



HAL
open science

Chaleur – Humidité – Air dans les maisons à ossature bois : Expérimentation et modélisation

Matthieu Labat

► **To cite this version:**

Matthieu Labat. Chaleur – Humidité – Air dans les maisons à ossature bois : Expérimentation et modélisation. Autre [cond-mat.other]. INSA de Lyon, 2012. Français. NNT : 2012ISAL0115 . tel-00790809v2

HAL Id: tel-00790809

<https://theses.hal.science/tel-00790809v2>

Submitted on 31 May 2013

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

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

Année 2012

N° d'ordre 2012ISAL0115

Thèse

Chaleur – Humidité – Air dans les maisons à ossature bois Expérimentation et modélisation

Présentée devant
L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR

Par
MATTHIEU LABAT

Ecole doctorale MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE
Spécialité GENIE CIVIL

Pour être soutenue le : 21 Novembre 2012

Composition du Jury :

| | | |
|-------------------|--|---------------------|
| Jean-Jacques Roux | Professeur à l'INSA de Lyon | Directeur de thèse |
| Monika Woloszyn | Professeur à l'Univ. de Savoie | Directrice de thèse |
| Christian Inard | Professeur à l'Univ. de La Rochelle | Rapporteur |
| Gérard Jeandel | Professeur à l'Univ. de Lorraine | Rapporteur |
| Dominique Derome | Chef de div. matériaux poreux, EMPA (Suisse) | Examinatrice |
| Arnold Janssens | Professeur à l'Univ. de Gand (Belgique) | Examineur |
| Daniel Quenard | Chef de div. matériaux, CSTB | Examineur |
| Samira Kherrouf | Ingénieur ADEME | Membre invité |

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

Laboratoire d'accueil : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Grenoble

Ecoles doctorales – Quinquennal 2011-2015

| SIGLE | ECOLE DOCTORALE | NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE |
|-----------|---|---|
| CHIMIE | CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Insa : R. GOURDON | M. Jean Marc LANCELIN Université de Lyon – Collège Doctoral Bât ESCPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 directeur@edchimie-lyon.fr |
| E.E.A. | ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://edeea.ec-lyon.fr Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN eea@ec-lyon.fr | M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60 97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr |
| E2M2 | EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Insa : H. CHARLES | Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43.12.94 e2m2@biomserv.univ-lyon1.fr |
| EDISS | INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE http://ww2.ibcp.fr/ediss Sec : Safia AIT CHALAL Insa : M. LAGARDE | M. Didier REVEL Hôpital Louis Pradel Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69677 BRON Tél : 04.72.68 49 09 Fax : 04 72 35 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr |
| INFOMATHS | INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES http://infomaths.univ-lyon1.fr | M. Johannes KELLENDONK Université Claude Bernard Lyon 1 INFOMATHS Bâtiment Braconnier 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 44.82.94 Fax 04 72 43 16 87 infomaths@univ-lyon1.fr |
| Matériaux | MATERIAUX DE LYON Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry Ed.materiaux@insa-lyon.fr | M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr |
| MEGA | MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry mega@insa-lyon.fr | M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr |
| ScSo | ScSo* M. OBADIA Lionel Sec : Viviane POLSINELLI Insa : J.Y. TOUSSAINT | M. OBADIA Lionel Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.69.72.76 Fax : 04.37.28.04.48 Lionel.Obadia@univ-lyon2.fr |

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

Résumé

L'évolution actuelle des exigences en termes de performance énergétique des bâtiments a fait apparaître de nouveaux enjeux et problématiques scientifiques, dont ceux liés à l'humidité. Cette étude s'appuie sur une cellule expérimentale construite sur la technologie des maisons à ossature bois et soumise aux conditions climatiques réelles de Grenoble. L'instrumentation de ce bâtiment et le suivi de l'évolution en température et en humidité dans les différentes couches de l'enveloppe permettent de définir des séquences nécessaires à la validation de modèles numériques.

Dans cet objectif, un modèle existant nommé HAM-Tools a été utilisé pour simuler les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à l'échelle du bâtiment. La démarche de validation a été décomposée en plusieurs étapes, de manière à cibler des transferts spécifiques et d'en améliorer la modélisation. Ces études localisées concernent les transferts couplés de chaleur et de masse à travers les parois solides, la modélisation des transferts de chaleur à travers une lame d'air ventilée et enfin la modélisation du renouvellement de l'air intérieur en conditions naturelles. Pour estimer la précision globale du modèle, c'est-à-dire à l'échelle du bâtiment, une séquence expérimentale a été simulée en prenant en compte l'ensemble des transferts couplés simultanément.

Les performances du modèle sont discutées à partir des mesures locales, c'est-à-dire dans les parois, puis globales. La bonne concordance entre mesures et résultats de simulation permet de conclure sur la validité et la généralité de la démarche mise en œuvre et les hypothèses de simulation. Plus particulièrement, il est apparu que l'outil de modélisation permet de prédire correctement le comportement moyen des parois en humidité et en température. Il est donc envisageable de l'utiliser pour simuler et estimer l'impact des constituants des parois en termes de durabilité, de performances énergétiques et de confort de l'occupant.

Mots clés

Transferts couplés, modélisation, expérimentation, matériaux hygroscopiques, lame d'air ventilée, renouvellement d'air.

Abstract

Heat, Air and Moisture coupled transfers in wooden frame houses, experimental investigations and numerical modelling

As energy saving is so important in buildings nowadays, envelopes performances have to be more efficient and have to deal with more obligations, such as moisture accumulation and mould growth. This study relies on an experimental wooden frame house exposed to the natural conditions of Grenoble, France. It has been widely instrumented so the wall's temperature and humidity is monitored at different depths. As a consequence, complete dataset are available and can be used to validate numerical model.

In this work, an existing numerical model named HAM-Tolls has been used to simulate the heat, air and moisture coupled transfers at the building scale. The method developed here consists in validating the numerical model step by step, with studying specific transfers separately. The first step deals with heat and mass transfers across the walls. Then, the heat transfers across a ventilated air gap and the air change rate under natural conditions have been studied much in detail. The final step of this works consists in simulating simultaneously every transfer at the building scale.

This latest simulation's results were compared both on a local and on a global point of view with the measurements. As they were found to be in good agreement, this allows concluding on the methodology efficiency, the validity of the modelling assumption and gives good hope with extending this methodology to other studies. Specifically, the simulation tool is able to predict correctly the average temperature and humidity content within the walls. Therefore, it should be suitable with estimating the wall components influence on the wall durability, its energy efficiency and its impact on the occupant's thermal comfort.

Keywords

Coupled transfers, numerical modelling, experimental investigations, hygroscopic materials, ventilated air gap, air change rate.

Remerciements

Ce travail a été préparé au sein du Centre de Thermique de Lyon (CETHIL) ainsi qu'au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) de Grenoble et a bénéficié du soutien de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Tout d'abord, je souhaite remercier Mme Dany Escudié et M. Daniel Quenard de m'avoir accueilli au sein du CETHIL et du CSTB et de m'avoir permis de soutenir ce travail. Merci également à M. Christian Inard et M. Gérard Jeandel d'avoir accepté de participer au jury de thèse en la qualité de rapporteurs.

Je tiens à remercier chaleureusement mes deux directeurs de thèse, Jean-Jacques Roux et Monika Woloszyn pour m'avoir encadré et conseillé tout au long de ces trois années. Votre aide et votre expérience m'ont été d'un grand secours, et je ne commence qu'à en saisir la mesure. Sur le site du CSTB en particulier, mais également depuis Lyon, j'ai pu compter sur le soutien de Claude Pompéo et Géraldine Garnier qui ont suivi ce travail dans toute sa durée et participé activement aux comités de pilotage de cette thèse. Enfin, je remercie Samira Kherrouf d'avoir suivi l'évolution de ce travail et d'avoir participé à l'amélioration de sa qualité.

A de très nombreuses reprises, j'ai pu compter sur mes collègues, dont les compétences et l'engagement m'ont permis de progresser significativement. Plus spécifiquement, j'ai bénéficié du savoir de Gilles Rusaouën en matière de CFD, de François-Dominique Menneteau en tout ce qui concerne l'instrumentation et d'Hébert Sallée pour ce qui est des techniques d'acquisition. J'ai également pu compter sur les bras de Matthieu, Lucas, Marion et Clément, ce que j'ai particulièrement apprécié. Il me faudrait également mentionner un très grand nombre d'universitaires, doctorants et stagiaires qui m'ont épaulé dans la découverte sans fin du savoir, disséminé dans les nombreux domaines des sciences et techniques. Dans ce grand nombre, je ne peux m'empêcher de citer ceux dont je fus proche, simplement de par la taille des bureaux : Mathias, Serge, Laëtitia, Gilles, Olivier et Matthieu, combien de temps serais-je demeuré dans le doute en votre absence ? Enfin, l'expérience sur des sujets similaires d'Amandine Piot et d'Adrien Brun m'a apporté tout ce dont j'avais besoin au début et au cours de ce travail.

Si les questions scientifiques ont constitué le noyau de mes préoccupations, c'est parce que la qualité du travail des secrétaires du CETHIL, du CSTB et de l'ADEME ne m'a pas laissé le temps de me consacrer à des questions plus pratiques. Sans la méticulosité et la patience de Christine, Florence, Agnès et Marie-Laure, cette expérience me serait très certainement apparue sous un jour moins agréable.

Je garde un très bon souvenir de ces trois années grâce à celles et ceux qui m'ont permis de vivre une expérience aussi intéressante professionnellement que personnellement, et ce grâce à un

entraînement régulier de mes zygomatiques. Jérémie, Nicolas, Anica, Pierre, Anthony et Gauthier, vous êtes les premiers auxquels je pense. Je n'aurais jamais vécu Grenoble de cette façon sans vous. Vincent, Pierre, Rémi, Aurélien et Alex, vous aurez tellement fait hurler les décibels que j'en raisonne encore.

Il m'est impensable de terminer ces remerciements sans une pensée pour ma famille qui m'accompagne et me soutient dans la vie de tous les jours comme dans mes études, et ce depuis un plus d'un quart de siècle déjà. A Hélène enfin, qui partage mon quotidien, mes doutes et mes joies, mes convictions et mes choix, tu ne seras pas surprise si je garde cette dernière ligne pour la musique qui m'accompagne depuis le début de ce travail.

[...]

We will see our children growing.

Gojira – Global Warming (From Mars to Sirius)

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Ecoles doctorales – Quinquennal 2011-2015 | i |
| Résumé..... | iii |
| Abstract..... | v |
| Remerciements..... | vii |
| Table des matières..... | ix |
| Table des figures..... | xii |
| Liste des Tableaux | xvii |
| Nomenclature | xix |
| Introduction | 1 |
| A Généralités | 1 |
| B Contexte scientifique | 2 |
| B.1 Etudes internationales..... | 2 |
| B.2 Positionnement de ce travail | 5 |
| C Problématique et démarche générale | 6 |
| C.1 Etudes nationales..... | 6 |
| C.2 Description générale du support expérimental | 7 |
| C.3 Choix d'un outil de modélisation | 9 |
| C.4 Principe de la démarche : décomposition des transferts | 11 |
| Chapitre I Transferts couplés de chaleur et de masse dans les parois de l'enveloppe | 13 |
| A Définition de la problématique | 13 |
| A.1 Transferts de chaleur et de masse dans les matériaux | 13 |
| A.2 Validation à partir de l'expérimentation | 16 |
| B Présentation détaillée du support | 17 |
| B.1 Configurations des parois et séquences expérimentales..... | 17 |
| B.2 Propriétés des matériaux..... | 18 |
| B.3 Instrumentation de la cellule | 22 |
| B.4 Station météo | 24 |
| C Comparaison des configurations de paroi | 25 |
| C.1 Séquences expérimentales | 25 |

| | | |
|--|---|-----------|
| C.2 | Eléments de comparaison | 26 |
| C.3 | Identification des périodes de régime pseudo-stationnaire | 28 |
| C.4 | Résultats : déphasage thermique | 30 |
| C.5 | Résultats : résistances thermiques..... | 31 |
| C.6 | Discussion | 33 |
| D | Simulation des transferts couplés | 33 |
| D.1 | Modélisation d'une paroi dans HAM-Tools..... | 34 |
| D.2 | Simulation sur une séquence sans génération de vapeur | 36 |
| D.3 | Simulation d'une séquence avec génération de vapeur | 38 |
| D.4 | Discussion | 40 |
| D.5 | Retour sur le calcul de la résistance thermique apparente | 42 |
| E | Synthèse | 43 |
| Chapitre II Modélisation des transferts dans la lame d'air ventilée | | 45 |
| A | Définition de la problématique | 45 |
| B | Caractérisation expérimentale..... | 48 |
| B.1 | Un premier outil, la thermographie infrarouge..... | 48 |
| B.2 | Mesures de la température de surface du bardage..... | 49 |
| B.3 | Un outil numérique, la simulation CFD..... | 51 |
| B.4 | Allure générale de l'écoulement dans la lame d'air | 53 |
| C | Campagne expérimentale de référence..... | 55 |
| C.1 | Instrumentation du bardage | 55 |
| C.2 | Mesure de la vitesse d'air dans la lame d'air | 56 |
| D | Modélisation du bardage | 57 |
| D.1 | Principe général du modèle | 58 |
| D.2 | Transferts de masse | 60 |
| D.3 | Identification des paramètres de transferts de masse..... | 62 |
| D.4 | Transferts radiatifs..... | 63 |
| D.5 | Transferts convectifs..... | 64 |
| D.6 | Identification de la valeur du paramètre Ω | 65 |
| E | Résultats et discussion | 66 |
| E.1 | Séquence de référence | 66 |
| E.2 | Autres séquences expérimentales..... | 68 |
| F | Synthèse | 69 |
| Chapitre III Caractérisation du renouvellement d'air de la cellule..... | | 71 |
| A | Définition de la problématique | 71 |
| A.1 | Renouvellement d'air en conditions naturelles | 71 |
| A.2 | Bilan en vapeur d'eau et rôle du renouvellement d'air | 72 |
| B | Transferts d'air à l'échelle du bâtiment | 75 |
| B.1 | Perméabilité de l'enveloppe | 75 |
| B.2 | Répartition des débits d'air | 78 |
| B.3 | Estimation des pressions motrices en conditions naturelles..... | 79 |
| B.4 | Paramètres à identifier | 82 |
| C | Mesures du renouvellement d'air..... | 83 |

