèle unidimensionnel.

Conclusions et perspectives

Dans le cadre de ce travail nous avons construit et instrumenté une maison à ossature bois afin d'en étudier le comportement hygrothermique. L'instrumentation mise en place permet de suivre le comportement des parois, y compris certaines singularités constructives, ainsi que la réponse du volume d'air aux sollicitations internes et externes (conditions météorologiques mesurées sur place). En parallèle de cette expérimentation en grandes dimensions, certaines des caractéristiques des matériaux employés ont été mesurées.

Pour seconder cette étude en conditions réelles, nous avons mis en place un modèle numérique. Nous avons adopté une démarche de modélisation et de validation progressive, en raison de la complexité des phénomènes traités (transferts couplés, ponts thermiques et hygriques, géométrie, conditions climatiques naturelles). Le modèle développé est basé sur la modélisation unidimensionnelle des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les parois, auxquelles s'ajoute un modèle de zone homogène en température, pression, humidité.

Ainsi, nous avons montré que le modèle des parois et du volume permet de retrouver les valeurs de température mesurées, mais qu'en revanche le modèle de bardage nécessite une approche plus détaillée, un modèle unidimensionnel n'étant pas suffisant.

Le phénomène de désorption/sorption d'eau par un panneau de contreventement hygroscopique et de migration d'humidité à l'intérieur de la paroi en raison d'une sollicitation thermique a été mis en évidence expérimentalement et numériquement. Toutefois, lorsque les variations de température sont très rapides, le modèle ne permet pas de les décrire tout à fait correctement : on peut penser que l'utilisation de propriétés déterminées en régime statique (conditions stables de température et d'humidité) est insuffisante.

La construction d'un assemblage complexe comme celui d'une maison à ossature bois, et la tentative de le modéliser de manière simplifiée, ont mis en évidence l'importance, dans le comportement hygrothermique d'un tel bâtiment, de certains détails constructifs : des défauts d'étanchéité dans le pare-air ou dans le pare-vapeur peuvent survenir, soit par méconnaissance des règles de mise en œuvre, soit par des

Conclusions et perspectives

maladresses lors de la pose ; l'encadrement de la porte s'est révélé être une source d'infiltrations d'air.

Les configurations sur lesquelles nous avons travaillé nous ont permis de valider partiellement le modèle dans le cas d'un matériau isolant non hygroscopique, et dans des conditions de risques liés à l'humidité faibles. Les investigations expérimentales vont se poursuivre, afin d'évaluer le comportement du modèle dans des cas différents : isolant hygroscopique, parement intérieur perméable à la vapeur et absence de pare-vapeur, ajout d'une fenêtre, ajout d'une sur-épaisseur d'isolant.

De plus, les séquences expérimentales réalisées ont été jusqu'à présent de courte durée ; ceci ne permet pas d'évaluer correctement les échanges de vapeur entre les parois et l'air environnant. Des essais de plus longue durée (plusieurs mois) sont programmés. Par ailleurs, la campagne de détermination des caractéristiques des matériaux se poursuit.

Il semble nécessaire d'étendre l'instrumentation autour de la cellule expérimentale ; des mesures de températures à différentes hauteurs dans la lame d'air du bardage doivent être mises en place dans les mois qui viennent. La possibilité d'y mesurer une vitesse d'air est à l'étude ; cela permettrait au minimum d'en déterminer l'ordre de grandeur. De plus, des mesures de température équivalente de ciel seront mises en place, comme décrites dans [Brau, 1997]. Ces mesures sont effectuées sur une surface horizontale, et permettent de déterminer l'impact du rayonnement céleste seul. Il est également envisagé d'utiliser le même dispositif sur des surfaces verticales, afin d'évaluer également, et globalement, l'influence de l'environnement proche et plus lointain (sol, bâtiments voisins, reliefs éloignés).

Par ailleurs, il apparaît souhaitable d'analyser plus en détail, expérimentalement et numériquement, la perméabilité à l'air de la cellule. Il s'agit d'un paramètre indispensable à la détermination du bilan hygrique du volume d'air intérieur de la cellule. Enfin, il conviendra d'étudier le comportement élémentaire des matériaux en régime dynamique, et dans des conditions non-isothermes, en particulier l'hystérésis de sorption/désorption.

Notre travail constitue la base d'une étude plus large ; les étapes suivantes consisteront à augmenter le niveau de complexité, en incluant dans la modélisation des éléments non pris en compte jusqu'à présent (parois horizontales, comble, éléments bi- ou tridimensionnels des parois), et en affinant le modèle développé (bardage, infiltrations d'air). Ces travaux permettront d'obtenir une bonne connaissance des transferts d'humidité et de chaleur dans les maisons à ossature bois et des risques associés, et d'envisager des solutions techniques pour y remédier.

Bibliographie

- BERNARD, R., MENGUY, G. et SCHWARTZ, M. (1979). *Le rayonnement solaire - conversion thermique et applications*. Technique et documentation, 11 rue Lavoisier, 75008 Paris. 215 pages. ISBN 2-85206-043-4
- BLOCKEN, B., JANSSEN, H., ROELS, S., DEROME, D. et CARMELIET, J. (2006). Local wind speed near exterior building surfaces for convective transfer coefficients. *In* Fazio, Ge, Rao, Desmarais Eds. Research in Building Physics and Building Engineering, Montréal, Canada. pages 925-933.
- BRAU, J. (1997). Température du ciel : une mesure simplifiée. *Essais industriels*, (décembre 1997). Association pour le développement des sciences et techniques de l'environnement, 8 rue Roquépine, 75008 Paris. ISSN 1290-0206.
- BRETON, J. (1986). *Modélisation thermique et simulation numérique en régime variable de parois à lame d'air insolée et/ou ventilée*. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- CLARK, G. et ALLEN, C. (1978). The estimation of atmospheric radiation for clear and cloudy skies. *In* Proceedings of the second national passive solar conference, Philadelphie, USA.
- DEROME, D., CARMELIET, J. et KARAGIOZIS, A. (2009). Évaluation de l'importance de forts gradients hygrothermiques vers l'intérieur sur le comportement d'assemblages de murs. *In* IX^{ème} Colloque interuniversitaire Franco-Québécois sur la thermique des systèmes, Lille.
- DUTA, A. (1998). *Études thermiques et aérodynamiques des structures légères double paroi avec effet pariétodynamique*. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- E.O.T.A. (2005). Kit de construction à ossature bois WeberHaus. ETA-05/0022, Valable du 12/05/2005 au 12/05/2010.
- FAURE, X. (2007). *Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique*. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- FAZIO, P., VERA, S., RAO, J., YANG, X. et GE, H. (2008). Datasets of whole-building HAM and indoor conditions for single room and two-room experimental set-ups. Final report IEA, EXCO ECBCS Annex 41, ACCO, Leuven, Belgique, *CD ROM*.

Bibliographie

- GEVING, S. et UVSLØKK, S. (2000). Moisture conditions in timber frame roof and wall structures - test house measurements for verification of heat-, air and moisture transfer models. Project report 273. Forskningsveien 3B, Oslo, Norvège. ISBN 82-536-0700-8.
- GRAU, K. et RODE, C. (2006). A model for air flow in ventilated cavities implemented in a tool for whole-building hygrothermal analysis. IEA, Annex 41, Lyon meeting, octobre 2006.
- HAGENTOFT, C. E. (2001). *Introduction to building physics*. Studentlitteratur, Lund, Suède. ISBN 91-44-01896-7.
- HENS, H. (1996). Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts - task 1 : modeling. Final report IEA, EXCO ECBCS Annex 24, ACCO, Leuven, Belgique. ISBN 90-75741-02-2.
- HENS, H. (2007). *Building physics - Heat, air and moisture*. Ernst & Sohn, Berlin, Allemagne. ISBN 978-3-433-01841-5.
- HOLM, A., KÜNZEL, H.M. et SEDLBAUER, K. ((2003). The hygrothermal behavior of rooms : combining thermal simulation and hygrothermal envelope calculation. *In 8th international IBPSA conference, Eindhoven, Pays-Bas.*
- HOLM, H. et KÜNZEL, H.M. (2006). Experimental investigation of the hygric buffering capacity of wood based interior paneling. *In Fazio, Ge, Rao, Desmarais Eds. Research in Building Physics and Building Engineering, Montréal, Canada. pages 3-9.*
- JAN, J. (1983). Rayonnement solaire : aspects géométriques et astronomiques. Cours et manuels, direction de la météorologie, Boulogne-Billancourt. ISSN 0240-8996.
- KADA, H., ANTCZAK, E., BRODA, M. et WIRKIN, E. (2004). Calibe, la maîtrise de la qualité des bétons. Projet national de l'IREX (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil) - Document « La flumétrie » disponible sur www.irex.asso.fr.
- KAEMMERLEN, A. (2009). *Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment*. Thèse, Nancy Université.
- KALAGASIDIS, A. S. (2003). HAM tools : International Building Physics Toolbox - block documentation. Department of Building Physics - Chalmers Institute of Technology, Sweden - Report : R-02 :6, Version 8/10/2003 ; disponible sur www.ibpt.org.
- KALAGASIDIS, A. S. (2004). *HAM-Tools, An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analyses in Building Physics*. Thèse, Department of Building Technology, Building Physics division, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suède.

- KALAGASIDIS, A. S. et HAGENTOFT, C.-E. (2003). The influence of air transport in and around the building envelope on energy efficiency of the building. *In* Carmeliet, Hens, Vermeir Eds. Proceedings of the 2nd International conference on building physics, Antwerpen, Belgique. pages 729-735.
- KALAGASIDIS, A. S., WEITZMANN, P., NIELSEN, T. R., PEUHKURI, R., HAGENTOFT, C.-E. et RODE, C. (2007). The international building physics toolbox in simulink. *Energy and buildings*, 39(6):665.
- KÄKELÄ, P. et VINHA, J. (2002). Outdoor field test of timber-framed external wall element structure. *In* Gustavsen et Thue Eds. Proceedings of the 6th Symposium on building physics in the nordic countries, Trondheim, Norvège. Nowegian University of Science and Technology. pages 843-849.
- KÜNZEL, H. et KIESSL, K. (1996). Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(1):159 – 167.
- KÜNZEL, H. M. (1995). *Simultaneous heat and moisture transport in building components - One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Fraunhofer IRB, Stuttgart. ISBN 3-8167-4103-7.
- KÜNZEL, H. M., KARAGIOZIS, A. et KEHRER, M. (2008). Assessing the benefits of cavity ventilation by hygrothermal simulation. *In* Roels, Vermeir, Saelens Eds. Proceedings of the Building Physics Symposium in honour of Professor Hugo Hens. Laboratory of Building Physics, Catholic University, Leuven, Belgique.
- KRUS, M. (1996). Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials. Fraunhofer IRB, Stuttgart. ISBN 3-8167-4535-0.
- KUMARAN, K. (1996). Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts - task 3 : material properties. Final report IEA, EXCO ECBCS Annex 24, ACCO, Leuven, Belgique.
- KUMARAN, K., LACKEY, J., NORMANDIN, N., TARIKU, F. et van REENEN, D. (2002). A thermal and moisture transport property database for common building and insulating materials. *Final Report from ASHRAE Research Project 1018-RP*.
- KUMARAN, K. et SANDERS, C. (2008). Annex 41 Whole building heat, air, moisture response - Boundary conditions and whole building ham analysis. Final report IEA, EXCO ECBCS Annex 41, ACCO, Leuven, Belgique. ISBN 978-90-334-7059-2.
- LOVEDAY, D. et TAKI, A. (1996). Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full scale building facade. *International journal of heat and mass transfer*, 39(8):1729–1742.

Bibliographie

- MAREF, W., LACASSE, M. et BOOTH, D. (2003). Assessing the hygrothermal response of wood sheathing and combined membrane-sheathing assemblies to steady-state environmental conditions. *In* Carmeliet, Hens, Vermeir Eds. Proceedings of the 2nd International conference on building physics, Antwerpen, Belgique. pages 427-436.
- MAREF, W., LACASSE, M. et BOOTH, D. (2004). Large-scale laboratory measurements and benchmarking of an advanced hygrothermal model. Rapport NRCC-46784, disponible sur <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.
- MAREF, W., OUAZIA, B., REARDON, J. et ROUSSEAU, M. (2007). Ventilation and wall research house. Performance of exterior envelope of whole buildings X conference, Clearwater, U.S.A, 2007; disponible sur le site du NRC : <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca>.
- CORDEIRO MENDOÇA, K. (2004). *Modélisation des champs thermo-hydro-aérauliques des locaux climatisés selon l'approche zonale (prise en compte des phénomènes de sorption d'humidité)*. Thèse, Université de La Rochelle.
- MIRANVILLE, F. (2002). *Contribution à l'Etude des Parois Complexes en Physique du Bâtiment : Modélisation, Expérimentation et Validation Expérimentale de Complexes de Toitures incluant des Produits Minces Réfléchissants en climat tropical humide*. Thèse, Université de La Réunion.
- PALYVOS, J. (2007). A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Applied thermal engineering*, 28:801–808.
- PERRÉ, P. (2007). *Fundamentals of wood drying*. ARBOLOR - ENGREF, 14 rue Girardet, 54042 Nancy. ISBN 9 782907 086127.
- PIOT, A., ABELÉ, C., WOLOSZYN, M. et BRAU, J. (2008). Numerical simulation aided design of an experimental protocol. *In* Rode Ed. Proceedings of the 8th Symposium on building physics in the nordic countries, Copenhagen, Danemark. pages 731-738.
- PRATINTHONG, N. (2004). *Impact des conditions extrêmes sur le comportement des isolants thermiques pour différents types de panneaux sandwichs*. Thèse, Université de Nice-Sophia Antipolis.
- QUENARD, D., LAURENT, J.P. et SALLÉE, H. (1986). Influence de la teneur en eau et de la température sur les paramètres thermiques du plâtre. *Revue générale de thermique*, (n°291, mars 1986). ISSN 0035-3159/86/3/137.
- QUENARD, D., et SALLÉE, H. (1988). Détermination rapide des paramètres thermiques des matériaux par sonde à choc et thermofluxmètres. *Cahiers du CSTB, études et recherches*, (n°2295, novembre 1988).

- RODE, C., GUDUM, C., WEITZMAN, P., PEUHKURI, R., NIELSEN, T. R., KALAGASIDIS, A. S. et HAGENTOFT, C. E. (2003). International building physics toolbox - general report. Department of Building Physics - Chalmers Institute of Technology, Sweden - Report : R-02 :4 ; disponible sur www.ibpt.org.
- ROELS, S. (2008). Annex 41 whole building heat, air, moisture response - experimental analysis of moisture buffering. Final report IEA, EXCO ECBCS Annex 41, ACCO, Leuven, Belgique. ISBN 978-90-334-7058-5.
- van SCHIJNDEL, J. (2007). *Integrated heat, air and moisture modeling and simulation*. Thèse, Eindhoven University of technology, Eindhoven, Pays-Bas.
- STESKENS, P., RODE, C. et JANSSEN, H. (2008). Influences of the indoor environment on heat, air and moisture conditions in the component : boundary conditions modeling. In Rode Ed. Proceedings of the 8th Symposium on building physics in the nordic countries, Copenhagen, Danemark. pages 653-660.
- TANG, R., ETZION, Y. et MEIR, I. (2004). Estimates of clear night emissivity in the negev highlands, israel. *Energy conversion and management*,45:1831-1843.
- TRNSYS (2005). Trnsys 16. *Manuel d'utilisation*.
- VERA, S., FAZIO, P. et RAO, J. (2008). Experimental set-up and initial results of moisture transport through horizontal openings. In Rode Ed. Proceedings of the 8th Symposium on building physics in the nordic countries, Copenhagen, Danemark. pages 393-400.
- VINHA, J. (2007). *Hygrothermal performance of timber-framed external walls in Finnish climatic conditions : a method for determining the sufficient water vapour resistance of the interior lining of a wall assembly*. Thèse, Tampere University of technology, Tampere, Finlande.
- WOLOSZYN, M. et RODE, C. (2008a). Annex 41 whole building heat, air, moisture response - Modelling principles and common exercises. Final report IEA, EXCO ECBCS Annex 41, ACCO, Leuven, Belgique. ISBN 978-90-334-7057-8.
- WOLOSZYN, M. et RODE, C. (2008b). Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings. *Building Simulation : an international journal*, 1:5-24.
- YOSHINO, H., MITAMURA, T. et HASEGAWA, K. (2009). 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*, 44:1418-1425.

Bibliographie

Annexe A

Détails constructifs de la cellule expérimentale

A.1 Plans d'exécution

Les plans donnés ci-après ont été fournis par l'entreprise de construction Menuiserie Confort, après la livraison de la cellule.

Annexe A Détails constructifs de la cellule expérimentale

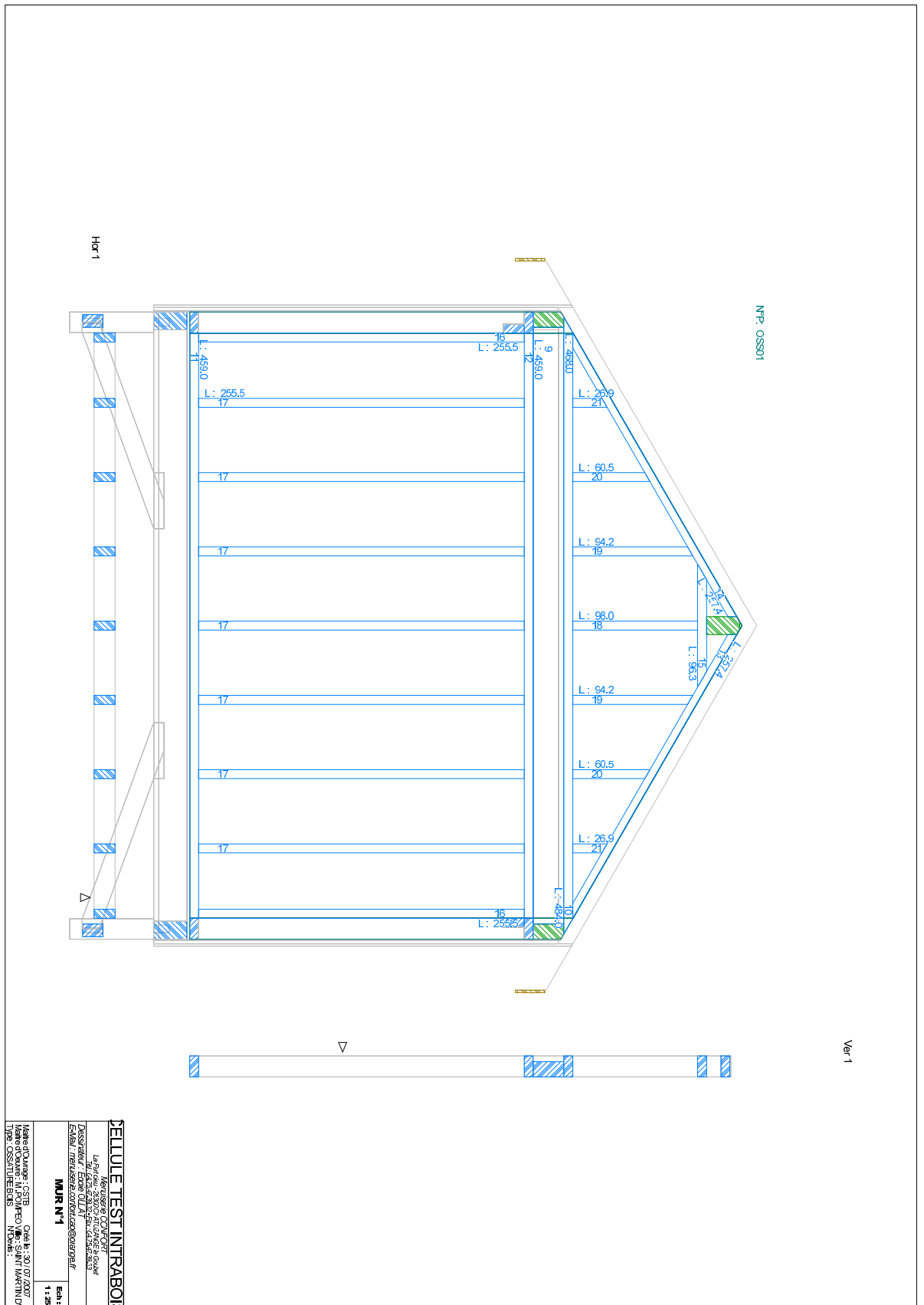


FIG. A.1 : Vue en coupe verticale de l'ossature de la cellule, mur pignon

Annexe A Détails constructifs de la cellule expérimentale

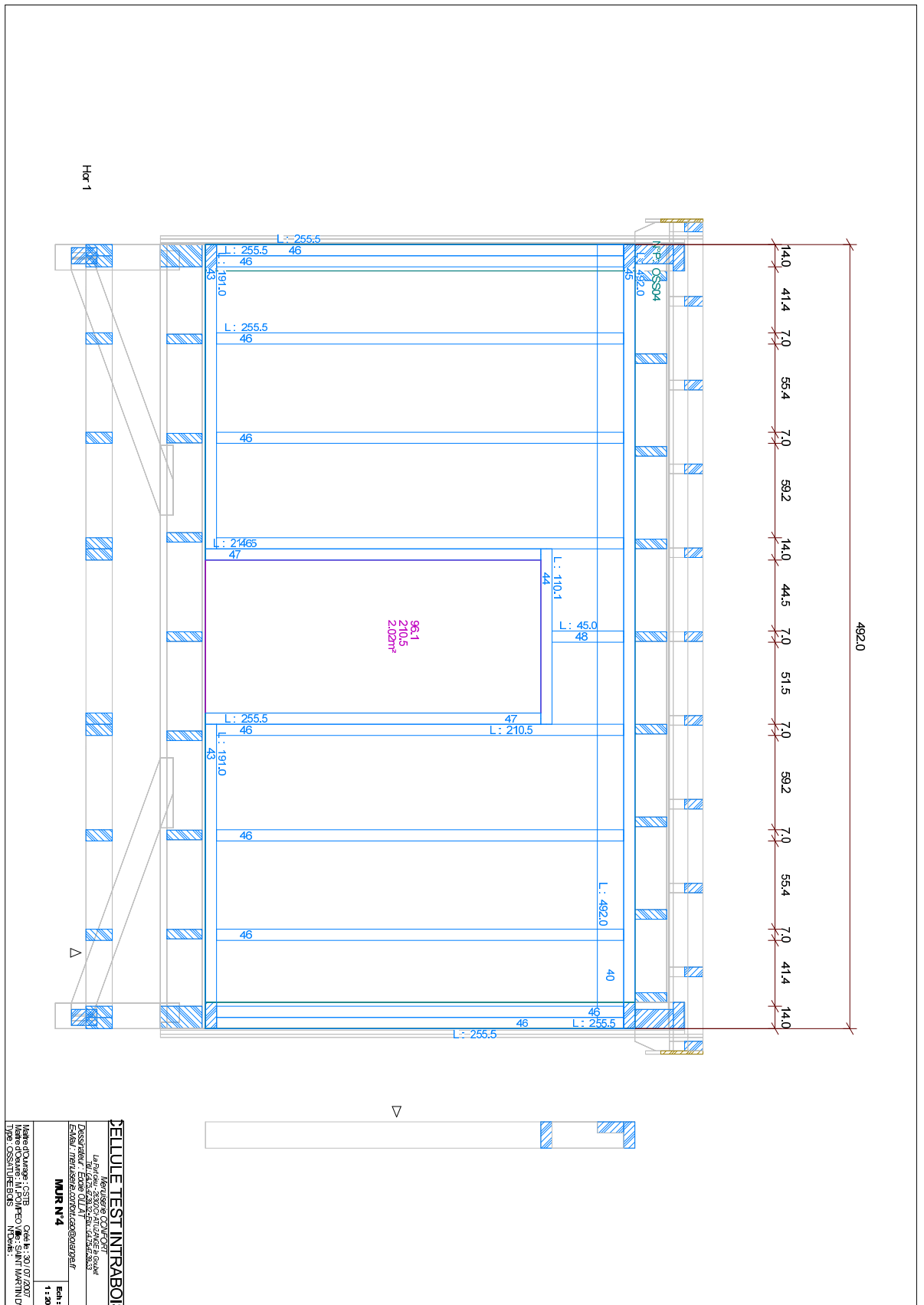


FIG. A.3 : Vue en coupe verticale de l'ossature de la cellule, mur de façade Nord