| | | |
|---|--|-----------|
| C.1 | Choix du gaz traceur et de la méthode de mesure | 83 |
| C.2 | Instrumentation et protocole expérimental | 86 |
| C.3 | Analyse globale des mesures..... | 87 |
| D | Modélisation des transferts d'air | 90 |
| D.1 | Identification des paramètres du modèle | 90 |
| D.2 | Performances du modèle..... | 90 |
| D.3 | Discussion sur la prise en compte des effets du vent | 92 |
| E | Synthèse | 95 |
| Chapitre IV Simulation des transferts couplés à l'échelle du bâtiment..... | | 96 |
| A | Présentation de la séquence expérimentale | 97 |
| B | Confrontation des résultats de la simulation avec les mesures..... | 101 |
| B.1 | Température dans les parois verticales de l'enveloppe | 101 |
| B.2 | Transfert d'énergie à travers les parois verticales | 103 |
| B.3 | Bilan de chaleur à l'échelle de la cellule | 104 |
| B.4 | Humidité dans les parois verticales de l'enveloppe..... | 107 |
| B.5 | Humidité de l'air intérieur et renouvellement d'air | 108 |
| B.6 | Bilan en humidité | 109 |
| C | Discussion générale et ouverture | 111 |
| D | Synthèse | 114 |
| Conclusion générale et perspectives | | 115 |
| Bibliographie | | 119 |
| Annexe 1 : Rapport d'essai, test d'un thermo-hygromètre en étuve..... | | 127 |
| Annexe 2 : Comparaison des mesures de vent faites aux deux stations météo..... | | 129 |
| Annexe 3 : Simulation des transferts couplés dans les parois verticales, séquence 5 | | 131 |
| Annexe 4 : Mesures par thermographie IR..... | | 133 |
| Annexe 5 : Mesures dans la lame d'air | | 137 |
| Annexe 6 : Température de l'environnement..... | | 141 |
| Annexe 7 : Confrontation du modèle de lame d'air avec les mesures..... | | 143 |
| Annexe 8 : Validation de la méthode de mesure par gaz traceur | | 145 |
| Annexe 9 : Identification des paramètres du modèle aéraulique..... | | 149 |
| Annexe 10 : Etude de sensibilité locale | | 152 |

Table des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Plan en élévation de la cellule (fourni par l'entreprise de construction)..... | 8 |
| Figure 2 : Schéma en coupe de la partie courante d'une paroi verticale | 8 |
| Figure 3 : Vue de l'angle Nord-Ouest de la cellule test à la fin de sa construction en 2008 (gauche) et en 2012 (droite)..... | 9 |
| Figure 4 : Exemple d'écran principal dans HAM-Tools pour la simulation d'un bâtiment comportant 6 parois, 1 porte, 1 volume d'air, des systèmes de chauffage et d'humidification, ventilation et infiltrations d'air et prise en compte des conditions météorologiques..... | 11 |
| Figure 5 : Forme générale de la courbe de sorption d'un matériau hygroscopique | 14 |
| Figure 6 : Schéma récapitulatif des différentes configurations de paroi étudiées | 18 |
| Figure 7 : Comparaison des courbes de sorption (teneur massique à gauche, taux d'humidité à droite) pour les différents matériaux utilisés dans la cellule..... | 20 |
| Figure 8 : Face ouest de la cellule une fois la partie supérieure du bardage démontée (gauche) et identification de la surface utilisée pour la mesure d'absorptivité (droite) | 21 |
| Figure 9 : Schémas de positionnement des capteurs dans la partie courante de la paroi Est à mi-hauteur (gauche) et lorsqu'un pare-vapeur est installé (droite)..... | 23 |
| Figure 10 : Température de surface de la paroi Ouest et densité de flux de chaleur mesurées avec la configuration 1 (gauche) avec la configuration 3 (droite)..... | 26 |
| Figure 11 : Estimation du déphasage thermique à partir des mesures de température dans la paroi Ouest, cas du 23/30/10 (configuration 4)..... | 27 |
| Figure 12 : Identification de la période de faible humidité pour le cas de la configuration 3, mesures de température (gauche) et d'humidité absolue (droite) | 29 |
| Figure 13 : Identification des mesures intégrées de température (gauche) et d'humidité absolue (droite), cas de la configuration 3 pour un taux d'humidité élevé..... | 29 |
| Figure 14 : Maillage d'une paroi verticale courante et rappel de la position des capteurs | 35 |
| Figure 15 : Identification des conditions limites de la simulation..... | 36 |
| Figure 16 : Comparaison des températures mesurées (traits pleins colorés) et simulées (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4..... | 37 |
| Figure 17 : Comparaison de l'humidité absolue de l'air mesurée (traits pleins colorés) et simulée (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4..... | 37 |
| Figure 18 : Comparaison de la température mesurée (traits pleins colorés) et simulée (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4..... | 39 |
| Figure 19 : Comparaison de l'humidité absolue de l'air mesurée (traits pleins colorés) et simulée (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4..... | 39 |
| Figure 20 : Comparaison du flux de vapeur au point 2 de la paroi Ouest avec la variation de masse (gauche) et comparaison du flux de chaleur conductif avec la variation de masse (droite) pour la configuration 4, du 12/03 au 21/03/2012 | 42 |
| Figure 21 : Densité de puissance du rayonnement solaire reçu par la face Est de la cellule (gauche) et vitesse du vent mesurée à une altitude de 10 m (droite)..... | 46 |

| | |
|---|----|
| Figure 22 : Schéma de la paroi courante (gauche) et photographie de l'angle Sud-Ouest prise durant la construction de la cellule, la face Sud seule étant équipée d'un bardage à cette étape des travaux (droite)..... | 47 |
| Figure 23 : Scotch noir et la feuille d'aluminium permettant d'estimer respectivement l'émissivité des lames et la température de l'environnement..... | 49 |
| Figure 24 : Evolution de la température de surface du bardage pour quelques hauteurs relatives (gauche) et sélection de profils de température (droite). Mesures du 16/08/2011..... | 50 |
| Figure 25 : Clichés infrarouges de la face Sud pris à 7h40 (gauche), 9h40 (centre) et 11h40 (droite). L'échelle de température est commune aux trois clichés et comprise entre 26 et 46°C..... | 51 |
| Figure 26 : Identification des différents domaines représentés (gauche), des conditions limites appliquées (centre) et du maillage d'une lame du bardage et du domaine fluide qui l'entoure (droite)..... | 53 |
| Figure 27 : Iso-vitesses pour une hauteur relative $z^* = 0,11$ (gauche, échelle de 0 à 0,3 m.s ⁻¹), $z^* = 0,50$ (centre, échelle de 0 à 0,8 m.s ⁻¹) et $z^* = 0,91$ (droite, échelle de 0 à 0,8 m.s ⁻¹)..... | 54 |
| Figure 28 : Profils de vitesse verticale pour quelques hauteurs relatives (gauche) et vitesse horizontale de l'air entre chaque lame (droite, une valeur négative indique un débit d'air entrant dans la lame d'air, une valeur positive un débit sortant)..... | 54 |
| Figure 29 : Comparaison des mesures de vitesse faites aux positions 1 et 3 (gauche, 18/08/2011) et aux positions 2 et 3 (droite, 11/08/2011)..... | 56 |
| Figure 30 : Comparaison des mesures de vitesse faites aux positions 4 et 3 (gauche, 09/08/2011) et aux positions 5 et 3 (droite, 16/08/2011 – la fréquence d'acquisition est de 10 minutes)..... | 57 |
| Figure 31 : Principe du modèle 1D initial (gauche) et du modèle « 1D et un demi » (droite)..... | 58 |
| Figure 32 : Schéma du bilan de masse dans la lame d'air (gauche) et des transferts de chaleur dans la lame d'air (droite)..... | 59 |
| Figure 33 : Schéma des transferts de chaleur au niveau de la surface extérieure du bardage..... | 60 |
| Figure 34 : Mesures de vitesse faites à la position 3 en fonction de l'écart de température entre la lame d'air et l'air extérieur (gauche) et schéma de principe de répartition des débits horizontaux..... | 61 |
| Figure 35 : Comparaison de la corrélation sur la vitesse d'air avec les mesures faites par les capteurs aux positions 1 (gauche), 5 (droite) et 3 (deux graphes)..... | 63 |
| Figure 36 : Schéma de la décomposition de la paroi en tranches (gauche) et comparaison des mesures de température sur le pare-pluie avec les résultats de la simulation au niveau de la tranche n°4 pour $\Omega = 0,5$ et $\Omega = 0,8$ (droite)..... | 66 |
| Figure 37 : Comparaison des énergies reçues et cédées par la paroi en imposant la mesure de température du pare-pluie avec les résultats obtenus en utilisant le modèle initial et ajusté..... | 67 |
| Figure 38 : Comparaison des évolutions de température (gauche) et des flux échangés (droite) pour le cas de la paroi Ouest en été..... | 68 |
| Figure 39 : Comparaison des évolutions de température (gauche) et des flux échangés (droite) pour le cas de la paroi Est en hiver..... | 68 |
| Figure 40 : Composition de la paroi et position de capteurs (gauche) et évolution de l'humidité absolue pour la séquence expérimentale du 05/02 au 13/02 – les barres verticales délimitent la période de génération de vapeur (droite)..... | 73 |
| Figure 41 : Comparaison de l'humidité absolue de l'air intérieur mesurée et simulée avec HAM-Tools en négligeant le renouvellement d'air (courbe RA=0)..... | 74 |
| Figure 42 : Comparaison de l'humidité absolue de l'air intérieur mesurée et simulée avec HAM-Tools pour plusieurs renouvellements d'air constants (RA) pour la séquence expérimentale de février 2012 (gauche) et de mai 2009 (droite)..... | 75 |
| Figure 43 : Photo de la Porte Soufflante (gauche) et du Perméoscope® (droite)..... | 76 |

| | |
|--|-----|
| Figure 44 : Schéma de principe de la mesure réalisée avec le Perméascope® (gauche) et avec la Porte Soufflante (droite), laine de verre, pas de pare-vapeur..... | 79 |
| Figure 45 : Schéma de principe des deux mesures réalisées avec le Perméascope® (configuration de paroi : ouate de cellulose, pare-vapeur)..... | 79 |
| Figure 46 : Evolution du ratio v_z / v_{10} en fonction de l'altitude z pour les différents coefficients de terrain présentés dans le Tableau 21. | 81 |
| Figure 47 : Schéma de principe du calcul du renouvellement d'air dans HAM-Tools | 82 |
| Figure 48 : Schémas présentant les difficultés rencontrées pour définir les effets du vent à une position particulière (gauche) et le tirage thermique pour une surface (droite)..... | 83 |
| Figure 49 : Schéma des différents composants du dispositif expérimental (gauche), photo de l'analyseur et du raccordement aux tubes prélevant l'air dans la cellule (droite) | 87 |
| Figure 50 : Comparaison du débit moyen mesuré avec l'écart de température (gauche) et évolution de la concentration intérieure (droite) pour des expériences avec de faibles vitesses de vent..... | 89 |
| Figure 51 : Evolution de la concentration intérieure (gauche) et vitesse du vent mesurée à la station météorologique (droite) pour trois expériences..... | 89 |
| Figure 52 : Comparaison des décroissances mesurées et simulées (gauche) et des débits horaires (droite) pour les expériences N°1 et 2..... | 92 |
| Figure 53 : Photo de la face Ouest de la cellule (gauche) et zoom sur la position de la bouche d'aération (droite) | 93 |
| Figure 54 : Comparaison des valeurs des coefficients C_p proposées dans (Sharag-Eldin 07) (voir Tableau 20) et (Hagentoft 01)..... | 94 |
| Figure 55 : Température et humidité relative de l'air extérieur (gauche) et apports solaires calculés pour chacune des différentes faces verticales (droite)..... | 97 |
| Figure 56 : Rose des vents obtenue à partir des mesures faites lors de la séquence expérimentale | 98 |
| Figure 57 : Evolution de la température et de l'humidité relative de l'air intérieur (gauche) et de la masse d'eau contenue dans le générateur de vapeur (droite) | 98 |
| Figure 58 : Mesure de température (gauche) et d'humidité absolue (droite) à l'interface parement intérieur / air intérieur pour chaque paroi verticale..... | 99 |
| Figure 59 : Mesure de température (gauche) et d'humidité absolue (droite) à l'interface pare-vapeur / isolant pour chaque paroi verticale..... | 99 |
| Figure 60 : Mesure de température (gauche) et d'humidité absolue (droite) à l'interface isolant / parement extérieur pour chaque paroi verticale..... | 99 |
| Figure 61 : Mesure du flux de chaleur traversant les différentes parois de la cellule (gauche) et répartition du flux journalier moyen (droite) | 100 |
| Figure 62 : Comparaison des mesures de températures avec les résultats de la simulation pour la paroi Est (gauche) et Ouest (droite) | 102 |
| Figure 63 : Comparaison des mesures de températures avec les résultats de la simulation pour la paroi Sud (gauche) et Nord (droite) | 102 |
| Figure 64 : Comparaison de l'énergie cédée par chaque paroi verticale pour chaque journée de la séquence expérimentale..... | 103 |
| Figure 65 : Comparaison des termes du bilan de chaleur (Eq. 45) appliqué à la séquence expérimentale de février 2012 | 105 |
| Figure 66 : Comparaison des mesures d'humidité absolue avec les résultats de la simulation pour la paroi Est (gauche) et Ouest (droite) | 107 |