Annexe A Détails constructifs de la cellule expérimentale

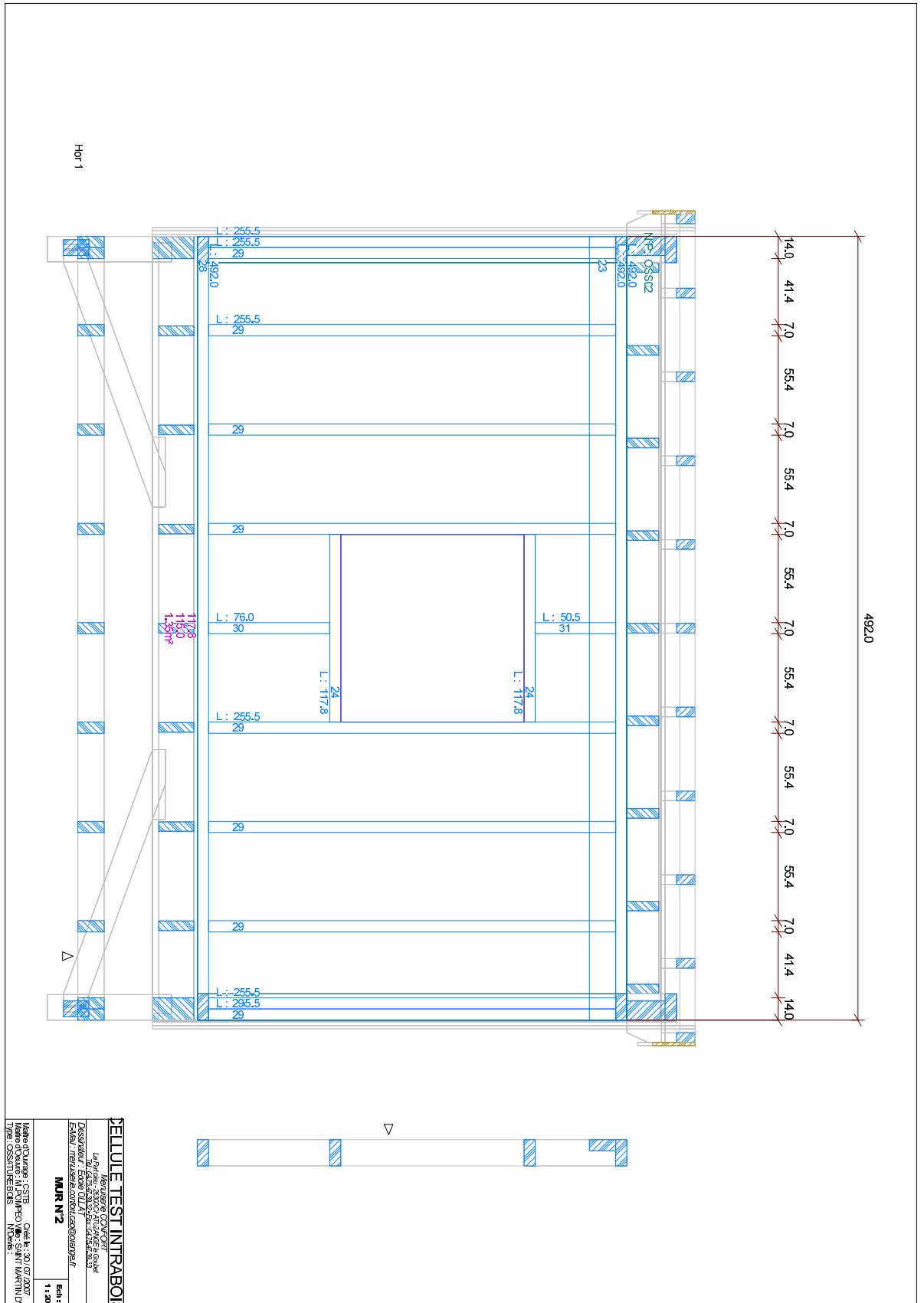


FIG. A.4 : Vue en coupe verticale de l'ossature de la cellule, mur de façade Sud

A.2 Jonctions entre les parois verticales et horizontales

Lors de la construction de la cellule, le plancher a été monté comme une plateforme entièrement indépendante ; les parois verticales ont ensuite été posées puis fixées dessus, la lisse basse étant alors en contact direct avec le cadre du plancher.

Au niveau du plafond, 2 types de montages sont à distinguer, selon que le mur vertical est en pignon, ou de façade. Le plafond a en effet été sur-isolé par en-dessous, c'est à dire côté intérieur de la pièce. Une couche d'isolant se situe alors entre la lisse haute et le parement du plafond ; le pont thermique est ainsi coupé. Ceci est vrai pour les murs de pignon (Est et Ouest), en revanche, pour les murs de façade (Nord et Sud), une poutre de renfort est ajoutée sous la lisse haute afin de supporter la charpente et la couverture.

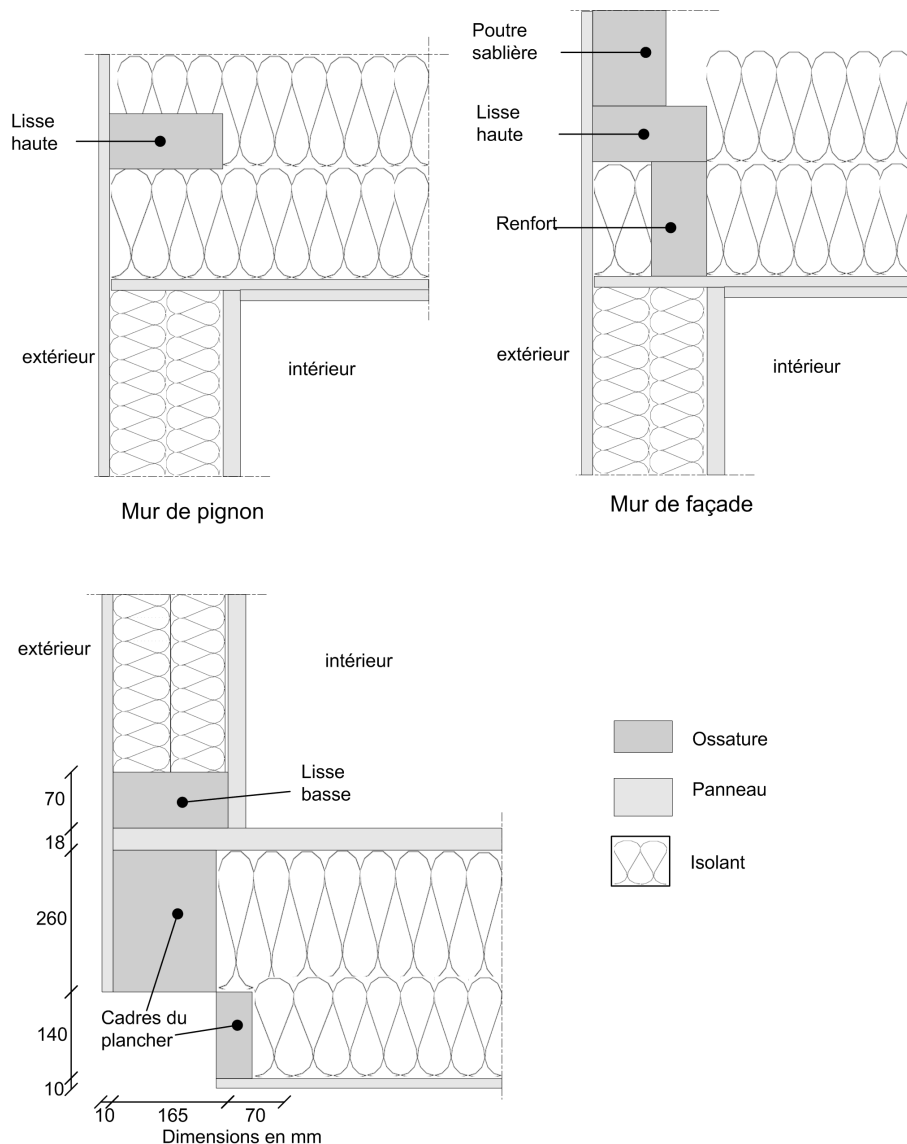


FIG. A.5 : Schémas des jonctions entre les parois verticales et horizontales

Annexe B

Mesures complémentaires sur les capteurs

B.1 Test de réponse d'un thermohygromètre

Afin de vérifier la réponse des thermohygromètres, et en particulier leur inertie, nous en avons soumis un à un test en humidité absolue constante : la figure B.1 présente un schéma du dispositif expérimental. Le principe en est le suivant : le capteur est placé dans une coupelle métallique, rendue aussi étanche que possible (l'étanchéité de la fermeture est compliquée en raison du câble d'alimentation et de sortie du capteur). Celle-ci a été conditionnée à 23°C , 53% d'humidité relative (HR).

La coupelle est ensuite placée dans une étuve réglée en humidité et en température ; dans la première partie du test, la consigne d'humidité est modifiée dans l'étuve (voir figure B.2), à température constante, afin de vérifier l'étanchéité de la coupelle. Celle-ci nous paraissant satisfaisante, le test s'est poursuivi à humidité relative constante dans l'étuve, en faisant varier la température de consigne. Le capteur étant placé dans une étuve presque étanche, la variation de température correspond à une variation inverse de l'humidité relative. La dernière courbe de la figure B.2 donne l'humidité relative que l'on obtiendrait dans une coupelle parfaitement étanche (humidité absolue constante). Les différences observées entre la courbe mesurée et la courbe calculée peuvent être imputées à une fuite dans la coupelle. Les résultats nous permettent donc d'avoir toute confiance dans ces thermohygromètres, à leur précision près (donnée par le fabricant à $\pm 5\%$ HR).

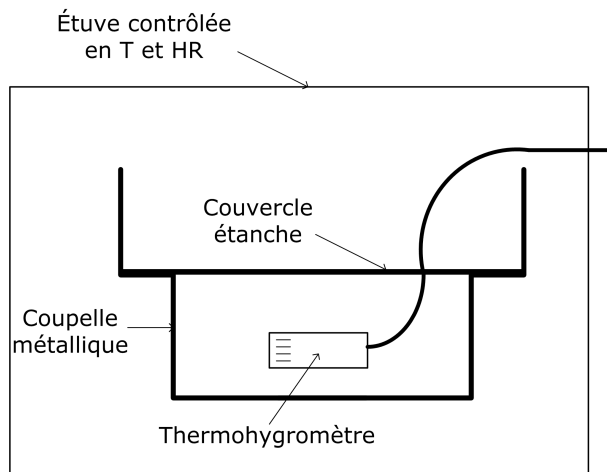


FIG. B.1 : Schéma de principe du dispositif de test pour un thermohygromètre

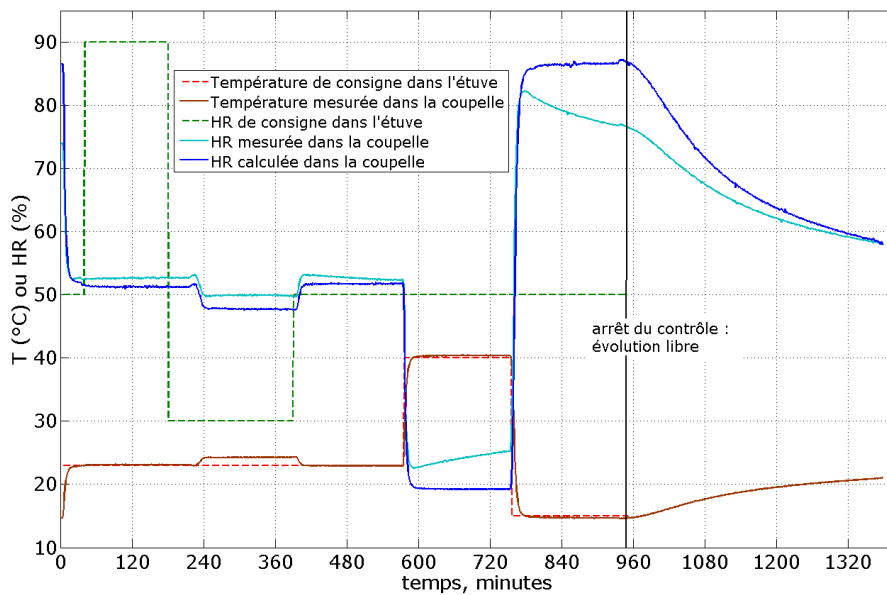


FIG. B.2 : Tests de réponse d'un thermohygromètre

B.2 Comparaison des mesures : thermocouples-thermo hygromètres

Dans les parois Est et Ouest, nous utilisons 2 types de capteurs de mesure de température : des thermocouples et des thermo hygromètres. La figure B.3 (haut) rappelle les placements.

La figure B.3 montre les écarts de température obtenus de part et d'autre d'une couche d'isolant ($T_2 - T_3$), et de 2 couches d'isolant ($T_2 - T_4$), mesurés par les thermocouples (TC) et les thermo hygromètres (HRT). Les écarts très faibles, et inférieurs aux incertitudes de mesure, permettent de s'assurer de la cohérence du système de mesure des températures.

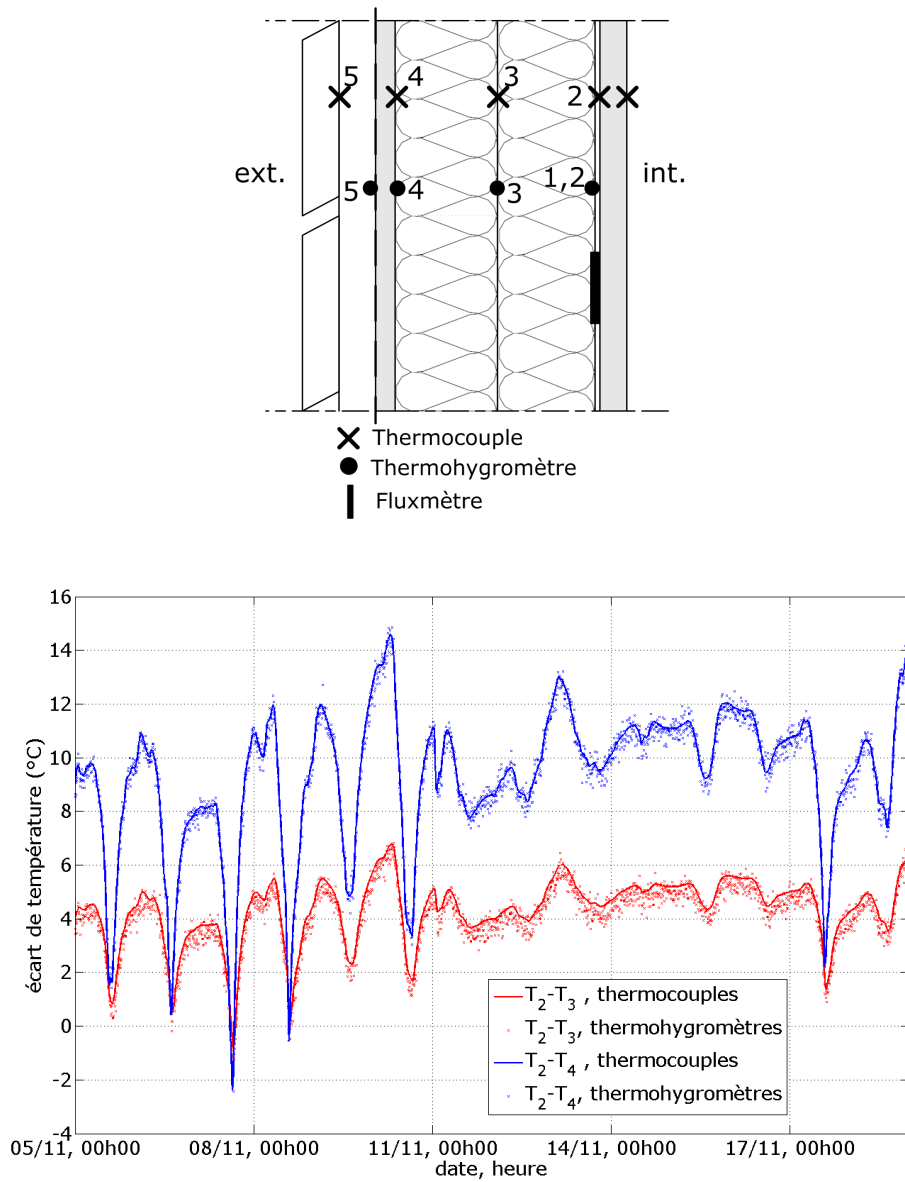


FIG. B.3 : Comparaison des mesures entre les thermocouples et les thermohygromètres

Annexe C

Détails du placement des capteurs en paroi Est

La figure C.1 rappelle les emplacements choisis pour positionner les capteurs. Les détails pour chaque emplacement sont donnés ci-après.

L'emplacement C correspond au pont thermique créé par l'angle vertical, au Nord-Est.

L'emplacement D est situé dans le coin bas de cet angle ; il permet de mesurer le pont thermique lié à la combinaison plancher-angle vertical.

Les emplacements E et G sont instrumentés de manière identique : ils ont pour but d'étudier le pont thermique créé par un montant vertical, la lisse basse et le plancher. En outre, une solive du plancher aboutit en G.

À l'emplacement F nous étudions l'effet thermique du plancher et de la lisse basse seuls.

Les emplacements H et I ont pour but de vérifier la faiblesse du pont thermique dû au plafond, mais aussi d'étudier un emplacement où l'humidité et la température peuvent être plus élevées en raison d'une stratification des conditions hygrothermiques dans la pièce ou dans la paroi.

Enfin, l'emplacement J a été considéré comme une « zone à risque », pouvant atteindre des températures plus basses du fait de l'angle, mais des humidités plus élevées en raison de sa hauteur.

Annexe C Détails du placement des capteurs en paroi Est

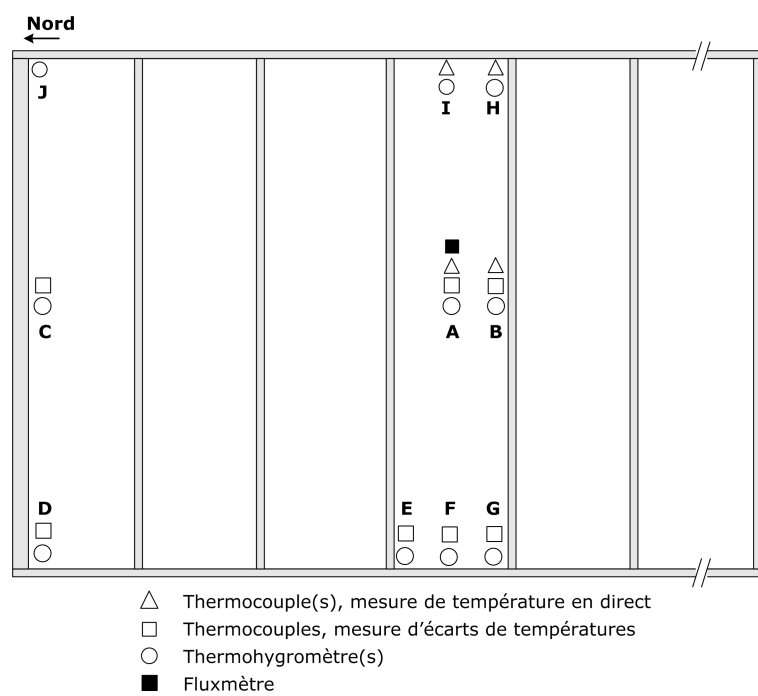


FIG. C.1 : Rappel des emplacements instrumentés dans la paroi Est (vue de l'intérieur)

Annexe C Détails du placement des capteurs en paroi Est

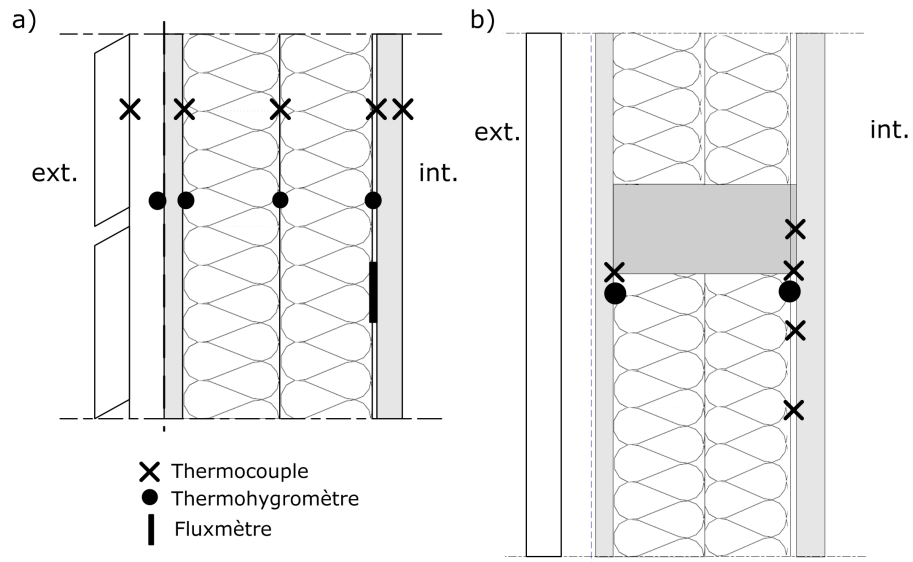


FIG. C.2 : Emplacements A et B : capteurs placés en paroi Est en section courante et près d'un montant