| | |
|--|-----|
| Figure 67 : Comparaison des mesures d'humidité absolue avec les résultats de la simulation pour la paroi Sud (gauche) et Nord (droite) | 107 |
| Figure 68 : Comparaison des mesures d'humidité de l'air intérieur avec les résultats de la simulation (gauche) et calcul du renouvellement d'air de la cellule (droite) | 108 |
| Figure 69 : Comparaison des termes du bilan de vapeur (Eq. 58) appliqué à la séquence expérimentale de février 2012 (gauche) et décomposition des débits de vapeur en fonction des différentes parois étudiées (droite) | 110 |
| Figure 70 : Evolution simulée de l'humidité relative des deux côtés des parements verticaux en plâtre et du plancher en OSB | 111 |
| Figure 71 : Comparaison de la mesure d'humidité relative effectuée par le thermo-hygromètre prélevé sur la cellule (Capteur Test) avec une sonde de référence (Capteur Ref) pour différentes consignes en humidité relative et en température..... | 128 |
| Figure 72 : Vue du site, orientation Est et positionnement des deux capteurs de mesure du vent en rouge (gauche) et schéma de la disposition des cellules (droite) | 129 |
| Figure 73 : Mesures du vent du 14/07 au 15/07/2011 à la station météo (gauche, échelle de 0 à 5 m.s ⁻¹) et sur le mât (droite, échelle de 0 à 11 m.s ⁻¹) | 130 |
| Figure 74 : Mesures du vent du 14/07 au 15/08/2011 à la station météo (gauche, échelle de 0 à 5,5 m.s ⁻¹) et sur le mât (droite, échelle de 0 à 14 m.s ⁻¹)..... | 130 |
| Figure 75 : Comparaison de la température mesurée (traits pleins colorés) et simulée (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4..... | 131 |
| Figure 76 : Comparaison de l'humidité absolue de l'air mesurée (traits pleins colorés) et simulée (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4..... | 131 |
| Figure 77 : Evolution de la température (échelle gauche) et de l'humidité relative (échelle droite) au cours des expériences du 07/08 (graphique gauche) et du 08/07 (graphique droite)..... | 135 |
| Figure 78 : Evolution des densités de puissance du rayonnement solaire (échelle gauche) et de la vitesse du vent (échelle droite) lors des expériences du 07/07 (graphique gauche) et du 08/07 (graphique droite) | 135 |
| Figure 79 : Mesure de la température de quelques lames du bardage (gauche) et profils de température (droite), expérience du 07/08 | 136 |
| Figure 80 : Mesure de la température de quelques lames du bardage (gauche) et profils de température (droite), expérience du 08/07 | 136 |
| Figure 81 : Mesures de température à différentes hauteurs du pare-pluie le 16/08/2011 (gauche) et mesures par thermographie de la température de la surface extérieure aux mêmes altitudes et au même moment (droite) | 138 |
| Figure 82 : Schéma des éléments de support du bardage (jaune) et position des orifices (sonde mobile en rouge et sonde fixe en vert) pour la mesure de la vitesse d'air (échelle respectée) | 139 |
| Figure 83 : Sondes de vitesse montées sur la lame 24 avec leur bride de fixation (gauche), schéma du montage de la sonde (centre), bouchon de liège obturant un orifice (droite) | 140 |
| Figure 84 : Comparaison des températures (gauche) et vitesse d'air (droite) mesurées par les deux anémomètres | 140 |
| Figure 85 : Photo d'un thermocouple collé sur le bitume et positionnement des capteurs par rapport à la paroi (points rouges sur la photo de droite) | 141 |
| Figure 86 : Mesure de la température du bitume à différentes distances de la face Est pendant la journée du 07/04/2011 (gauche) et comparaison avec la corrélation (droite) | 142 |
| Figure 87 : Mesure de la température de l'environnement à différentes hauteurs relatives de la face Est le 16/08/2011 (gauche) et comparaison avec la température calculée à partir de la corrélation Eq. 40 (droite)..... | 142 |

| | |
|---|-----|
| Figure 88 : Comparaison de la température de la surface extérieure du bardage de la face Est simulée avec les mesures réalisées par thermographie infrarouge à une même altitude ($z^*= 0,33$) le 05/08/2011 (gauche) et le 09/08/2011 (droite)..... | 143 |
| Figure 89 : Comparaison de la température de la surface extérieure du bardage de la face Est simulée avec les mesures réalisées par thermographie infrarouge à une même altitude ($z^*= 0,33$) le 11/08/2011 (gauche) et le 16/08/2011 (droite) | 143 |
| Figure 90 : Comparaison de la vitesse simulée de la lame d'air de la face Est au niveau de l'axe neutre avec les mesures réalisées par un thermo-anémomètre à une même altitude ($z^*= 0,55$) du 04/08 au 05/08 (gauche) et le 09/08/2011 (droite)..... | 144 |
| Figure 91 : Comparaison de la vitesse simulée de la lame d'air de la face Est au niveau de l'axe neutre avec les mesures réalisées par un thermo-anémomètre à une même altitude ($z^*= 0,55$) le 11/08 (gauche) et du 13/08 au 16/08 (droite)..... | 144 |
| Figure 92 : Mesures de la décroissance le 04/01/2011 avec 4 ventilateurs activés à pleine puissance et le 26/01/2011 avec un seul ventilateur à vitesse minimale | 145 |
| Figure 93 : Evolution de l'humidité relative de l'air intérieur (gauche) et évolution de la mesure de l'analyseur lors d'une montée en humidité relative (droite)..... | 146 |
| Figure 94 : Comparaison des décroissances mesurées avec la bouche d'aération ouverte et fermée (gauche) et des différences de masse volumique (droite) | 147 |
| Figure 95 : Evolution de la concentration extérieure, du 22/09 au 01/10 avec différentes échelles (gauche [400 ; 600] ppm, droite [0 ; 10 000] ppm)..... | 147 |
| Figure 96 : Ecart moyen sur la décroissance (gauche) et sur le débit horaire (droite) pour différentes combinaisons des paramètres $\{a_T, k_T\}$, $Z_{Th,Mur}$ et $Z_{Th,Porte}$ | 150 |
| Figure 97 : Comparaison des indices de sensibilité des différents paramètres de l'étude..... | 153 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Propriétés thermiques moyennes des matériaux secs à 23°C | 19 |
| Tableau 2 : Propriétés thermo-hygriques des matériaux installés dans les parois verticales..... | 20 |
| Tableau 3 : Emissivité dans le domaine des grandes longueurs d'ondes des différents matériaux | 21 |
| Tableau 4 : Capteurs installés dans la cellule expérimentale | 22 |
| Tableau 5 : Production de vapeur réalisée pour les différentes configurations de paroi..... | 26 |
| Tableau 6 : Mesures d'humidité absolue ($g_{vap}.kg_{AS}^{-1}$) à différentes profondeurs de la paroi et pour différents taux d'humidité | 29 |
| Tableau 7 : Mesures des déphasages thermiques sur les différentes configurations de paroi | 30 |
| Tableau 8 : Comparaison des mesures de déphasage thermique avec les propriétés des différents isolants | 31 |
| Tableau 9 : Comparaison des résistances thermiques mesurées sur les isolants secs avec les résistances apparentes pour les différentes configurations de paroi et taux d'humidité | 31 |
| Tableau 10 : Ecart moyen et maximum en température et en humidité aux positions des différents capteurs dans la paroi Ouest (période du 17/11/09 au 05/03/10) | 37 |
| Tableau 11 : Ecart moyen et maximum en température et en humidité dans la paroi Ouest (période du 13/03/10 au 23/03/10) avant, pendant et après la génération de vapeur. | 40 |
| Tableau 12 : Position des anémomètres à fil chaud dans la lame d'air..... | 56 |
| Tableau 13 : Valeurs des coefficients obtenues par méthode inverse..... | 62 |
| Tableau 14 : Performances du modèle ajusté pour les trois séquences expérimentales étudiées | 69 |
| Tableau 15 : Débits moyens des différentes sources de vapeur (en $g.h^{-1}$) pour les trois étapes de l'expérience | 73 |
| Tableau 16 : Quantité de vapeur (en kg) contenue dans les matériaux pour différents taux d'humidité..... | 74 |
| Tableau 17 : Comparaison des mesures de perméabilité effectuées pour une même configuration de paroi avec la porte soufflante et le Perméscope® | 77 |
| Tableau 18 : Mesures de perméabilité avec le Perméscope® pour différentes configurations de paroi | 77 |
| Tableau 19: Comparaison des résultats obtenus avec le Perméscope® utilisé avec la bouche d'aération fermée et ouverte..... | 79 |
| Tableau 20 : Valeurs des coefficients C_p utilisés dans HAM-Tools en fonction de l'incidence du vent sur la paroi d'après (Sharag-Eldin 07) | 80 |
| Tableau 21 : Valeurs des coefficients $\{k_T ; a_T\}$ communes à (Allard 98), (Hagentoft 01 ch I.4.1.1) et (Awbi 03)..... | 81 |
| Tableau 22 : Comparaison des différents gaz à partir des critères définis par (Cheong 01) | 84 |
| Tableau 23 : Propriétés techniques des deux analyseurs infrarouges | 86 |
| Tableau 24 : Mesures par gaz traceur et conditions extérieures moyennes | 88 |
| Tableau 25 : Ecart relatif sur le temps de décroissance et sur le débit horaire pour chacune des 12 expériences. | 91 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 26 : Influence des coefficients de terrain pour les expériences pour lesquelles la vitesse moyenne du vent était supérieure à $> 5 \text{ m.s}^{-1}$ | 92 |
| Tableau 27 : Ecart relatif sur le temps de décroissance et sur le débit horaire en utilisant les valeurs de C_p proposées dans (Sharag-Eldin 07) et (Hagentoft 01) | 94 |
| Tableau 28: Comparaison de l'énergie cédée par les parois verticales sur l'ensemble de la séquence expérimentale (W.h.m^{-2}) pour chaque orientation..... | 104 |
| Tableau 29 : Comparaison de la résistance thermique des différents constituants de l'enveloppe, calculée à partir des propriétés des matériaux secs. | 105 |
| Tableau 30 : Ecart moyen en température et en humidité aux différentes positions des capteurs dans la paroi Ouest pour la séquence avec la ouate de cellulose..... | 132 |
| Tableau 31 : Mesures d'émissivité des 10 premières lames du bardage par la méthode de la comparaison et par mesure directe..... | 133 |
| Tableau 32 : Calcul de l'incertitude sur la mesure de température par thermographie IR pour différents cas de figure..... | 134 |
| Tableau 33 : Positionnement des thermocouples dans la lame d'air | 137 |
| Tableau 34 : Pourcentage de la distribution incluse dans l'intervalle défini par T_{Moy} et σ | 138 |
| Tableau 35: Mesures de la décroissance le 04/01/2011 et le 26/01/2011..... | 145 |
| Tableau 36 : Mesure de débits extraits lorsque le système de ventilation est actif..... | 148 |
| Tableau 37 : Ecart relatif mesure / simulation obtenus pour les coefficients de terrain de type « plat » et « obstacles » et pour toutes les hauteurs équivalentes de tirage thermique | 149 |
| Tableau 38 : Ecart relatif mesure / simulation obtenus pour les coefficients de terrain de type « urbain » et « centre ville » et pour toutes les hauteurs équivalentes de tirage thermique | 150 |

Nomenclature

Lettres latines

| | | |
|----------------|---|-------------------------|
| c | Concentration d'un gaz | ppm |
| C | Nombre caractéristique de la perméabilité à l'air | $m^3.h^{-1}.Pa^{-1}$ |
| C _p | Coefficient de pression | - |
| C _p | Chaleur spécifique | $J.kg^{-1}.K^{-1}$ |
| d | Epaisseur | m |
| g | Densité de flux de masse | $kg.s^{-1}.m^{-2}$ |
| G | Débit massique de vapeur | $kg.s^{-1}$ |
| h | Coefficient de transfert de chaleur | $W.m^{-2}.K^{-1}$ |
| H | Enthalpie | J |
| HA | Humidité Absolue (ou humidité spécifique) | $kg_{vap}.kg_{AS}^{-1}$ |
| HR | Humidité Relative | - |
| p | Pression | Pa |
| P | Production de chaleur par unité de volume | $W.m^{-3}$ |
| q | Débit massique | $kg.s^{-1}$ |
| q _v | Débit volumique | $m^3.h^{-1}$ |
| R | Résistance | - |
| RA | Renouvellement d'Air | $vol.h^{-1}$ |
| S _d | Résistance équivalente à la vapeur | m |
| T | Température | °C ou K |
| S | Surface | m^2 |
| t | Temps | s |
| u | Incertitude | - |
| v | Vitesse d'air | $m.s^{-1}$ |
| V | Volume | m^3 |
| w | Taux d'humidité | $kg_{vap}.m^{-3}$ |
| z | Hauteur | m |
| z* | Hauteur relative | - |