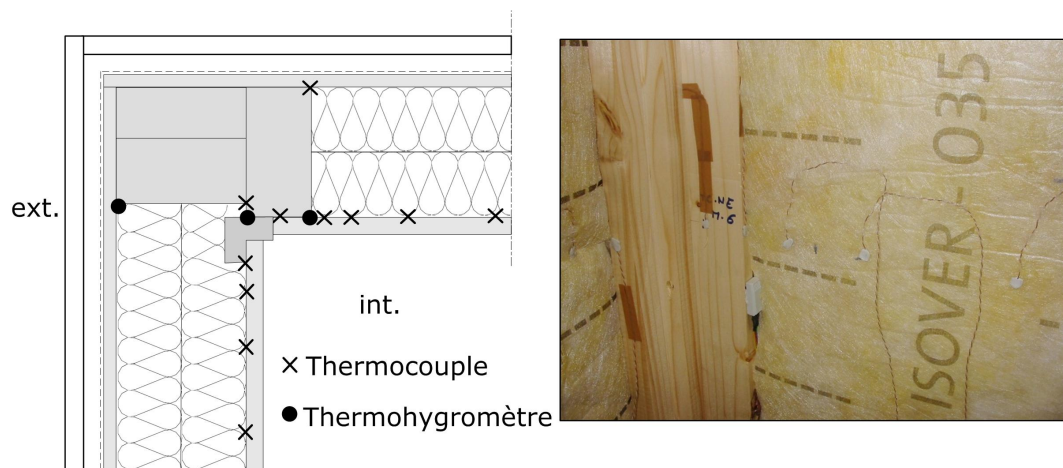


FIG. C.3 : Emplacement C : capteurs placés dans l'angle Nord-Est, au milieu

Annexe C Détails du placement des capteurs en paroi Est

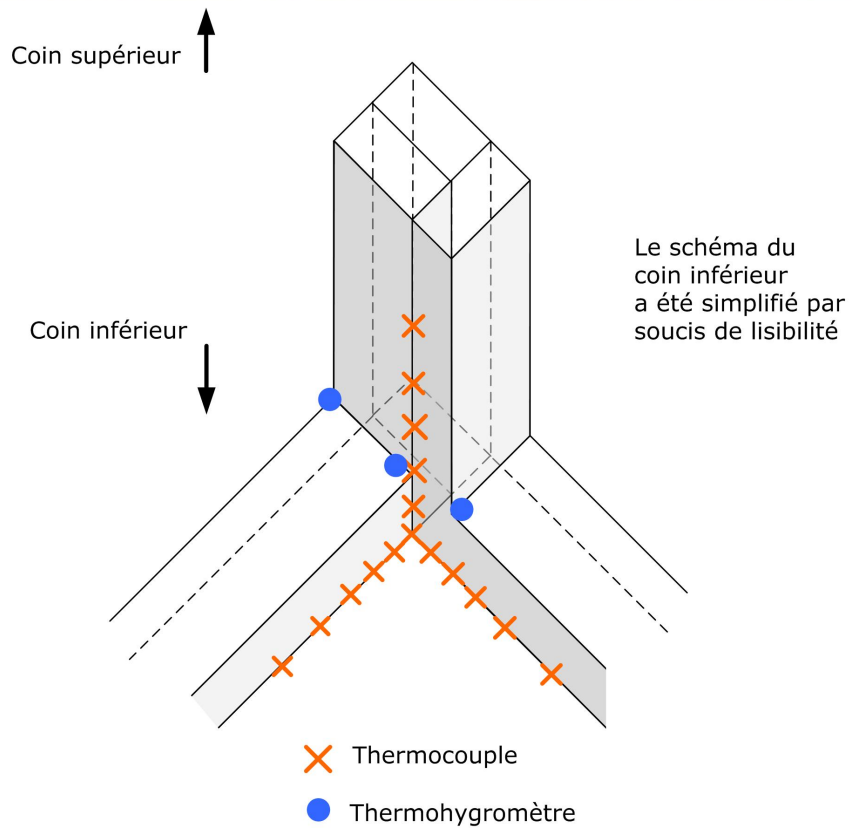
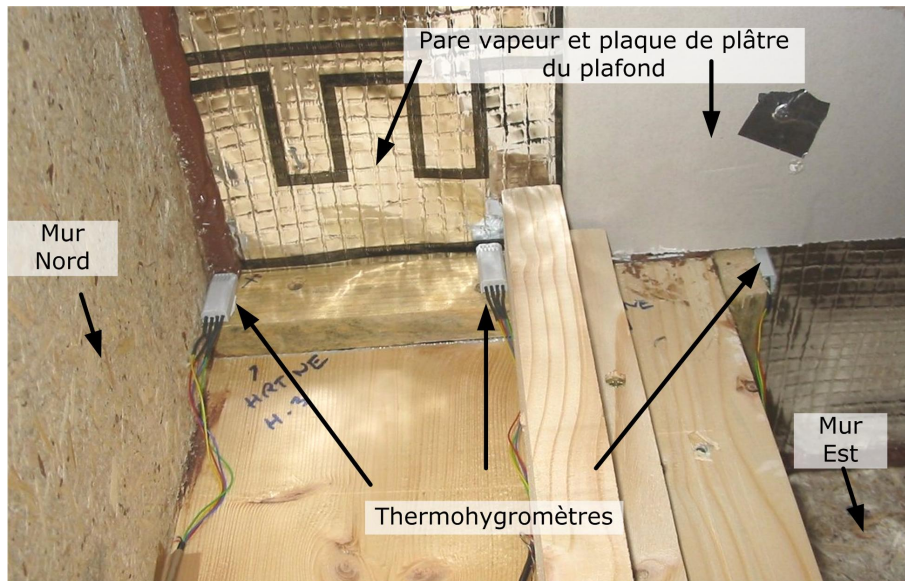


FIG. C.4 : Emplacements D et J : capteurs placés dans l'angle Nord-Est, en haut et en bas

Annexe C Détails du placement des capteurs en paroi Est

Annexe D

Méthodes et résultats des mesures de propriétés des matériaux

Document rédigé par Charlotte Abelé, ingénieur CSTB

D.1 Caractéristiques nécessaires et planning de réalisation

La première étape de ce travail a été de recenser les différents matériaux mis en œuvre dans la cellule et d'associer pour chacun les informations nécessaires afin d'alimenter correctement le modèle numérique.

Les différents matériaux devant être caractérisés sont listés ci-dessous :

- Plaque OSB (plancher)
- Panneaux de particules, par la suite notés « plaque MFP » (« multi-fonction pannel », parement intérieur et contreventement)
- Bois porteur (épicéa)
- Pare pluie
- Pare vapeur
- Plaque de plâtre (plafond)
- Laine de verre
- Mélèze (bardage extérieur)

Pour chacun d'eux plusieurs morceaux ont pu être mis de côté au cours de la construction de la cellule afin de procéder aux mesures sur plusieurs échantillons.

Les différentes mesures envisagées sont listées ci-dessous :

- Caractéristiques à l'état sec : conductivité thermique (λ_{sec}), masse volumique (ρ_{sec}) et chaleur spécifique ($C_{p,sec}$). L'état sec est défini conventionnellement comme l'état du matériau séché à $70^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ avec de l'air pris dans une ambiance de $23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ et $50 \pm 5\%$ d'humidité relative (pour le plâtre la température est de $40^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$);

Annexe D Méthodes et résultats des mesures de propriétés des matériaux

- Caractéristique thermique à l'état humide : conductivité thermique en fonction de l'humidité relative ($\lambda(w)$);
- Conductivité liquide K ;
- Perméabilité à l'air (k_a);
- Perméabilité à la vapeur d'eau (NF EN ISO 12572 et 12086) en fonction de la teneur en eau $\delta(w)$;
- Courbe de sorption (NF EN ISO 12571) $w = f(\text{HR})$;
- Émissivité hémisphérique (ϵ) et coefficient d'absorption (α).

Une fois que l'ensemble des caractéristiques à déterminer ainsi que les contraintes associées (mobilisation des étuves, taille des échantillons) ont pu être établies le phasage suivant a été établi :

Phase 1 :

- Séchage des matériaux;
- Mesure du ρ_{sec} , du λ_{sec} et du $C_{p,sec}$;
- Découpe des échantillons pour procéder aux différentes mesures.

Phase 2 : mise en place des échantillons en étuve, mesure de la courbe de sorption et de la conductivité thermique en fonction de l'humidité relative.

Phase 3 : mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau. Cette mesure sera réalisée dans un second temps car les matériaux seront redécoupés en échantillons plus petits. Si les dimensions des morceaux disponibles permettent à la fois de réaliser les mesures de conductivité thermique et les mesures de perméabilité à la vapeur d'eau, les phases 2 et 3 peuvent être menées en parallèle.

Phase 4 : mesure des autres caractéristiques. Les mesures d'émissivité hémisphérique et du coefficient d'absorption sont réalisées sur des petits échantillons. Elles peuvent donc être réalisées en parallèle. Les mesures de diffusivité hydrique et de perméabilité à l'air seront réalisées en dernier puisqu'elles ne peuvent être réalisées au CSTB.

Les différentes mesures à réaliser sont rassemblées dans le tableau suivant. Les mesures ont débuté en avril 2008 et ont duré 1 an et demi environ. Ce temps de réalisation s'explique par la capacité des matériaux mis en œuvre (en particulier les plaques OSB et MFP et encore plus l'épicéa) d'absorber l'humidité. Le temps nécessaire à la mise en équilibre de ces matériaux dans des ambiances de plus en plus humides lors de la réalisation des courbes de sorption a été particulièrement important.

Matériau	$C_{p,sec}$	ρ_{sec}	α	ϵ	k_a	$\delta(w)$	λ_{sec}	$\lambda(w)$	K	$w = f(HR)$
OSB	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Épicéa	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
Panneau de particule	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pare-vapeur					✓					
Pare-pluie				✓	✓	✓				
Plaque de plâtre	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mélèze			✓	✓			✓			
Laine de verre	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓

TAB. D.1 : Tableau de synthèse des mesures à réaliser

D.2 Caractéristiques thermiques et hydriques

D.2.1 Caractéristiques à l'état sec

Les matériaux ont été placés dans un four à 70°C (sauf pour le plâtre à 40°C) et ont été pesés régulièrement. Une fois les échantillons stabilisés les différentes mesures de conductivité thermique ont pu être réalisées à l'aide du fluxmètre de marque TAURUS conformément à la norme NF EN 12664. Les mesures sont réalisées à 23°C . Avant et après chaque essai les échantillons sont pesés.

Par ailleurs les mesures de chaleur spécifique ont pu être réalisées à l'aide d'un microcalorimètre : le $\mu\text{DSC VII}$ de SETARAM. Il se distingue de la DSC classique dans le principe même de son fonctionnement qui est basé sur la méthode Tian Calvet (méthode utilisée en calorimétrie). La mesure de flux et le chauffage sont réalisés par des éléments Pelletier situés le long de la cellule. Le grand volume de cellule (1 cm^3) permet de mesurer des échantillons de taille tout à fait représentative des matériaux analysés (15 à 20 fois supérieure à la DSC).

Les valeurs moyennes obtenues sont les suivantes :

Matériau	ρ_{sec} (kg/m^3)	λ_{sec} (mW/mK)
MFP	700.2	106.7
OSB	601.6	97.9
Laine de verre	19.4	32
Epicéa	366.9	90.1
Plaque de plâtre	712.5	190
Mélèze (non séché)		130

TAB. D.2 : Valeurs de conductivité thermique et de masse volumique obtenues sur les matériaux secs

D.2.2 Émissivité hémisphérique et coefficient d'absorption

L'émissivité de chacun des matériaux a été mesurée à l'aide d'un émissomètre de marque INGLAS et de type TIR 100-2. Une surface hémisphérique maintenue à 100°C émet un rayonnement infra-rouge diffus vers l'échantillon. Un détecteur mesure la réflexion infrarouge de la surface de l'échantillon. L'émissivité de l'échantillon est mesurée après calibration du détecteur avec des échantillons étalonnés (forte et faible valeurs d'émissivité). Les mesures sont réalisées en trois endroits différents et le résultat correspond à la valeur moyenne de ces mesures. L'incertitude estimée est de 3 %.

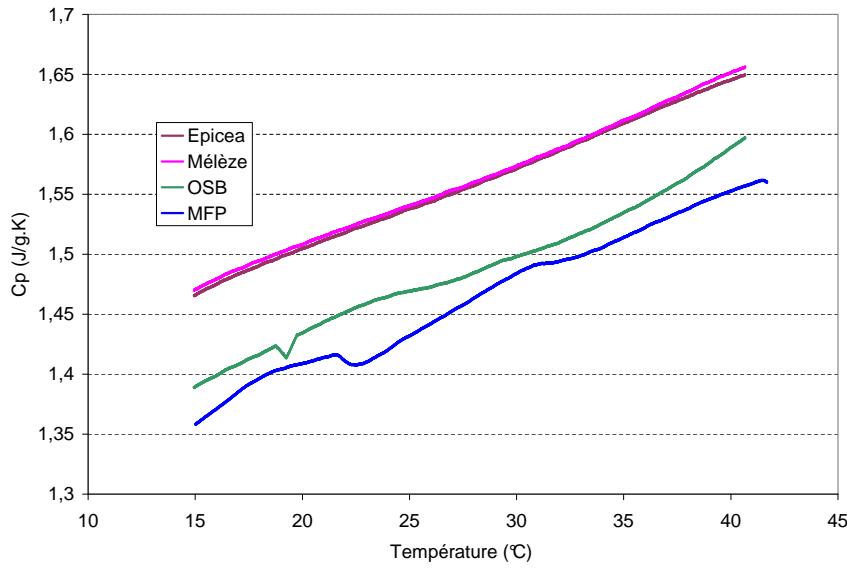


FIG. D.1 : Mesures de la chaleur spécifique des échantillons à température ambiante

Matériau	Emissivité (%)
OSB	89
MFP	88
Plâtre	85
Pare pluie	75
Bardage recto	85
Bardage verso	87

TAB. D.3 : Emissivité hémisphérique en %

Seul le coefficient d'absorption hémisphérique en courtes longueurs d'ondes du bardage est nécessaire puisqu'il est le seul matériau exposé au rayonnement solaire. La valeur moyenne de réflexion énergétique normale hémisphérique est calculée à partir des mesures réalisées à l'aide du réflectomètre grande ouverture. Le facteur d'absorption de l'énergie solaire α_e est déduit de la réflexion normale hémisphérique de l'énergie solaire ρ_e^{nh} à partir de la relation suivante : $\alpha_e = 1 - \rho_e^{nh}$.

Le réflectomètre à grande ouverture fournit une mesure globale du facteur de réflexion quasi normale hémisphérique sur le domaine énergétique solaire (0,38 à 2,5 μm). La taille relativement importante de la sphère d'intégration (\varnothing 250 mm) permet la mesure sur une surface importante (\varnothing 110 mm) et donc la prise en compte des hétérogénéités de surface. La sphère d'intégration est une sphère de 25 cm de

diamètre présentant une ouverture de 11 cm côté échantillon et de 4 cm côté faisceau lumineux. Le revêtement interne est du sulfate de baryum. Les détecteurs utilisés sont des thermopiles qui ont une réponse linéaire avec le spectre solaire. L'incertitude sur le facteur obtenu avec le réflectomètre grande ouverture est de 5 %.

Matériau	Absorption minimale (%)	Absorption maximale (%)
Bardage (Mélèze)	34	40

TAB. D.4 : Facteur d'absorption en %

Pour les autres matériaux, dans le domaine des grandes longueurs d'onde l'absorption est supposée égale à l'émissivité.

D.2.3 Courbe de sorption

Pour chaque matériau 3 échantillons ont été découpés et placés dans une étuve réglée en température et humidité relative. La température est fixée à 23°C tandis que l'humidité relative varie selon les paliers suivants : 30% ; 50% ; 65% ; 80% et 94%. La mise en équilibre de l'ensemble des différents matériaux a nécessité en moyenne 3 mois sachant que ce délai était principalement gouverné par l'OSB et le MFP. L'épicéa nécessitant encore plus de temps il a été choisi de le placer dans une étuve séparée afin d'avancer plus rapidement le reste des mesures.

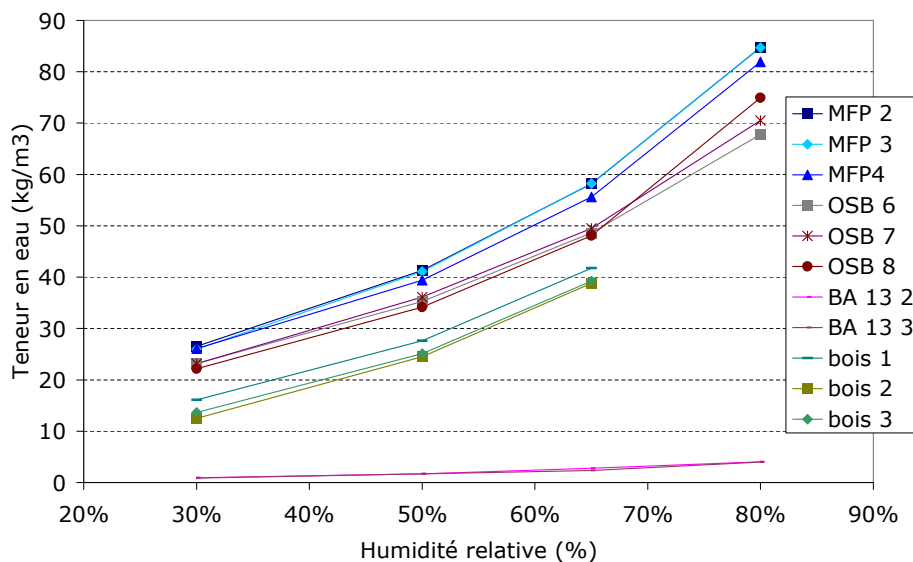


FIG. D.2 : Courbes de sorption des différents échantillons

D.2.4 Variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité

A chaque palier d'humidité relative, une mesure de conductivité thermique de chaque échantillon a été programmée. Il semble qu'à partir de 50% d'humidité relative la mesure fluxmétrique pour les échantillons d'OSB, de MFP ne conviennent plus. En effet nous avons constaté d'importantes disparités entre les échantillons d'un même matériau et pour certain une évolution non conforme à ce qui est toujours constaté : la conductivité thermique n'augmentait pas toujours avec l'humidité du matériau.

A partir des premières mesures nous avons pu tracer des droites et retrouver des corrélations dans les mêmes ordres de grandeur que celles présentées dans les résultats de l'Annexe 14 de l'IEA (International Energy Agency), la conductivité s'écrivant alors sous la forme : $\lambda = \lambda_0 + a \times w$. Le tableau D.5 donne les valeurs de linéarisation et le coefficient de régression associé.

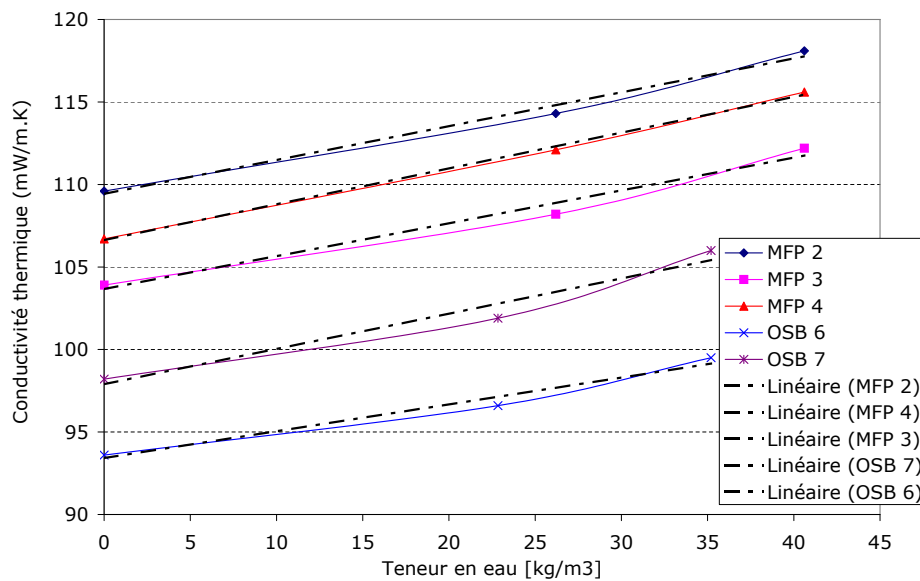


FIG. D.3 : Conductivité thermique en fonction du taux d'humidité

Échantillon	λ_0	a	R^2
MFP 1	109,42	0,2057	0,9891
MFP 2	103,66	0,1995	0,9791
MFP 3	106,62	0,2176	0,9981
OSB 1	93,412	0,1631	0,9745
OSB 2	97,891	0,2141	0,9606

TAB. D.5 : Conductivité thermique fonction du taux d'humidité

D.2.5 Perméabilité à la vapeur d'eau

La méthode de détermination de cette caractéristique est celle indiquée dans les normes NF EN ISO 12572 et 12086. Deux essais ont été réalisés, l'un en coupelle sèche et l'autre en coupelle humide.

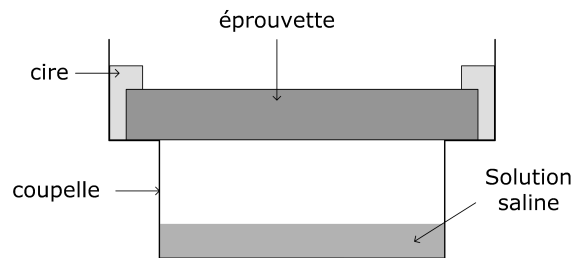


FIG. D.4 : Schéma de principe d'une coupelle

Les conditions appliquées sont les suivantes :

Grandeur	Coupelle sèche	Coupelle humide
Température	23°C	23°C
Humidité extérieure	50%	50%
Humidité intérieure	0%	94%

TAB. D.6 : Conditions d'essai pour les mesures de perméabilité à la vapeur

Les mesures sont réalisées sur trois éprouvettes pour chacun des matériaux. Les résultats obtenus sont les suivants :

Matériau	Conditions d'essai		Perméabilité à la vapeur d'eau moyenne [kg/m.s.Pa]	Coefficient moyen de résistance à la diffusion [-]
MFP	23°C	50%-0%	$2,11.10^{-12}$	90
	23°C	50%-94%	$2,79.10^{-12}$	68
Plâtre	23°C	50%-0%	$2,17.10^{-11}$	9
	23°C	50%-94%	$2,98.10^{-11}$	6
OSB	23°C	50%-0%	$1,81.10^{-12}$	105
	23°C	50%-94%	$1,88.10^{-12}$	101
Laine de verre	23°C	50%-94%	$1,67.10^{-10}$	1

TAB. D.7 : Perméabilité à la vapeur d'eau moyenne des différents échantillons

Annexe E

Rapports de mesures de perméabilité à l'air de la cellule expérimentale

Les rapports de mesures de perméabilité à l'air effectuées sur la cellule expérimentale sont présentés ci-après. Ils sont reproduits ici avec l'aimable autorisation de leurs auteurs :

- Le premier test a été effectué par la méthode de la porte soufflante, sans pare-vapeur, le 26 février 2008. Extrait du rapport de Delphine BANGSITHIDETH et Jean-Jacques AKOUA.
- Le second test a été effectué avec un perméascope, sans pare-vapeur, grille de ventilation fermée, le 10 juillet 2008. Rapport de Serge BUSEYNE.
- Le troisième test a été effectué avec un perméascope, après la pose du pare-vapeur, grille de ventilation fermée, le 16 avril 2008. Rapport de Serge BUSEYNE.
- Le troisième test a été effectué avec un perméascope, après la pose du pare-vapeur, grille de ventilation ouverte, le 16 avril 2008. Rapport de Serge BUSEYNE.

3. LE PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un dispositif de mesure de perméabilité à l'air intitulé « *fausse porte Minneapolis* » ou « *Minneapolis Blower door*® ».

La technique de mesure de perméabilité à l'air consiste à mettre en dépression le local de manière à mesurer le débit de fuite après avoir obturé les passages d'air spécifiques de ventilation.

A ce stade de sa construction, la maison expérimentale étudiée ne dispose d'aucun dispositif de ventilation (pas d'entrées d'air ni de bouche d'extraction) et d'aucune menuiserie. Cette maison expérimentale n'est en effet pas encore achevée.

On installe la fausse-porte faite d'une armature rigide (ajustable aux dormants de la porte d'entrée) et d'une toile hermétique à l'emplacement de la double porte d'entrée de cellule.

Le dispositif expérimental est constitué d'un ventilateur muni de diaphragmes d'adaptation pour la mesure du débit ainsi que d'un poste de commande et d'acquisition de données.

On peut voir sur la figure 2 une vue partielle du dispositif expérimental.



Figure 2 : Fausse porte mise en place au niveau de la double porte d'entrée

Les mesures sont réalisées en mode automatique dans le cadre de nos expérimentations. Dans ce mode automatique, les mesures de pressions sont reliées à des capteurs connectés à la centrale d'acquisition gérée par un PC qui pilote les points de mesures de débit-pression.

Conformément à la norme EN NF 13829, la méthode de caractérisation expérimentale de l'étanchéité à l'air, consiste à mettre en dépression la cellule expérimentale et pour chaque différence de pression gérée par le ventilateur, on mesure le débit volumique d'infiltration d'air dans la cellule. On construit ainsi une courbe débit-pression ($Q = C \cdot dP^n$) caractéristique de la perméabilité de la cellule.

Par ailleurs, comme l'impose la norme EN NF 13829, les mesures de perméabilité ne sont valables que si le tirage thermique est faible et que les vitesses de vent sont faibles (inférieures à 2 m/s). Dans notre cas, les mesures ont eu lieu au moment où il n'y avait quasiment pas de vent (≈ 0 m/s) et le tirage thermique est faible. En effet, le produit de la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur par la hauteur de l'enveloppe de la maison est égal à 18,2 m.K ; ce qui est nettement inférieure à la valeur limite de 500 m.K de la norme.

Température intérieure	24.5 °C
Température extérieure	17 °C
Vitesse du vent	≈ 0 m/s

4. CARACTERISATION DE LA PERMEABILITE DE LA CELLULE EXPERIMENTALE

Les essais ont été réalisés le 26 février dans l'après-midi avec des conditions d'essais très favorables (absence de vent et peu de tirage thermique). Le dispositif de mesure de fausse porte a été installé au niveau des doubles portes de la cellule et étanché à l'aide d'un ruban adhésif de type toilé

Les dimensions du bâtiment ont été calculées à partir des plans et données fournis par le département DER. La maison en bois a ainsi une superficie de 24,3 m², un volume chauffé de 58,5 m³ et une surface d'enveloppe extérieure de 47,70 m² au sens de la Règlementation Thermique 2005.

Les plans et dimensions de cette maison sont donnés en annexe de ce rapport.

Nous avons donc pu réaliser une dizaine de points de mesures entre 15 et 60 Pa afin de tracer une courbe satisfaisante pour exploiter les données.

Résultats de mesures

Dp (Pa)	Q (m ³ /h)
17,4	21,6
18,7	22,4
23,4	26,4
29,5	31,1
36,9	37,4
38,2	38,1
43,2	41,8
49,0	45,4
53,3	48,4

A partir des points de mesures débit-pression ci-dessus présentés, on détermine l'équation caractéristique de la perméabilité déterminée par régression linéaire ainsi que le coefficient de corrélation.