Lettres grecques

| | | |
|---|-------------------------------------|-------------|
| β | Coefficient de dilatation thermique | K^{-1} |
| δ | Perméabilité à la vapeur d'eau | s |
| Δ | Variation d'une grandeur physique | - |
| ε | Emissivité | - |
| θ | Angle d'incidence | ° |
| ρ | Masse volumique | $kg.m^{-3}$ |
| Φ | Flux | W |
| φ | Densité de flux | $W.m^{-2}$ |
| σ | Ecart type | - |

Indices et exposants

| | |
|---------|--|
| 0 | Initial |
| 10 | Mesuré à une altitude de 10 m |
| A | Air |
| Atm | Atmosphérique |
| BA | Bouche d'aération |
| C | Convectif |
| Ciel | Ciel |
| Cond | Conductif |
| Decr | Décroissance |
| Dyn | Dynamique |
| Env | Environnement |
| Ext | Extérieur |
| H | Horaire |
| Hum | Humide |
| i | Position horizontale d'un nœud (de l'extérieur vers l'intérieur) |
| Infiltr | Infiltrations |
| Int | Intérieur |
| j | Position verticale d'un nœud (du bas vers le haut) |
| l | Liquide |
| LA | Lame d'air |
| Lame | Lame du bardage |
| Mat | Matériau |
| Mont_V | Montant vertical |
| n | Nombre caractéristique de la perméabilité à l'air |
| Par | Paroi |
| Par_H | Paroi horizontale |
| Par_V | Paroi verticale |
| PP | Pare-pluie |
| PV | Pare-vapeur |
| R | Radiatif |
| RES | Résidus |
| So | Source |
| SE | Surface du bardage côté Extérieur |
| Sec | Séché au four |
| SLA | Surface du bardage côté lame d'air |
| Surf | Surface de la paroi |
| SS | Surface au Sol en extérieur |
| Sol | Solaire |
| Th | Thermique |
| Tot | Total |
| Vap | Vapeur |
| X | Horizontal |
| Z | Vertical |

Valeur des constantes

| | | |
|------------------|--|---|
| α_A | Diffusivité thermique de l'air à 20°C | $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| $C_{P,A}$ | Chaleur spécifique de l'air à 20°C | $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| $C_{P,L}$ | Chaleur spécifique de l'eau liquide à 20°C | $4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| g | Accélération de la pesanteur | $9,81 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| $\bar{\delta}_A$ | Perméabilité à la vapeur de l'air | $1,9 \cdot 10^{-10} \text{ s}$ |
| σ_0 | Constante de Stefan-Boltzmann | $5,678 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ |
| λ_A | Conductivité thermique de l'air à 20°C | $2,62 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| ρ_A | Masse volumique de l'air à 20°C | $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| r_{AS} | Constante de gaz parfait pour l'air sec | $287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| r_{Vap} | Constante de gaz parfait pour la vapeur d'eau | $462 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| L_{Vap} | Chaleur latente de vaporisation de la vapeur d'eau | $2,5 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| ν_A | Viscosité cinématique de l'air à 20°C | $1,56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ |

Constantes spécifiques au bardage

| | | |
|-----------------------|---|---|
| a_{FOS} ; b_{FOS} | Coefficient adimensionnels (Fossa <i>et al.</i> 2008) | |
| a_{SS} | Evolution de la température de l'environnement | $0,015^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ |
| k | Evolution du débit dans la lame d'air avec la température | $1,23 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| γ | Evolution des débits horizontaux avec l'altitude | - |
| q_0 | Débit minimum dans la lame d'air | $6,48 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| Z_{REF} | Hauteur relative de l'axe neutre de la lame d'air | 0,57 |
| $\bar{\delta}_{INF}$ | Proportion de l'air entrant par le bas de la lame d'air | 0,18 |
| $\bar{\delta}_{SUP}$ | Proportion de l'air sortant par le haut de la lame d'air | 0,73 |

Constantes spécifiques au renouvellement d'air

| | | |
|---------------|--|--|
| a_T ; k_T | Coefficients de terrain | m^{-1} ; - |
| l_4 | Renouvellement d'air sous 4 Pa / surface du plancher | $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| n_{50} | Renouvellement d'air sous 50 Pa | $\text{vol} \cdot \text{h}^{-1}$ |

Introduction

A Généralités

Le dernier rapport rendu par le groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du climat (GIEC) a confirmé le relèvement de la température moyenne de l'atmosphère terrestre de 1,5 à 6°C d'ici 2100. Pour limiter cela et assurer le développement durable de la société, il est maintenant admis qu'il faudra diviser par deux les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la planète à l'horizon 2050. Dans le secteur du bâtiment en France, la consommation moyenne annuelle d'énergie est proche de 200 kWh d'énergie primaire par m² chauffé, pour les usages de chauffage de locaux et de l'eau chaude sanitaire. C'est le plus gros consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques, avec 70 millions de tonnes d'équivalent pétrole consommées par an (soit 43 % de l'énergie totale). La contrainte de réduction des émissions de CO₂, mais également la hausse inéluctable du coût de l'énergie liée à l'épuisement progressif des ressources, imposent de réduire la consommation d'énergie liée au bâtiment d'un facteur 4 (soit une consommation de 50 kWh.m⁻² par an).

Cette pression sur les objectifs des performances énergétiques des bâtiments a entraîné une modification des habitudes constructives, en premier lieu en augmentant l'isolation de l'enveloppe et en améliorant l'étanchéité à l'air. Ces changements apportés à l'enveloppe peuvent provoquer des phénomènes qui n'apparaissaient pas jusqu'ici, notamment ceux liés à l'humidité : développement de moisissures, dégradation de la qualité de l'air, condensation dans les parois ce qui peut entraîner une diminution de la durabilité des matériaux et de leurs performances énergétiques. Aussi, il paraît désormais nécessaire de tenir compte des transferts d'humidité dès la conception du bâtiment.

La maison à ossature bois est un mode constructif très répandu dans les pays nordiques ainsi qu'en Amérique du Nord. En France, cela ne représente que 4 % du parc actuel français (source : Centre National pour le Développement du Bois) mais la demande est en forte augmentation. En particulier, l'utilisation d'une ossature légère permet un pré-assemblage des parois en atelier, ce qui se traduit par des délais de production maîtrisés. De plus, la technologie des maisons à ossature permet d'atteindre de très bonnes performances thermiques et l'utilisation du bois dans l'enveloppe a un impact significatif sur les transferts de vapeur d'eau. Toutefois, comme pour les bâtiments à maçonnerie lourde, les transferts de vapeur d'eau peuvent créer des désordres et doivent être pris en compte dès la conception du bâtiment. Pour ces raisons, ce travail de doctorat s'intéresse à la thématique des transferts couplés de chaleur, d'air et de vapeur d'eau, appliquée au cas des maisons à ossature bois.

B Contexte scientifique

La communauté scientifique s'intéresse depuis de nombreuses années aux transferts couplés de chaleur et de masse dans le bâtiment, et ce à différentes échelles (matériau, éléments de paroi, enveloppe). Cette partie propose un panorama non-exhaustif des différentes études qui ont été menées dans ce domaine au niveau international.

B.1 Etudes internationales

L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) met en place des programmes de coopération appelés « Annexes ». L'Annexe 41 (« Whole building heat, air, moisture response ») s'est déroulée de 2003 à 2007 et avait pour objectif de mieux comprendre les transferts couplés de chaleur et de masse dans les bâtiments afin d'évaluer leurs impacts. 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'écritures ou de simplifications, les résultats des simulations sur des cas identiques peuvent différer de manière importante. La nécessité de réaliser davantage 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 mis en jeu, de donner une meilleure définition des propriétés des matériaux et d'améliorer la fiabilité des modèles.

Depuis de nombreuses années, des expérimentations sont menées à l'échelle des matériaux, de manière à mieux connaître leur comportement, y compris en ce qui concerne les transferts de vapeur et d'eau liquide dans des matériaux de construction. Par exemple, la diffusion de la vapeur d'eau dans des échantillons est étudiée dans (Avramidis et Siau 87). (Tremblay *et al.* 00) présentent des mesures de conductivité de l'eau liquide sur des échantillons de pin. En particulier, les auteurs mettent en évidence l'influence de la teneur en eau, de la température ainsi que le caractère bidimensionnel du matériau. Les méthodes de caractérisation étant pertinentes, (Kumaran 96) présente des propriétés typiques de matériaux à partir d'un grand nombre de mesures. Ces résultats ont été utilisés par la norme NF EN ISO 10456 (« Matériaux et produits pour le bâtiment »). De même, 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.* 02) et (Vinha 07) regroupent les caractéristiques de nombreux matériaux de construction d'usage courant.

Avec l'avancée des connaissances, plusieurs auteurs s'intéressent au comportement des matériaux pour des sollicitations de plus en plus variées. Par exemple, une veine d'air développée par (Talukdar *et al.* 07) permet de mesurer les transferts de vapeur dans des matériaux hygroscopiques exposés à des conditions limites transitoires. A partir d'une expérience reprenant le principe des mesures de perméabilité par la méthode des coupelles, (Peuhkuri *et al.* 08) effectuent des mesures de perméabilité pour des conditions non-isothermes sur des échantillons de 0,25 m². Dans cette dernière étude, les auteurs concluent que l'humidité relative ne joue pas le rôle de potentiel dans les

transferts de vapeur et que d'autres potentiels devraient être utilisés. (Van Belleghem *et al.* 11) dressent un état de l'art relativement complet des expérimentations permettant de traiter des transferts d'humidité dans les matériaux poreux à l'échelle de la paroi et du bâtiment. A la suite de quoi, les auteurs présentent un dispositif expérimental permettant de tester en conditions contrôlées le comportement d'un échantillon de 0,04 m² dans le but de valider le couplage entre un modèle de mécanique des fluides et un modèle de transferts couplés dans le matériau.

Dans la perspective de l'intégration des matériaux au bâtiment, plusieurs auteurs ont réalisé des travaux qui ciblent l'effet tampon des matériaux hygroscopiques. Au Canada, (Yang *et al.* 07) appliquent un bilan en vapeur d'eau à l'échelle de deux pièces expérimentales d'un volume total de 43 m³ présentées dans (Vera *et al.* 06). Les auteurs estiment ainsi l'effet tampon de parements en plâtre pour des cycles de sorption et de désorption en vapeur d'eau. Au Brésil, (Meissner *et al.* 10) ont réalisé une cellule dédiée à la caractérisation en conditions contrôlées de la sorption et de la capacité tampon de différents matériaux (la surface exposée est de 25 m²). (Yang *et al.* 12) élargissent ce principe en incluant les transferts avec le mobilier intérieur. Enfin, des démarches voisines sont présentées (Li *et al.* 12) et (Holm et Lengsfeld 07) et concernent l'effet tampon de parements intérieurs en bois.

L'échelle supérieure se situe au niveau de la paroi, c'est-à-dire pour des assemblages de matériaux. Un grand nombre d'études se placent en conditions contrôlées, ce qui permet d'isoler des phénomènes complexes et de les étudier plus en détails. Dans ce domaine, (Svennberg *et al.* 07) recensent de nombreuses études et soulignent que cette problématique n'est pas récente puisqu'il est possible de retrouver des travaux initiés dans les années 60. (Geving *et al.* 97) utilisent des données provenant de différents dispositifs expérimentaux qu'ils confrontent avec un modèle numérique. Ainsi, les auteurs montrent qu'une étude préliminaire aurait permis de réaliser un dimensionnement et une instrumentation mieux adaptés aux phénomènes étudiés. Dans un rapport du National Institute of Standards and Technology (NIST, USA) présenté par (Zarr *et al.* 95), des données expérimentales relevées sur 12 parois différentes sont comparées à des résultats de simulation (logiciel de calcul MOIST). (Fazio *et al.* 97) présentent une boîte chaude gardée installée au CNRC (Centre National de Recherche du Canada) qui permet de tester le comportement thermo-hygrique d'une paroi dont la surface est de 30 m². En 2002, le CNRC a publié un rapport sur la réponse thermo-hygrique de 4 parois testées en laboratoire puis étudiées numériquement. L'une des principales données de sortie concerne la durabilité des assemblages, principalement évaluée en considérant l'humidité contenue dans les matériaux. Malgré le grand nombre de résultats et bien que la méthode présentée soit efficace, les auteurs soulignent qu'il est difficile de déterminer une solution type tant les comportements peuvent varier selon la nature de la paroi et les sollicitations qui lui sont appliquées. Sur un principe similaire, (Maref *et al.* 03, 04) étudient le comportement de parois entières dans une dynamique de séchage, et dans des conditions d'humidité très élevée, puis (Vera *et al.* 08) étudient la réponse d'une ou deux pièces à différentes sollicitations. À l'Université de Technologie de Tampere (Finlande), (Kalamees et Vinha 03) et (Vinha 07) exposent des travaux lors desquels des portions de paroi sont soumises à des sollicitations représentatives de celles subies par une paroi de bâtiment. À

l'EMPA en Suisse, (Carmeliet et Derome 12) présentent des mesures de transport de vapeur d'eau dans des éléments de paroi pour de forts gradients de température. Enfin, à l'Université Préfectorale d'Akita (Japon), (Yoshino *et al.* 09) montrent l'effet du taux de renouvellement d'air et des matériaux hygroscopiques sur la réponse d'une pièce à une sollicitation hygrique à partir d'une expérience menée dans un caisson climatique. Cette liste n'est pas exhaustive mais permet de constater qu'un nombre important d'études ont été menées dans des laboratoires différents, et donc avec des méthodologies variées.

Pour aller vers davantage de réalisme cependant, il est nécessaire d'étudier les parois en conditions réelles, c'est-à-dire pour des sollicitations complexes et combinées (vent, rayonnement, pluie, etc.) : ces résultats peuvent ensuite servir de référence pour la validation des modèles comme le soulignent (Saber *et al.* 11) et (Steeman *et al.* 10). Cependant, la conception d'un support expérimental et d'une instrumentation adaptés est d'autant plus critique : (Straube *et al.* 02) proposent une méthodologie adaptée à cette problématique. Cependant, les auteurs avertissent de la complexité des résultats du fait des interactions entre les différents phénomènes, y compris pour des expériences simplifiées par rapport au cas d'un bâtiment réel. Toutefois, la nécessité de réaliser ce genre d'étude en complément des essais menés en conditions contrôlées est réaffirmée. Plusieurs exemples peuvent être trouvés dans la littérature. Par exemple, les transferts dans des toitures sont exposés dans (Hedlin 88, Derome 99). Les études dans des parois verticales sont également courantes ; les expérimentations menées par (Lindberg 04) ont permis de réaliser un suivi de l'humidité de différentes configurations de parois sur quatre ans. (Holm et Künzl 06) ont étudié l'effet de tampon hygroscopique de différents parements à l'aide d'une installation à l'institut Fraunhofer (IBP), en Allemagne, comportant deux pièces jumelles donnant sur l'extérieur et dont l'ambiance interne est contrôlée. (Geving et Uvsløkk 00) présentent des mesures qui se sont déroulées pendant trois ans sur un bâtiment en Norvège dont deux faces étaient conçues afin de permettre la comparaison entre plusieurs configurations de paroi. (Desta *et al.* 11) présentent un dispositif expérimental en Belgique dans lequel une paroi est soumise d'une part à une ambiance intérieure contrôlée, et d'autre part à des conditions climatiques réelles. Ces différents dispositifs présentent des similitudes, mais cela se justifie par le fait qu'il est difficile de généraliser les conclusions d'une étude pour d'autres assemblages de parois et pour d'autres conditions climatiques. En effet, (Pasztor *et al.* 12) relèvent plusieurs différences dans les habitudes constructives entre l'Amérique du Nord et l'Europe. Les auteurs proposent ensuite une comparaison numérique des enveloppes typiques et notent que des différences significatives apparaissent au bout de 3 ans.

Enfin, quelques études se placent dans le cas de bâtiments réels, c'est-à-dire habitables (voire habités). Ces expériences sont plus rares car plus difficiles à analyser du fait du grand nombre de phénomènes qui se développent simultanément à l'échelle du bâtiment, voire de l'impact des usagers. Une maison d'habitation instrumentée et occupée a été étudiée par (Käkelä et Vinha 03). (Simonson 05) présente les différentes consommations énergétiques relevées pendant plus d'un an sur une maison habitée en Finlande. Les principales spécificités de ce bâtiment sont que le renouvellement d'air s'effectue en conditions naturelles et qu'aucun film pare-vapeur n'est installé

dans les parois. (Maref *et al.* 07) évaluent l'efficacité de différents systèmes de ventilation et comparent les performances de deux systèmes de chauffage à partir de mesures faites sur une maison expérimentale à deux niveaux (non-habité) située au Canada. Enfin, à partir de 12 mesures de perméabilité à l'air effectuées au cours de la construction, (Langmans *et al.* 10) discutent de l'intérêt potentiel des films pare-air dans les maisons à ossature bois en Belgique.

B.2 Positionnement de ce travail

Les travaux présentés dans ce document concernent la validation d'un modèle de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à l'échelle de la paroi et du bâtiment. Pour permettre cette validation, cette étude s'appuie sur des mesures réalisées sur une cellule expérimentale dont la construction est basée sur la technologie des maisons à ossature bois et dont les dimensions sont représentatives d'une pièce d'habitation.

Cette expérimentation s'inscrit dans le cadre du projet OPTI-MOB, qui est un projet PREBAT (Programme de Recherche et d'Expérimentations sur l'énergie dans le Bâtiment) de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et encadré par l'ADEME (Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'Energie). Au cours de l'expérimentation, les matériaux constituant les parois verticales de l'enveloppe ont été remplacés, de manière à tester des parois aux propriétés hygrothermiques différentes. Ce bâtiment est exposé aux conditions climatiques réelles de Grenoble depuis 2008 et est fortement instrumenté afin de fournir des données expérimentales permettant la validation de codes de calculs. La construction, l'instrumentation, la caractérisation expérimentale du bâtiment, la définition des expériences et une première exploitation des résultats occupent une grande partie des travaux de thèse d'Amandine Piot (Piot 09). Un second volet de ses travaux porte sur la confrontation des mesures de température et d'humidité avec les résultats d'un modèle numérique existant. Cette confrontation a abouti à une validation partielle de l'outil de modélisation dont l'auteur en a exposé les limites.

Le travail présenté dans ce mémoire se situe dans la continuité directe des travaux de thèse de (Piot 09), dont les perspectives constituent la problématique de ce travail. Pour définir cette problématique, la partie suivante propose un aperçu des projets similaires qui ont été menés à l'échelle nationale puis une présentation du support expérimental et de l'outil de modélisation. Enfin, les objectifs de ce travail et la démarche adoptée seront proposés.

C Problématique et démarche générale

C.1 Etudes nationales

Pour accompagner l'essor des maisons à ossature bois, le projet OPTI-MOB a été mis en place autour d'une expérimentation menée à l'échelle du bâtiment en climat réel. Les participants à cette étude sont le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), le CETHIL (Centre de Thermiques de Lyon), EDF (Electricité de France), le FCBA (institut technologique Forêt, Cellulose, Bois, Ameublement), et les industriels Aldes et Ossabois (constructeur). Ce projet s'intègre dans la continuité ou en complémentarité d'autres études réalisées à l'échelle nationale :

- MACHA : « Définir l'impact des transferts de masse sur les transferts de chaleur », 06-09 ;
- MACHA 2 : « Mieux comprendre les transferts de masse pour maîtriser les transferts de chaleur », 07-09 ;
- HUMIRISK : « Renforcement de l'isolation dans l'existant - évaluation des risques liés à l'humidité » 06-10 ;
- OPTI-MOB « Réduction des risques liés à l'humidité et aux transferts d'air dans les constructions à ossature bois », 08-11 ;
- TRANSBATIBOIS « Transferts dans les parois des bâtiments bois » 08-12 ;
- HYGRO-BAT : « Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants » 11-14 ;
- HUMIBATEX « Comment prédire les désordres causés par l'humidité ? Quelles solutions techniques pour rénover le bâti existant » 12-15.

MACHA et MACHA 2 ont 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.

Le projet HUMIRISK a porté sur l'influence de la rénovation thermique pour des logements réels et sur les risques liés à l'humidité. La majorité de désordres constatés étant principalement dus à des difficultés d'organisation du chantier ou à des malfaçons, les auteurs préconisent de réaliser des études sur de longues durées (au moins deux ans) afin de pouvoir constater des dégradations liées aux choix de construction. De manière plus générale, le nombre de cas différents et la variété du comportement des occupants ont rendu difficile la généralisation des conclusions de l'étude.

Dans une optique similaire à celle du projet OPTI-MOB, le projet TRANSBATIBOIS vise à mieux évaluer les performances hygrothermiques des maisons en bois de différents types constructifs : ossature, rondins, madriers, panneaux de bois reconstitués. Les travaux effectués ont permis de mettre en place d'importants dispositifs expérimentaux en mettant en évidence les caractéristiques

des matériaux, l'influence des compositions de paroi. Ils ont également permis de développer et de valider plusieurs codes numériques.

Depuis, d'autres projets ont débuté. Le principal objectif du projet HYGROBAT est de mettre au point une méthodologie de conception hygrothermique des bâtiments et de quantifier des solutions techniques exploitant la dimension de la thermique liée aux transferts de masse. En partant des bases de métrologie et de caractérisation des matériaux, des mesures et des simulations sur des assemblages simples seront réalisées. Ensuite, le projet s'étendra à l'échelle du bâtiment en climat réel, sous un angle « idéalisé » dans un premier temps, puis en vraie grandeur avec l'exploitation d'une maison à ossature bois.

Dans la continuité du projet HUMIRISK, le projet HUMIBATEX porte sur la réhabilitation globale de bâtiments existants et donne des objectifs en termes de réduction des consommations énergétiques, de préservation du bâti initial (choix de matériaux et techniques compatibles), et d'amélioration du confort et des conséquences de l'humidité sur la santé des usagers. L'une des données de sortie du projet consiste en un guide technique qui proposera des solutions techniques pour rénover le bâti existant. Ce guide sera réalisé à partir des résultats de cette étude et complété par des simulations de configurations proposées lors de l'analyse du parc bâti existant.

C.2 Description générale du support expérimental

La cellule test servant de support expérimental au projet OPTI-MOB a été construite sur le site du CSTB à Grenoble (latitude : 45,2°E, longitude 5,77°N) et est exposée aux conditions climatiques réelles. La définition du cahier des charges de la cellule, sa construction et sa mise en service ont fait l'objet d'une étude antérieure. Aussi, seuls les éléments principaux sont présentés dans cette partie mais une description plus complète peut être trouvée dans (Piot 09).

La cellule test se compose d'une pièce principale (surface : 20,7 m² ; volume 50,7 m³) et d'un comble ventilé naturellement. Le toit est à deux pentes (Nord / Sud) inclinées à 30°. Les dimensions externes sont de 5,03*5,03 m² et la hauteur du faîtage est de 5,39 m. Le plancher est surélevé par rapport au sol de 0,60 m afin de simplifier les échanges et faciliter la modélisation des transferts. L'ensemble de l'ossature de la cellule est réalisé en épicea et une coupe verticale est donnée dans la Figure 1. Les montants verticaux sont de section 0,07*0,165 m² et l'entraxe est d'environ 0,55 m.

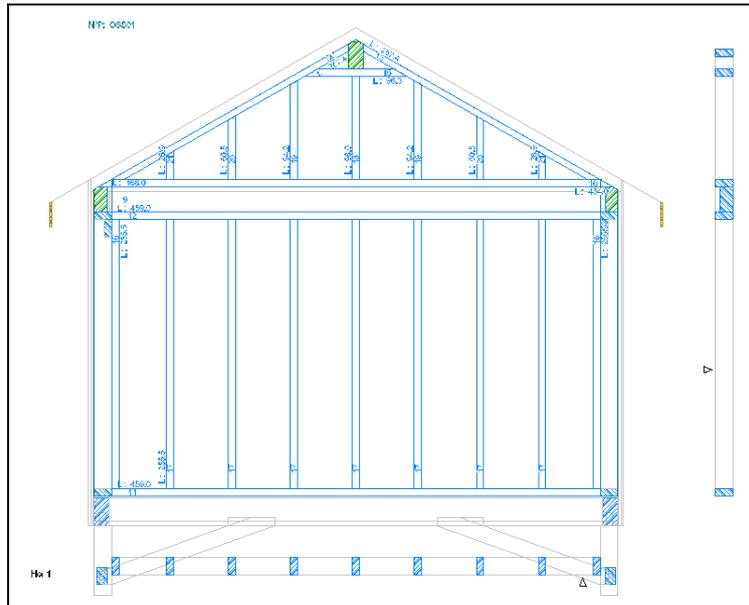


Figure 1 : Plan en élévation de la cellule (fourni par l'entreprise de construction)

La partie courante de la paroi verticale, c'est-à-dire en dehors des montants, a subi plusieurs changements au cours de l'étude afin d'observer l'influence des matériaux sur les transferts couplés de vapeur et de chaleur. La configuration de référence est présentée dans le schéma de la Figure 2 et comporte les éléments suivants (de l'intérieur vers l'extérieur) :

- Parements intérieurs non jointés en OSB (Oriented Strand Board – panneau à copeaux orientés) d'épaisseur 0,015 m ;
- Laine de verre (2 panneaux de 0,08 m) ;
- Panneaux de particules (0,01 m) jointés avec du mastic ;
- Film pare-pluie multicouche en polypropylène (nom commercial : Ubbink multivap 200), étanche à l'air et à l'eau liquide et perméable à la vapeur d'eau ;
- Lamme d'air (0,027 m) ;
- Bardage à clairevoüe en mélèze (0,02 m).