La **Figure 3** présente la courbe débit-pression ($Q_v = C.dP^n$) caractéristique de la perméabilité de la maison expérimentale étudiée.

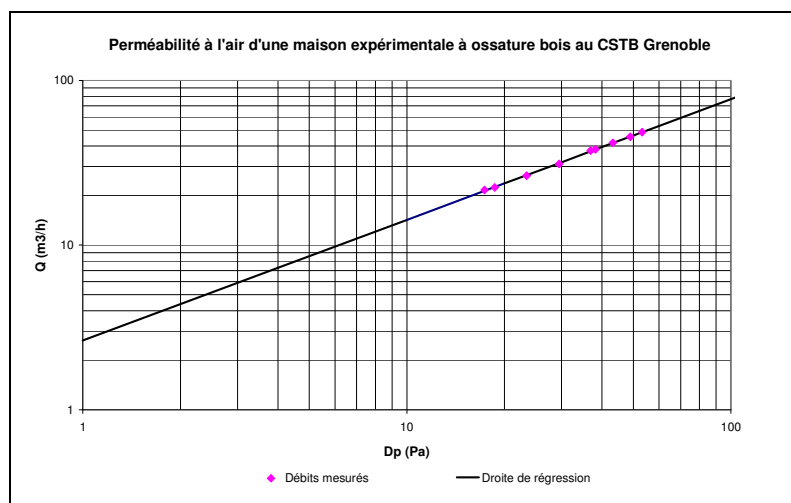


Figure 3 : Courbe débit-pression caractéristique de la cellule expérimentale en bois.

Les résultats de l'exploitation de la courbe sont présentés au **Tableau 1**.

Température intérieure	24.5 °C
Température extérieure	17 °C
Vitesse du vent	≈ 0 m/s
ΔP_0 (différence de pression à débit nul)	0,4 Pa
Expression de la perméabilité	$Q_{v_perméa} = 2.640.dP^{0.732}$
n	0.732
C	2.640
r : coefficient de corrélation	0.9997
$Q_{v_perméa}$ sous 4 Pa (m³/h)	7.3 m³/h
P sous 4 Pa (m³/h.m²)	0.15 m³/h.m²
P sous 50 Pa (m³/h.m²)	46.3 m³/h
n_{50} (renouvellement d'air sous 50 Pa)	0.79 vol/h

Tableau 1 : Valeurs de la perméabilité P et de l'indice n_{50} la maison ossature bois

On peut noter que le coefficient de corrélation r est très bon car très proche de 1. Cela montre que les conditions de mesures ont permis de bons résultats et une courbe régulière et homogène.

L'exposant n pente de la courbe de régression est de 0,732 ($2/3 < n < 1$).

On trouve un débit total de 7,3 m³/h. sous 4 Pa pour une surface d'enveloppe extérieure de 47.70 m², soit une perméabilité P de 0.15 m³/h.m² sous 4 Pa au sens de la RT 2005.

L'incertitude sur la mesure de débit est de $\pm 3 \%$ et celle sur la mesure de la pression différentielle est de ± 0.5 Pa.

A titre indicatif, on présente dans le tableau ci-dessous les valeurs de références de la RT 2005 et des labels Passivhaus et Minergie-P.

	Valeur référence RT2005 I4 (m3/h/m ²) sous 4 Pa	Exigence « passivhaus » et Minergie-P I4 (m3/h/m ²) sous 4 Pa
Logement individuel	0,8	0.16

On note ainsi qu'à ce stade de sa construction, la valeur de perméabilité de cette maison expérimentale est bien en dessous des exigences de la RT2005. Elle est plus proche des exigences données dans les labels passivhaus ou Minergie.

Ces résultats peuvent s'expliquer par l'absence de menuiseries, d'entrées d'air spécifiques et par une bonne réalisation globale de l'étanchéité.

Les imageries thermographies infrarouges ont permis de visualiser et localiser les défauts d'étanchéité de l'enveloppe de cette maison.

On observe ainsi que les défauts d'étanchéité à l'air sont principalement situés au niveau des jonctions entre les montants en bois et les parois verticales.

Les autres passages d'air sont situés au niveau des passages de câbles de mesures.

Les images de la **Figure 4** permettent d'illustrer l'infiltration de l'air ambiant extérieur à travers l'enveloppe (l'air extérieur est en couleur bleue, il est plus froid que l'air intérieur).

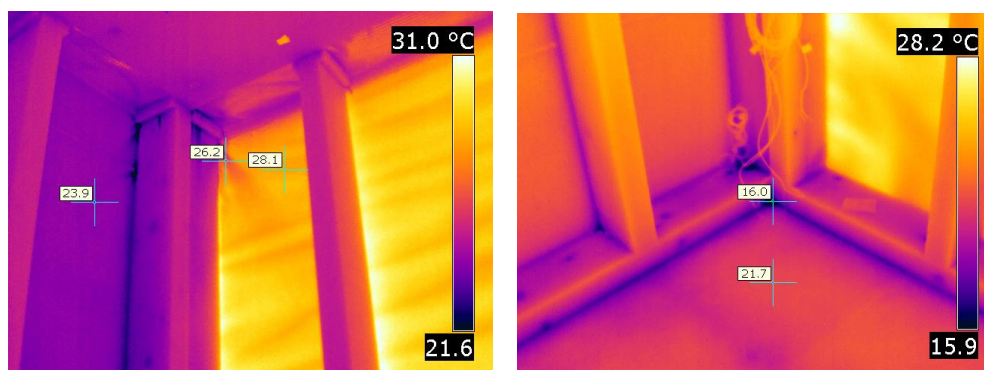


Figure 4 : Exemple de défauts d'étanchéité observés par thermographie infra rouge*

* Images extraites du rapport n° ESE/DE/AGE – 2008.012R « Images thermiques Maison à ossature bois » où sont expliqués de façon plus détaillée l'ensemble des défauts d'étanchéités.

Pour caractériser correctement l'étanchéité à l'air de cette maison expérimentale en bois, il est nécessaire, après son achèvement, de refaire les mesures de perméabilité. On entend par achèvement : isolation complète des parois verticales, installation des bardages extérieurs et installation du système de ventilation et des menuiseries.

**- Rapport généré par PerméscopePilot v1.0.6 -
Rapport de Dépressurisation :**

Données du logement :

Société / Client :

Adresse :

Type de logement :

Configuration :

Surface froide (m²) : 44.3

Volume Intérieur (en m³) : 50.7

Conditions de l'essai :

Nom de l'Opérateur :

Température Intérieure : 25°C

Remarques : Conditions d'essai normales.

Date : 10/07/2008

Extérieure : -- °C

Heure : 10:03:45

Pression Atmosphérique : -- Pa

Résultats de l'essai :

Coefficient de débit d'air : $C_{env} = 5.39$

m³/(h·Paⁿ)

Coefficient de fuite d'air : $C_L = 5.48$

m³/(h·Paⁿ)

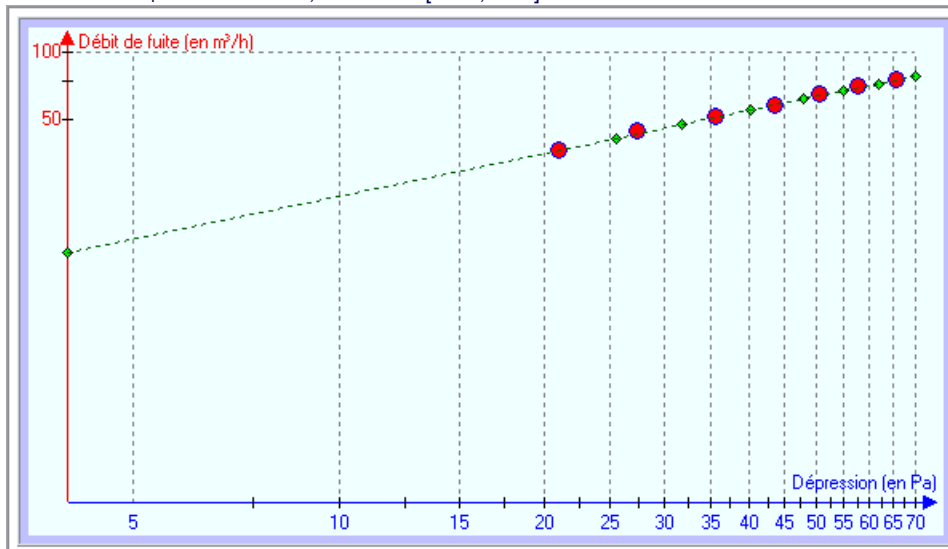
Caractéristique Débit = $f(\text{Pression}) : Q = 5.39 P^{0.63}$ (P en Pa et Q en m³/h)

Perméabilité sous 4 Pa : $I_4 = 0.29$ m³/h/m² ; Intervalle : [0.27 ; 0.32]

Exposant de débit d'air : $n = 0.63$

Taux de renouvellement d'air à 50Pa

: $n_{50} = 1.27$ h⁻¹



Référence à la norme NF EN 13829 : Cet essai est conforme.

Détails des mesures :

• Différences de Pression à Débit Nul (en Pa) :	Moyenne Positive	Moyenne Négative	Moyenne Générale
Avant l'essai :	5.0	0.0	5.0
Après l'essai :	4.0	0.0	4.0
• Pressions et Débits :	Pression Induite (en Pa)		Débit d'air (en m ³ /h)
Palier n° 1	21.0		37
Palier n° 2	27.4		45
Palier n° 3	35.7		52
Palier n° 4	43.4		58
Palier n° 5	50.5		65
Palier n° 6	57.5		71
Palier n° 7	65.5		76

Commentaires :

**- Rapport généré par PerméscopePilot v1.0.6 -
Rapport de Dépressurisation :**

Données du logement :

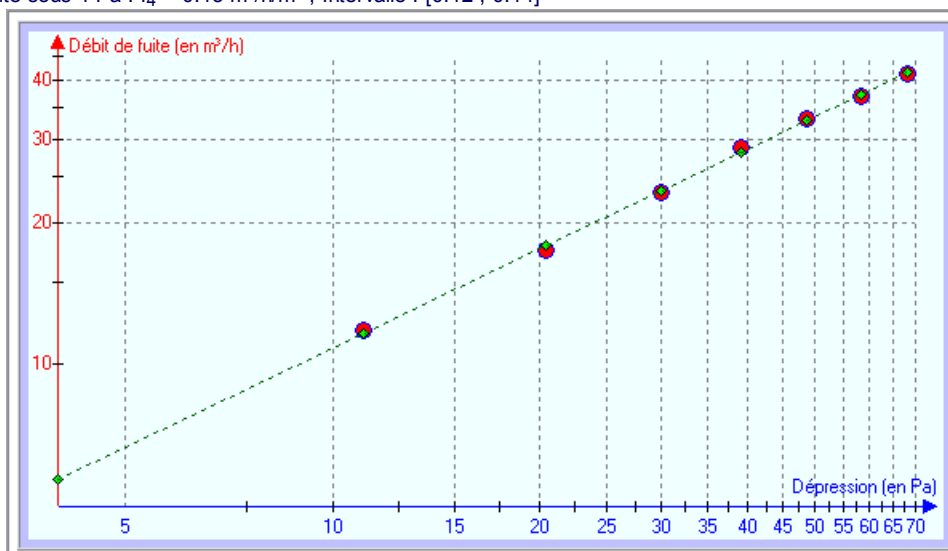
Société / Client :	Type de logement :
Adresse :	Configuration :
	Surface froide (m ²) : 44.3
	Volume Intérieur (en m ³) : 50.7

Conditions de l'essai :

Nom de l'Opérateur :	Date : 16/04/2009	Heure : 09:02:19
Température Intérieure : 20.7°C	Extérieure : -- °C	Pression Atmosphérique : -- Pa
Remarques :	<ul style="list-style-type: none"> • La mesure de la Différence de Pression à débit nul avant l'essai n'est pas valide. • La mesure de la Différence de Pression à débit nul après l'essai n'est pas valide. 	