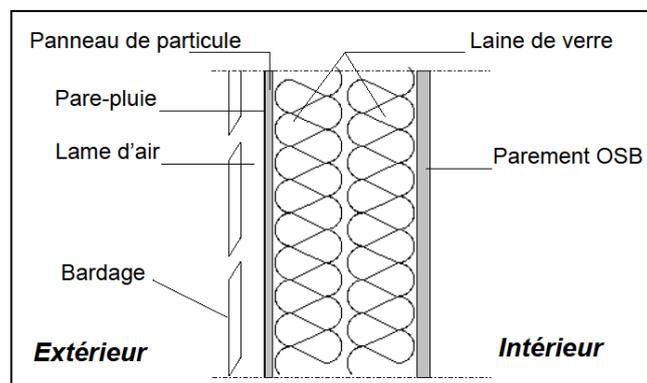


Figure 2 : Schéma en coupe de la partie courante d'une paroi verticale

De manière à limiter les transferts dans les parois horizontales, ces dernières ont été plus fortement isolées à l'aide d'une couche de 0,4 m d'isolant thermique et de deux pare-vapeur croisés (films de polyéthylène), installés entre le parement intérieur et l'isolant. Le plancher est constitué de

plaques d'OSB de 0,02 m d'épaisseur, le plafond de plaques de plâtre d'une épaisseur de 0,012 m, jointées avec du scotch aluminium.

Enfin, une double porte (2,10*0,85 m²) isolée avec 0,2 m de polystyrène extrudé est installée au milieu de la face Nord comme le montre la photographie de la Figure 3. Elle comporte une bouche d'aération qui est restée obstruée lors de la grande majorité des expériences. Une seconde bouche d'aération est située dans le plafond et permet de rejeter l'air intérieur sous l'avancée de la toiture de la face Ouest (non visible sur les photographies de la Figure 3) via un système d'extraction mécanique installé dans les combles. Un emplacement a été prévu en milieu de la paroi Sud pour permettre d'installer une fenêtre mais n'a pas encore été utilisé.



Figure 3 : Vue de l'angle Nord-Ouest de la cellule test à la fin de sa construction en 2008 (gauche) et en 2012 (droite)

L'apparence du bardage a changé sous l'effet de l'exposition aux conditions climatiques, notamment la pluie battante (sa couleur s'est assombrie). En particulier, une forte dégradation du bas de la porte et du bardage à proximité a pu être observée (voir Figure 3). Il est probable que cela provienne de l'eau de pluie collectée par la toiture, qui tombait alors sur les marches menant à la cellule. Pour limiter cela, une gouttière a été installée au niveau de la face Nord à partir d'avril 2011.

C.3 Choix d'un outil de modélisation

La complexité des problèmes rencontrés en physique du bâtiment rend généralement impossible la résolution analytique des équations de transferts couplés. Aussi, des méthodes numériques basées sur la discrétisation temporelle et spatiale sont utilisées pour résoudre ce problème.

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 08a, 08b) et peuvent être répertoriés selon le type de discrétisation spatiale aussi bien pour les parois que pour le volume d'air. Le niveau de discrétisation, ou « granularité » est choisi en fonction du niveau de simplification adopté pour décrire les différents phénomènes (thermiques, hygriques, aérauliques) en jeu. Toutefois, d'autres distinctions sont possibles, par exemple le choix de potentiels moteurs utilisés pour écrire le système

d'équations, le traitement des conditions aux limites, les méthodes numériques (éléments finis ou différences finies, schéma de résolution temporelle explicite, implicite, mixte, etc.) ou encore leur usage (logiciel commercial, ouvert).

Le modèle choisi dans le cadre de cette étude s'appelle HAM-Tools (« Heat, Air and Moisture Toolbox ») : 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 dans le cadre des exercices de comparaison de l'Annexe 41 de l'AIE, et validé expérimentalement (Kalagasidis 04, Kalagasidis *et al.* 07). Les raisons qui ont motivé ce choix sont :

- C'est un logiciel ouvert, développé dans l'environnement de simulation Matlab-Simulink et disponible au téléchargement à l'adresse <http://www.ibpt.org> ;
- Le logiciel se présente comme une bibliothèque de composants, ce qui en fait un outil souple d'utilisation et intuitif ;
- L'écriture du modèle est « transparente », c'est à dire que l'utilisateur a accès à l'ensemble des équations, à la description du maillage des parois, ou encore à la définition des échanges surfaciques ;
- Une documentation détaillée est disponible (Kalagasidis 03, Rode *et al.* 03).

Le bâtiment est décrit comme un assemblage de différents composants (parois, zones, systèmes, etc. voir Figure 4), chacun étant composé de modules plus élémentaires : par exemple, une paroi se décompose en plusieurs couches et chaque couche comporte plusieurs nœuds. 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. Les échanges sont supposés unidimensionnels et le modèle est écrit aux différences finies. Le schéma de résolution temporel est de type explicite à pas de temps variable (utilisation d'un solveur de Matlab). Enfin, plusieurs bibliothèques sont disponibles et permettent de modéliser différents systèmes (chauffage, refroidissement, ventilation), de prendre en compte les infiltrations d'air et des données météorologiques. Une description plus approfondie de ces éléments, et notamment la mise en équation des phénomènes physiques, sera développée dans les chapitres suivants.

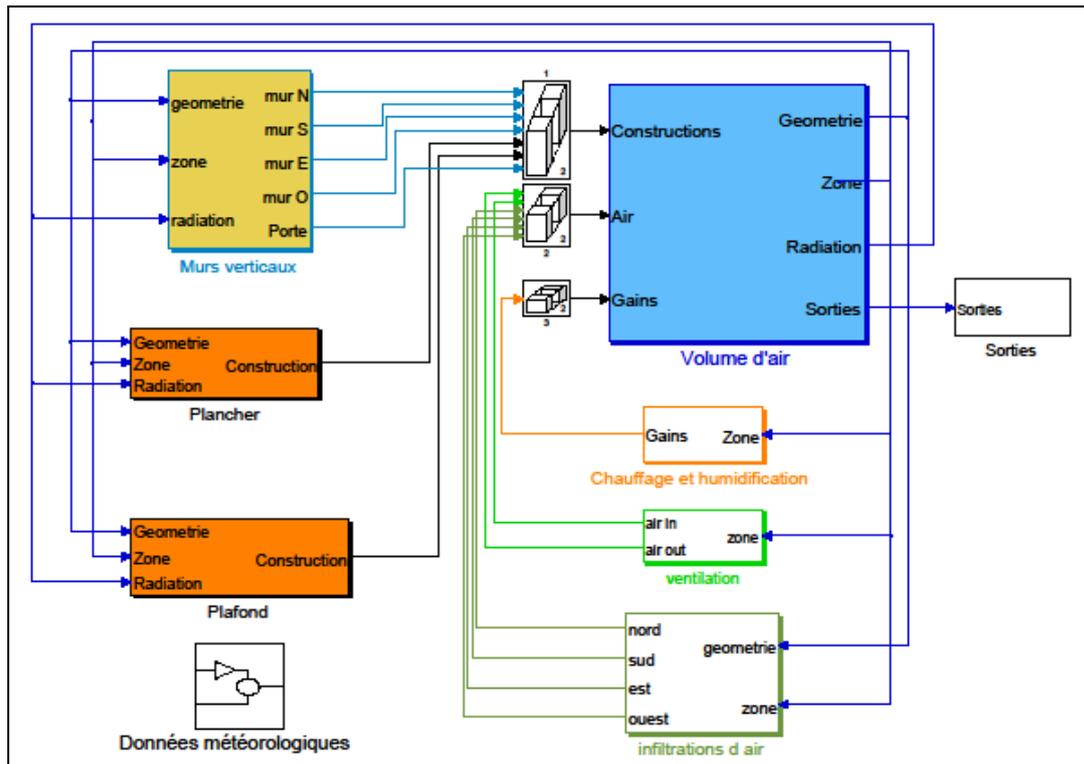


Figure 4 : Exemple d'écran principal dans HAM-Tools pour la simulation d'un bâtiment comportant 6 parois, 1 porte, 1 volume d'air, des systèmes de chauffage et d'humidification, ventilation et infiltrations d'air et prise en compte des conditions météorologiques.

C.4 Principe de la démarche : décomposition des transferts

Une première application de cet outil de modélisation à la cellule expérimentale est présentée dans (Piot 09). La confrontation entre le modèle et les mesures a été abordée progressivement afin d'identifier les différents phénomènes et de caractériser les performances du modèle en détails. La modélisation s'est avérée être efficace sur les points suivants :

- Le comportement thermique des parois et de l'air intérieur est correctement reproduit lorsque la température de surface des parois extérieures est imposée. Cela justifie de nombreuses hypothèses simplificatrices (prises en compte des propriétés des matériaux, transferts unidimensionnels) et permet de vérifier la qualité de l'instrumentation des parois.
- La réponse d'un matériau hygroscopique à une sollicitation « lente » ainsi que la migration d'humidité dans la paroi sous l'effet de sollicitations thermiques sont correctement évaluées, bien que des écarts puissent apparaître sur les valeurs en pics. La sensibilité du modèle aux conditions initiales et à la précision en température a été mise en évidence.

Cependant, les performances du modèle ont atteint leurs limites en ce qui concerne les deux aspects suivants :

- La modélisation unidimensionnelle du bardage extérieur n'a pas permis de représenter correctement le comportement en température des parois verticales, en particulier pour des journées ensoleillées.
- L'évolution de l'humidité de l'air est mal reproduite, notamment au niveau de l'air intérieur lorsque de la vapeur d'eau est produite à l'intérieur de la cellule (solicitation « rapide »). La prise en compte des propriétés hygroscopiques des matériaux ainsi que la précision de l'estimation du renouvellement d'air sont discutées.

Parmi les nombreuses poursuites envisageables, il a été décidé d'inscrire ces travaux de thèse dans la continuité directe des précédents. Ainsi, le travail présenté ici se focalise sur la modélisation des transferts à l'échelle du bâtiment dans le but de proposer une approche plus fine des phénomènes observés expérimentalement. Le fort couplage entre les transferts d'air, de vapeur et de chaleur rendant difficile l'interprétation des phénomènes, il a été décidé de réaliser des expérimentations ciblées sur des phénomènes particuliers. Puis à partir de ces résultats expérimentaux, le modèle HAM-Tools a été amélioré et validé. Cette démarche générale a été appliquée ici à trois reprises, et est présentée dans trois chapitres distincts (les problématiques spécifiques et le contexte scientifique qui les entourent sont précisés en introduction de chaque chapitre). Le choix des thématiques découle des conclusions et perspectives proposées dans (Piot 09) :

- Transferts couplés de chaleur et de masse dans les parois verticales de l'enveloppe : la démarche initiée dans (Piot 09) est étendue au cas des parois comportant des isolants hygroscopiques (cette partie de l'étude a donc été fortement conditionnée par la méthodologie et les choix expérimentaux effectués lors du travail de (Piot 09)). En plus de la validation du modèle, une comparaison expérimentale des six configurations de paroi testées depuis la mise en service de la cellule sera proposée.
- Modélisation des transferts dans la lame d'air ventilée : compte tenu de la difficulté à reproduire la température de la face extérieure de la paroi, ce chapitre est dédié à l'investigation et à la modélisation de la lame d'air et des transferts de chaleur qui s'y développent.
- Caractérisation du renouvellement d'air de la cellule : ce chapitre décrit les transferts d'air à l'échelle du bâtiment tout entier. En effet, le renouvellement d'air peut avoir un impact significatif sur l'évolution en humidité de l'air intérieur, notamment lors de séquences expérimentales avec production de vapeur.

Enfin, l'ensemble des résultats obtenus durant ces travaux sera utilisé pour réaliser une simulation à l'échelle du bâtiment tout entier, prenant en compte l'ensemble des transferts et leur couplage. La confrontation avec l'expérience permettra de conclure quant à la précision globale du modèle, son domaine de validité et des points qui pourraient être approfondis.

Chapitre I

Transferts couplés de chaleur et de masse dans les parois de l'enveloppe

A Définition de la problématique

A.1 Transferts de chaleur et de masse dans les matériaux

Cette partie propose une brève introduction aux transferts de chaleur et de vapeur d'eau qui se développent dans les matériaux de construction poreux. Une présentation plus complète de ce sujet peut être trouvée dans (Hagentoft 01) et (Hens 07).

Dans un solide homogène, le transfert de chaleur se fait par conduction comme le décrit la loi de Fourier (voir Eq. 1) : la densité de flux de chaleur élémentaire φ_{Cond} est proportionnelle au gradient de température T . L'énergie interne est égale à l'enthalpie H et la conservation de l'énergie s'écrit alors comme présentée dans Eq. 2.

Eq. 1
$$\varphi_{\text{Cond}} = -\lambda_{\text{Mat}} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T)$$

Eq. 2
$$-\frac{1}{V} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(\varphi_{\text{Cond}}) + P$$

Dans le cas d'un matériau poreux, c'est-à-dire pour la plupart des matériaux de construction, la convection et le rayonnement au sein des pores viennent s'ajouter à la conduction dans la matrice solide. En pratique, ces phénomènes sont inclus dans une conductivité équivalente déterminée par une mesure faite sur des échantillons « macroscopiques ».

Les matériaux de construction comportent donc des pores remplis d'air, et par extension, d'eau. L'eau peut être présente sous différentes formes : vapeur dans l'air, couches de molécules d'eau adsorbées à la surface des pores, condensation capillaire dans les pores de petite taille, liaison

chimique à la matrice solide. A l'échelle microscopique, le comportement du matériau peut alors être décomposé en trois domaines :

- Région hygroscopique : lorsque le matériau est exposé à de faibles humidités relatives (< 40 % environ), l'eau est adsorbée sur les parois des pores en couches mono-moléculaires puis multimoléculaires. La condensation hygroscopique apparaît lorsque tout l'espace d'un pore est rempli par de l'eau. Elle apparaît donc dans les pores les plus petits en premier. Jusqu'à des humidités relatives de 95 - 98 %, l'eau est essentiellement transportée sous forme de vapeur.
- Région super-hygroscopique : 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 est resté en contact longtemps avec de l'eau liquide, ou bien si la pression est artificiellement augmentée, les petites poches d'air résiduelles sont dissoutes, jusqu'à atteindre la saturation maximale.

La capacité des matériaux à emmagasiner de l'eau, appelée parfois capacité hygrique, est traduite par la courbe de sorption dont l'allure générale est présentée dans la Figure 5.

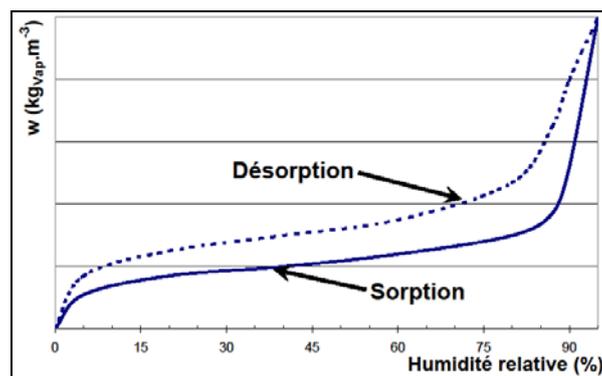


Figure 5 : Forme générale de la courbe de sorption d'un matériau hygroscopique

Cette courbe est généralement déterminée pour un essai à température constante, et s'appelle alors isotherme de sorption. En effet, la quantité d'eau adsorbée par certains matériaux peut varier avec la température pour une humidité relative donnée, ce que mesurent par exemple (Almeida *et al.* 11) sur des échantillons d'épicéa et de paille. De plus, un comportement différent entre les processus d'adsorption et de désorption (phénomène d'hystérésis) est fréquemment observé ; des exemples de mesure sont présentés dans (Crausse *et al.* 96) sur des échantillons de béton et de ciment et dans (Kwiatkowski *et al.* 09) sur des échantillons de plâtre. Plus généralement, l'historique du matériau a un effet sur le taux réel d'humidité du matériau, celui-ci se trouvant toujours entre les deux courbes (Almeida *et al.* 11).

Toutefois, il est courant de considérer un comportement hygrique simplifié. Ainsi, la norme ISO 12571 impose d'effectuer la mesure d'une seule isotherme de sorption (à une température de $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$) et pour un seul cycle d'adsorption / désorption (de 0 à au moins 95 % d'humidité relative).

Par ailleurs, le phénomène d'hystérésis peut être modélisé de différentes manières ; il existe par exemple une corrélation empirique (Pedersen 90), utilisée depuis par (Peralata 95) et (Kwiatkowski *et al.* 09). D'un autre côté, (Coasne *et al.* 05) proposent une approche basée sur une théorie dite des domaines indépendants, basée sur les travaux de (Mualem 74). Bien évidemment, cette liste n'est pas exhaustive et d'autres travaux existent à ce sujet (Crausse *et al.* 96, Derome *et al.* 08).

Une comparaison entre ces deux approches (corrélation empirique et théorie des domaines indépendants) est proposée dans (Carmeliet *et al.* 05). Les auteurs soulignent qu'à l'échelle du bâtiment, l'effet de tampon hygrique des parois dépend davantage de la perméabilité à l'air des matériaux que des propriétés de sorption. Ainsi, plusieurs codes de calcul développés dans le cadre des transferts à l'échelle du bâtiment, voire de la paroi (et donc à une échelle supérieure à celle du matériau), n'utilisent pas de modèle d'hystérésis et se limitent à une seule et unique courbe (HAM-Tools (Kalagasidis *et al.* 03), HAM-BE (Li *et al.* 09), HAM-Fit Plus (Tariku *et al.* 10), Traoré *et al.* 11).

Ce choix peut être discuté car la courbe de première sorption est celle pour laquelle la pente est la plus importante, ce qui décrit donc un comportement extrême du matériau. Cependant, il est important de souligner que les temps de stabilisation en humidité (et donc le temps nécessaire à la mesure) sont importants, en particuliers pour des matériaux fortement hygroscopiques (plusieurs semaines dans le cas de parements à base de bois). En conséquence, certains auteurs ne déterminent que l'isotherme de première sorption, y compris dans le cadre d'expérimentations récentes (Desta *et al.* 11). C'est l'hypothèse simplificatrice qui a été retenue ici (Piot 09).

Dans l'air libre et immobile, le transport de vapeur d'eau s'effectue par diffusion. Le potentiel moteur est la pression de vapeur d'eau p_{vap} (ou d'une certaine façon, l'humidité absolue de l'air HA) et la densité de flux de vapeur $g_{vap,A}$ s'écrit :

$$g_{vap,A} = -\delta_{vap,A} \cdot \overrightarrow{grad}(p_{vap})$$

$$p_{vap} = \frac{p_{Tot} \cdot r_{vap} \cdot HA}{HA \cdot r_{vap} + r_{As}}$$

Eq. 3

Dans un réseau poreux, ce transport est modifié par la présence de la matrice solide ainsi que de l'eau liquide. En effet, lorsque les pores sont suffisamment petits, 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. Il peut être décrit à l'aide de la perméabilité à la vapeur du matériau $\delta_{vap, Mat}$ en remplacement de $\delta_{vap, A}$ dans Eq. 3. L'équation de conservation de la masse donne alors :

$$-\frac{\partial w}{\partial t} = div(g_{vap,Mat})$$

$$= div\left(-\delta_{vap,Mat}(w) \cdot \overrightarrow{grad}(p_{vap})\right)$$

Eq. 4

Dans le domaine de la condensation hygroscopique, le transport de masse s'effectue également sous l'effet du gradient de pression de succion (Rouchier *et al.* 12). Cette étude se limitant

au comportement hygroscopique des matériaux, ces pressions ne sont pas prises en compte et leur présentation n'est donc pas développée. Enfin, un gradient de pression d'air dans le matériau peut également provoquer un transport de la masse (transport par convection, aussi appelé advection). Toutefois, ce type de transfert est supposé négligeable pour les configurations étudiées ici et n'est donc pas développé.

Le couplage entre transferts et stockage de chaleur et de masse peut intervenir de plusieurs manières. Tout d'abord, la température et le taux d'humidité modifient certaines propriétés du matériau : c'est le cas de la conductivité thermique et de la capacité calorifique. De plus, l'enthalpie de l'eau contenue dans le matériau s'ajoute au bilan énergétique d'un élément de volume (Eq. 2) de telle sorte que la variation d'enthalpie peut être écrite comme dans Eq. 5. Pour être tout à fait complet, il faudrait également inclure l'enthalpie de l'air et de la vapeur d'eau, mais l'ordre de grandeur de ces deux termes est nettement moins important, et de fait, ils sont fréquemment négligés (Hens 07).

$$\text{Eq. 5} \quad \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial(m_{Mat} \cdot C_{P,Mat}(w) \cdot T + m_l \cdot C_{P,l} \cdot T)}{\partial t}$$

La variation d'enthalpie due au stockage de vapeur dans le matériau se traduit par l'ajout d'un terme dans la partie de droite de la conservation d'énergie comme le montre Eq. 6.

$$\text{Eq. 6} \quad -\frac{1}{V} \frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}\left(-\lambda_{Mat}(w) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T)\right) + \text{div}\left(g_{vap} \cdot (L_{vap} + C_{P,vap} \cdot T)\right) + P$$

Le couplage des transferts de chaleur et de vapeur d'eau dans les parois est donc décrit à l'aide des équations Eq. 4, Eq. 5 et Eq. 6.

Enfin, il est intéressant de remarquer que la température influe sur la pression de vapeur saturante (Eq. 7), donc sur l'humidité relative (Eq. 8) et l'humidité des matériaux (voir courbe de sorption, Figure 5). Ainsi une variation locale de la température peut entraîner une redistribution de l'humidité.

$$\text{Eq. 7} \quad p_{Sat,vap}(T) = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T + 273,15 - 37,58}\right)$$

$$\text{Eq. 8} \quad HR(T, p_{Tot}, HA) = \frac{p_{Tot} \cdot r_{vap} \cdot HA}{p_{Sat,vap}(T) \cdot (HA \cdot r_{vap} + r_{As})}$$

$$\text{Eq. 9} \quad p_{vap} = HR(T, p_{Tot}, HA) \cdot p_{Sat,vap}(T)$$

A.2 Validation à partir de l'expérimentation

Cette présentation des phénomènes physiques montre que malgré l'utilisation de plusieurs hypothèses simplificatrices, le couplage entre transferts de chaleur et de vapeur n'est pas évident à interpréter et à prévoir, en particulier lorsque les conditions limites du problème varient. Ce constat

justifie le recours à des outils de modélisation afin de prévoir le comportement thermo-hygrique des parois pour un bâtiment soumis à des conditions réelles.

Toutefois, avant d'utiliser de tels modèles, il est nécessaire d'effectuer une validation de leurs performances, soit par comparaison par rapport à d'autres modèles en simulant des cas de référence (par exemple, les exercices de l'Annexe 41), soit par rapport à l'expérimentation. C'est ce dernier choix qui a été retenu ici : d'importantes quantités de vapeur ont été produites à l'intérieur de la cellule de manière à provoquer un flux de vapeur à travers les parois. La connaissance des conditions aux limites du problème, des propriétés des matériaux et de l'évolution de la température et de l'humidité à différentes profondeurs de la paroi permet de valider le modèle de paroi et les hypothèses simplificatrices effectuées ici.

Ce travail a été partiellement validé dans (Piot 09) pour des parois comportant un isolant peu hygroscopique (laine de verre) entre les montants de l'ossature. Ici, les expérimentations ont été poursuivies en utilisant des isolants hygroscopiques en remplacement (fibre de bois et ouate de cellulose). En effet, la plus forte capacité de stockage de vapeur d'eau de ces matériaux, couplée aux écarts de température importants qui peuvent apparaître entre les ambiances intérieures et extérieures, constitue un aspect qu'il est nécessaire d'étudier.

Tout d'abord, ce chapitre proposera une présentation détaillée du support expérimental, en insistant notamment sur son instrumentation et sur la caractérisation des matériaux. Après avoir présenté le déroulement des séquences expérimentales, une comparaison des résultats sera proposée et discutée. Cette étape portera en particulier sur le déphasage thermique observé dans l'épaisseur de l'isolant et sur la résistance thermique de la paroi. La dernière partie de ce chapitre portera sur la modélisation des parois et des transferts couplés dans HAM-Tools. Les séquences expérimentales réalisées avec des isolants hygroscopiques seront simulées et les performances du modèle discutées. Tout au long de ce chapitre, le couplage entre transferts de vapeur et de chaleur sera illustré à travers les résultats expérimentaux et de simulation.

B Présentation détaillée du support

Afin d'étudier les transferts couplés dans les parois verticales de la cellule test, plusieurs configurations de paroi ont été testées successivement et sont présentées ici. Puis les propriétés des matériaux et l'instrumentation de la cellule seront précisées.

B.1 Configurations des parois et séquences expérimentales

La configuration de référence des parois verticales (Figure 2) à été testée du 24/07/08 au 08/02/09. Afin de ne pas limiter l'étude à une seule configuration de paroi, des modifications ont été apportées progressivement de la façon suivante :

2. Ajout d'un pare-vapeur entre le parement intérieur (panneaux d'OSB) et l'isolant (laine de verre) (du 18/02/09 au 03/05/09) ;
3. Remplacement du parement intérieur (panneaux d'OSB) par des plaques de plâtre d'une épaisseur de 0,012 m (du 13/05/09 au 14/06/09) ;
4. Retrait du pare-vapeur et remplacement de l'isolant (laine de verre) par de la fibre de bois sur une épaisseur identique (du 02/07/09 au 27/05/10) ;
5. Remplacement de l'isolant (fibre de bois) par de la ouate de cellulose projetée par voie humide (du 28/07/10 au 08/05/11). La ventilation mécanique de la cellule a été activée pendant deux mois afin d'accélérer le séchage de la ouate, puis les parements intérieurs (plaque de plâtre) ont été remis en place ;
6. Ajout d'un pare-vapeur différent de celui de la configuration 2 entre le parement intérieur (plaque de plâtre) et l'isolant (ouate de cellulose).

Au final, six configurations de parois ont été testées et seront repérées plus tard par leur numéro (1 étant la configuration de référence). Les schémas des coupes de parois sont présentés dans la Figure 6 ci-dessous.