Résultats de l'essai :

Coefficient de débit d'air : C _{env} = 2.16 m ³ /(h·Pa ⁿ)	Exposant de débit d'air : n = 0.70
Coefficient de fuite d'air : C _L = 2.19 m ³ /(h·Pa ⁿ)	Taux de renouvellement d'air à 50Pa : n ₅₀ = 0.67 h ⁻¹
Caractéristique Débit = f(Pression) : Q = 2.16 P ^{0.70} (P en Pa et Q en m ³ /h)	
Perméabilité sous 4 Pa : I ₄ = 0.13 m ³ /h/m ² ; Intervalle : [0.12 ; 0.14]	



Détails des mesures :

• Différences de Pression à Débit Nul (en Pa) :	Moyenne Positive	Moyenne Négative	Moyenne Générale
Avant l'essai :	--	--	--
Après l'essai :	--	--	--
• Pressions et Débits :	Pression Induite (en Pa)	Débit d'air (en m ³ /h)	
Palier n° 1	11.1	12	
Palier n° 2	20.4	18	
Palier n° 3	29.9	23	
Palier n° 4	39.1	29	
Palier n° 5	48.7	33	
Palier n° 6	58.3	37	
Palier n° 7	68.2	41	

Commentaires :

CSTB cellule test1

**- Rapport généré par PerméscopePilot v1.0.6 -
Rapport de Dépressurisation :**

Données du logement :

Société / Client :

Adresse :

Type de logement :

Configuration :

Surface froide (m²) : 44.3

Volume Intérieur (en m³) : 50.7

Conditions de l'essai :

Nom de l'Opérateur :

Température Intérieure : 21.6°C

Remarques : Conditions d'essai normales.

Date : 16/04/2009

Extérieure : -- °C

Heure : 09:23:15

Pression Atmosphérique : -- Pa

Résultats de l'essai :

Coefficient de débit d'air : C_{env} = 18.19

m³/(h·Paⁿ)

Coefficient de fuite d'air : C_L = 18.60

m³/(h·Paⁿ)

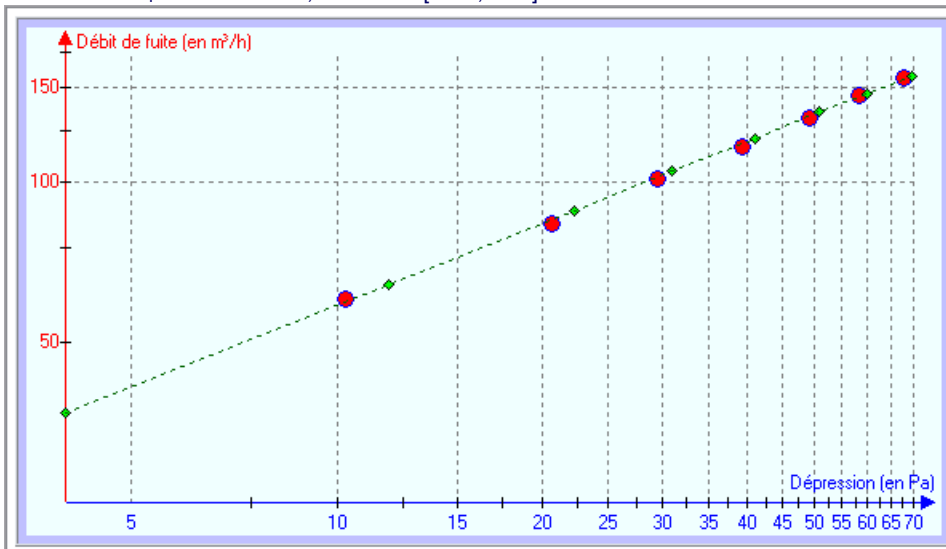
Caractéristique Débit = f(Pression) : Q = 18.19 P^{0.51} (P en Pa et Q en m³/h)

Perméabilité sous 4 Pa : I₄ = 0.83 m³/h/m² ; Intervalle : [0.80 ; 0.85]

Exposant de débit d'air : n = 0.51

Taux de renouvellement d'air à 50Pa

: n₅₀ = 2.70 h⁻¹



Référence à la norme NF EN 13829 : Cet essai est conforme.

Détails des mesures :

• Différences de Pression à Débit Nul (en Pa) :		Moyenne Positive	Moyenne Négative	Moyenne Générale
Avant l'essai :		1.8	0.0	1.8
Après l'essai :		1.3	0.0	1.3
• Pressions et Débits :		Pression Induite (en Pa)	Débit d'air (en m ³ /h)	
Palier n° 1		10.3	60	
Palier n° 2		20.6	84	
Palier n° 3		29.5	101	
Palier n° 4		39.4	117	
Palier n° 5		49.4	132	
Palier n° 6		58.3	145	
Palier n° 7		67.9	156	

Commentaires :

Annexe F

Conditions climatiques pour la période du 6 au 17 novembre 2008

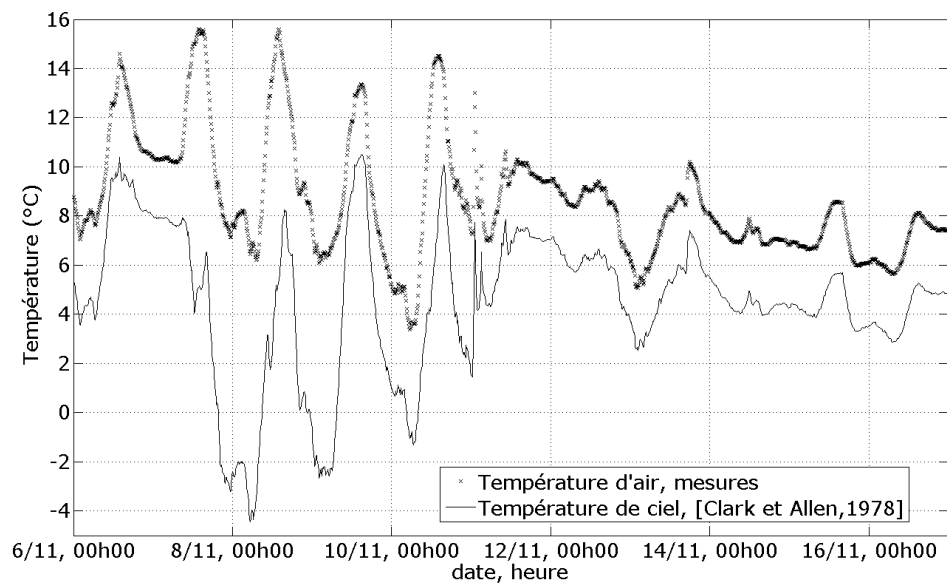


FIG. F.1 : Température d'air mesurée, et température de ciel calculée, du 6 au 17 novembre 2008

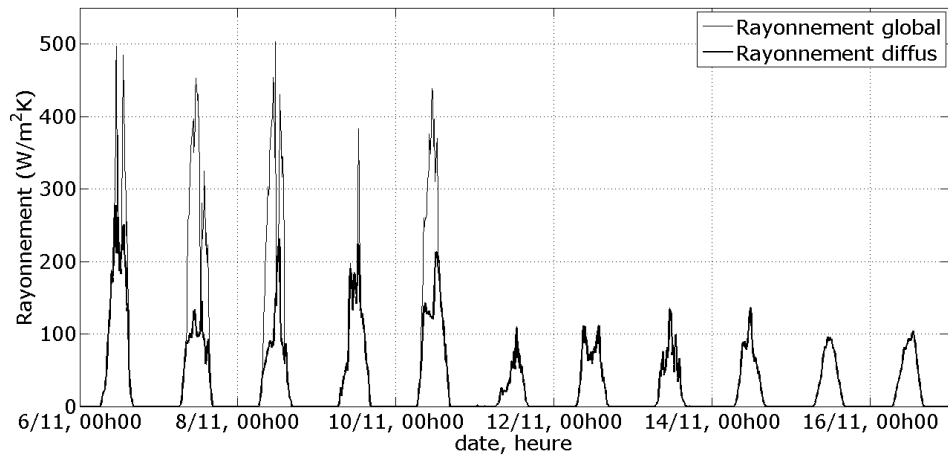


FIG. F.2 : Rayonnement solaire global et diffus mesurés sur une surface horizontale, du 6 au 17 novembre 2008

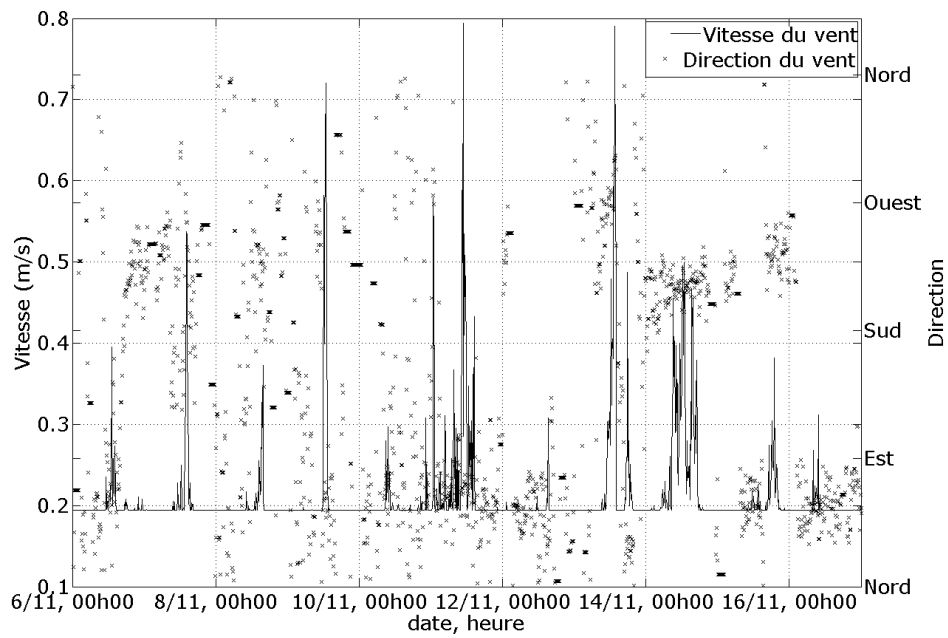


FIG. F.3 : Vitesse et direction du vent, du 6 au 17 novembre 2008

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : **PIOT**

DATE de SOUTENANCE : **9 novembre 2009**

Prénoms : **Amandine**

TITRE : **Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique**

NATURE : **Doctorat**

Numéro d'ordre : 2009-ISAL-0080

École doctorale : **MÉGA (Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique)**

Spécialité : **Génie civil**

Cote B.I.U. - Lyon

et

bis

CLASSE :

RÉSUMÉ : Les maisons à ossature bois sont des structures particulièrement sensibles aux flux d'air et d'humidité. Des études récentes ont montré que de telles sollicitations peuvent dégrader la qualité et la durabilité d'un bâtiment.

Après avoir décrit la physique des transferts couplés d'énergie et de masse, nous présentons le support expérimental de cette étude : une maison à ossature bois, de dimensions représentatives d'une construction réelle, qui a été construite sur une plateforme d'exposition en extérieur. Cette cellule expérimentale a été instrumentée afin d'étudier le comportement hygrothermique des parois et de la pièce principale. Les données météorologiques sont relevées sur le site même. Plusieurs configurations ont été étudiées dans le cadre de ces travaux : paroi avec et sans pare-vapeur ; climat interne avec ou sans chauffage, humidification ou ventilation. Des mesures de perméabilité à l'air de la cellule ont également été effectuées. Enfin, une campagne de détermination des caractéristiques des matériaux employés a été lancée.

En parallèle de cette expérimentation, un modèle numérique de la cellule a été développé, basé sur le modèle existant HAM-tools.

Le modèle est utilisé sur plusieurs séquences expérimentales. L'étude de la validité du modèle s'est faite par étapes : d'abord la paroi seule, puis couplée avec la zone, enfin le modèle de bardage. Nous présentons les résultats de la comparaison entre les mesures et les simulations numériques, et discutons de la validité du modèle et des limites imposées par l'expérimentation.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'effet de sollicitations thermiques sur le comportement hygrique d'une paroi comportant un matériau hygroscopique, et montré la capacité du modèle développé à le décrire.

MOTS-CLÉS : **Humidité - Chaleur - Transferts couplés - Bâtiment - Expérimentation - Modélisation - Bois**

Laboratoires de recherche : **CETHIL (Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008)**
CSTB - Division Caractérisation Physique des Matériaux, Grenoble

Directeurs de thèse: **Jean Brau, Monika Woloszyn**

Président de jury : **Christian Inard**

Composition du jury : **Jean Brau, Monika Woloszyn, Christian Inard, Vasco P. de Freitas, Hartwig M. Künzel, Daniel Quenard, Stéphane Hameury, Samira Kherrouf**