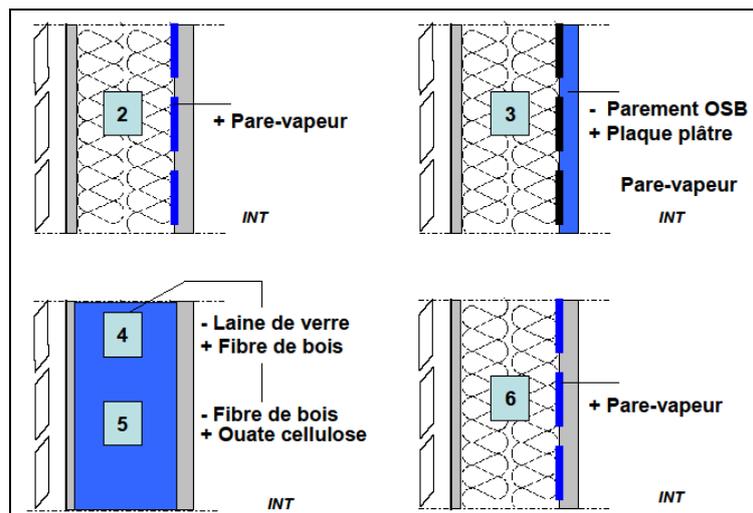


Figure 6 : Schéma récapitulatif des différentes configurations de paroi étudiées

La cellule expérimentale ne comportant qu'un unique volume intérieur, qui échange avec l'ensemble des parois. Lors d'un changement de configuration de paroi, toutes les parois verticales ont donc été changées simultanément de manière à ce que leurs propriétés soient homogènes et que les transferts avec le volume d'air ne soient pas influencés par une paroi en particulier. De ce fait, chacune des six configurations de paroi a été testée séparément.

B.2 Propriétés des matériaux

Les propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés dans la cellule ont été mesurées d'après un plan d'expérience établi lors des travaux précédents (Piot 09). L'objectif de ce plan était de déterminer les propriétés des matériaux nécessaires à la modélisation des transferts selon les

hypothèses simplificatrices envisagées. Une caractérisation plus poussée serait à envisager pour d'autres cas de figures, notamment pour des études qui se situent à l'échelle du matériau ou si des transferts d'eau liquide étaient susceptibles d'apparaître. Cependant, la caractérisation des propriétés des matériaux ne faisant pas partie des objectifs de ce travail, cette section se limite à rappeler les mesures présentées dans Piot (09) et qui seront utilisées par la suite.

Ces résultats ont été obtenus d'après des les mesures effectuées en laboratoire (CSTB) à partir de trois échantillons, prélevés directement sur les matériaux mis en œuvre. Pour les propriétés thermiques à l'état sec (masse volumique, conductivité thermique et capacité thermique, voir Tableau 1), les échantillons ont été placés dans un four à 70°C et pesés régulièrement. Puis les mesures ont été réalisées à une température de 23°C une fois la mesure de masse stabilisée.

Tableau 1 : Propriétés thermiques moyennes des matériaux secs à 23°C

| Matériaux | ρ_{Sec} (kg.m ⁻³) | λ_{Sec} (mW.m ⁻¹ .K ⁻¹) | $C_{p,\text{Sec}}$ (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹) |
|-----------------------------------|---|---|---|
| Epicéa | 366,9 | 90,1 | 1300 |
| Panneau de particules | 700,2 | 106,7 | 1270 |
| OSB | 601,6 | 97,9 | 1450 |
| Plaque de plâtre | 712,5 | 190 | 1010 |
| Laine de verre | 19,4 | 32,0 | 760 |
| Fibres de bois | 133,7 | 37,2 | 1200 |
| Ouate de cellulose ⁽¹⁾ | 50,0 | 42,0 | 1100 |

⁽¹⁾ Des variations importantes ont été observées.

Les résultats entre les différents échantillons d'un même matériau sont apparus être similaires, sauf pour le cas de la ouate de cellulose où des variations plus importantes ont été observées, en particulier sur la masse volumique (écarts relatifs de plus de 20 %). Cela signifie que les échantillons ne sont pas homogènes, ce qui est également le cas du matériau mis en œuvre. Les fabricants annoncent d'ailleurs que la masse volumique de la ouate peut varier entre 30 et 65 kg.m⁻³.

Dans un second temps, les propriétés hygriques des matériaux ont été mesurées (conductivité humide, perméabilité à la vapeur d'eau, courbes de sorption). La conductivité humide représente la variation de la conductivité thermique totale comme le montre l'équation Eq. 10 ci-dessous :

$$\text{Eq. 10} \quad \lambda_{\text{Mat}}(w) = \lambda_{\text{Sec}} + \lambda_{\text{Hum}} \cdot w$$

La perméabilité à la vapeur d'eau a été mesurée par la méthode de la coupelle sèche et de la coupelle humide, en accord avec les standards NF EN ISO 12572 et 12086. Les échantillons ont été placés entre deux ambiances de 0 et 50 % d'humidité relative (coupelle sèche) puis 50 et 94 % (coupelle humide). Les résultats sont présentés dans le Tableau 2. Sur ce point particulier, il est intéressant de préciser que plusieurs auteurs (Osanyintola et Simonson 06, Ramos *et al.* 10, Desta *et al.* 11) effectuent une mesure supplémentaire entre deux ambiances de 83 et 94 % d'humidité relative. Cela permet de définir et d'identifier les coefficients d'une corrélation non linéaire décrivant l'évolution

de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative. Ici, les données seront simplement interpolées entre les deux points de mesure (voir Chapitre ID.1 pour plus de détails).

Tableau 2 : Propriétés thermo-hygriques des matériaux installés dans les parois verticales

| Matériaux | λ_{Hum} (mW.m ⁻¹ .K ⁻¹ .kg ⁻¹ .m ³) | $\bar{\delta}_{0-50\%HR}$ (.10 ⁻¹² s) | $\bar{\delta}_{50-94\%HR}$ (.10 ⁻¹² s) |
|-----------------------|--|--|---|
| Epicéa | 0,51 | 1,08 ⁽¹⁾ | 25 ⁽¹⁾ |
| Panneau de particules | 0,13 | 2,11 | 2,79 |
| OSB | 0,20 | 1,81 | 1,88 |
| Plaque de plâtre | 1,67 | 21,7 | 29,8 |
| Laine de verre | 0,00 | 167 | 167 |
| Fibre de bois | 0 – 1,00 ⁽²⁾ | 5,41 | 5,88 |
| Ouate de cellulose | 0,00 ⁽³⁾ | 7,79 | 17,4 |

⁽¹⁾ Valeurs issues de (Kumaran *et al.* 02)

⁽²⁾ La première valeur correspond à l'intervalle [0 ; 60%] HR, la seconde à l'intervalle [60 ; 100%] HR

⁽³⁾ Aucune variation de la conductivité n'a été observée sur l'intervalle [0 ; 90%] HR

Après séchage des matériaux, leurs courbes de sorption ont été mesurées en plaçant les échantillons dans des étuves pour différentes consignes d'humidité relative (30, 50, 65, 80 et 94 %) en maintenant la température à 23°C. La mise en équilibre de l'ensemble des différents matériaux a nécessité en moyenne trois mois. Ce délai était principalement gouverné par l'OSB et le panneau de particules pour lesquels les quantités absorbées sont les plus importantes comme le montre le graphique de la Figure 7. L'hystérésis de désorption n'a pas été mesurée sur les matériaux mis en œuvre, ce phénomène n'étant pas pris en compte dans la version actuelle d'HAM-Tools.

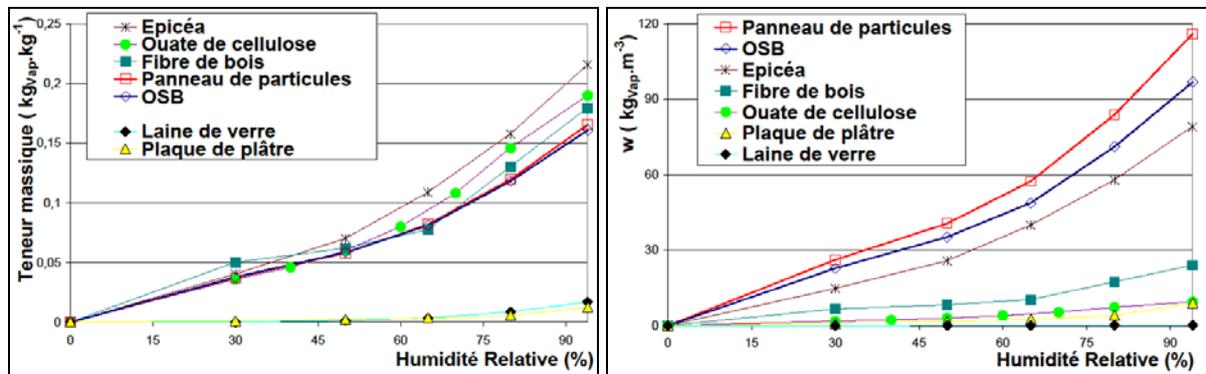


Figure 7 : Comparaison des courbes de sorption (teneur massique à gauche, taux d'humidité à droite) pour les différents matériaux utilisés dans la cellule

Les deux pare-vapeurs qui ont été installés (séquences 2 et 5) ont une résistance à la vapeur S_d de 78 m et 18 m respectivement (données constructeur). Cette valeur représente l'épaisseur équivalente d'une couche d'air et se calcule à partir de l'équation Eq. 11.

Eq. 11
$$S_d = d_{PV} \cdot \frac{\delta_A}{\delta_{PV}}$$

Les autres propriétés thermo-hygriques des pare-vapeurs n'ont pas été évaluées, leur rôle étant supposé limité à une résistance aux transferts de vapeur. Cette hypothèse est également faite

dans (Traoré *et al.* 11). Dans le même ordre d'idée, les propriétés du pare-pluie, qui recouvre les contreventements des parois verticales, n'ont pas été mesurées. Cet élément est considéré parfaitement étanche à l'eau liquide et perméable à la vapeur ($S_d = 0,02$ m d'après le constructeur).

En ce qui concerne les propriétés radiatives des matériaux, l'émissivité dans le domaine des grandes longueurs d'ondes a été mesurée à l'aide d'un pyrogéomètre hémisphérique et les mesures sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Emissivité dans le domaine des grandes longueurs d'ondes des différents matériaux

| Matériau | Emissivité ϵ |
|---------------|-----------------------|
| OSB | 0,89 |
| MFP | 0,88 |
| Plâtre | 0,85 |
| Pare-pluie | 0,75 |
| Bardage recto | 0,85 |
| Bardage verso | 0,87 |

L'absorptivité solaire du bardage (ou émissivité dans le domaine des courtes longueurs d'ondes) a été mesurée lors de la construction de la cellule et vaut $\epsilon_{\text{Sol}} = 0,4$. Cependant, l'aspect du bardage a changé au cours du temps (voir Figure 3). Aussi, une partie du bardage de la face Ouest de la cellule a été démontée durant le mois d'avril 2011 afin de procéder à une nouvelle mesure comme le montrent les photos de la Figure 8.



Figure 8 : Face ouest de la cellule une fois la partie supérieure du bardage démontée (gauche) et identification de la surface utilisée pour la mesure d'absorptivité (droite)

Il est apparu que l'absorptivité variait de 0,43 (point de mesure proche de l'avancée de la toiture, dont l'aspect a peu varié) à 0,63 (point au centre de la paroi, dont l'aspect a fortement changé). L'absorptivité solaire augmente donc avec le vieillissement du bardage. Au sens strict, il n'est pas possible de prendre une valeur constante pour l'ensemble des séquences expérimentales. Néanmoins, une valeur de 0,60 sera retenue pour l'étude des transferts avec l'extérieur, c'est-à-dire entre l'été 2010 et 2011 (voir Chapitre II).

B.3 Instrumentation de la cellule

Afin de connaître le comportement hygrothermique de la cellule dans son ensemble, les 4 types de capteurs suivants ont été utilisés :

- Thermocouple de type T : constitué de deux matériaux conducteurs différents, soudés en un point, qui génèrent une force électromotrice fonction de la température. Le diamètre des fils étant très petit ($0,5 \cdot 10^{-3}$ m), ils perturbent très peu le milieu environnant.
- Thermo-hygromètre : ce sont des éléments capacitifs qui permettent de réaliser simultanément une mesure de température et d'humidité relative. L'élément sensible est protégé par un boîtier de dimensions ($7 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 29 \cdot 10^{-3}$ m³). Inséré dans la paroi, ce capteur effectue donc une mesure dans une poche d'air qui est supposée être à l'équilibre avec son environnement.
- Sonde platine : placée au centre du volume d'air, ce capteur permet une mesure de température avec une meilleure précision que les autres capteurs.
- Fluxmètre : constitué de plusieurs thermocouples en série placés de part et d'autre d'une plaque métallique de conductivité thermique connue, cet instrument permet de mesurer une densité de flux. Ces capteurs sont de très faible épaisseur ($0,4 \cdot 10^{-3}$ m) mais peuvent perturber localement les transferts de vapeur de par leur surface ($0,1 \cdot 0,1$ m²).

Le nombre et la précision des différents capteurs sont présentés dans le Tableau 4 qui montre que plus de 150 capteurs sont installés.

Tableau 4 : Capteurs installés dans la cellule expérimentale

| Type | Nombre | Précision |
|------------------------|--------|--|
| Thermocouple de type T | 87 | $\pm 1^\circ\text{C}$ |
| Thermo-hygromètre | 55 | $\pm 5\% \text{ HR} \pm 0,8^\circ\text{C}$ |
| Sonde platine | 1 | $\pm 0,03^\circ\text{C}$ à 0°C |
| Fluxmètre | 7 | $\pm 3\%$ |

Dans la suite de ce manuscrit, l'évolution de l'humidité sera présentée davantage en termes d'humidité absolue que d'humidité relative. L'incertitude liée aux thermo-hygromètres peut être convertie mais dépend alors de la température et de l'humidité relative (voir Eq. 12 et Eq. 13). Par exemple, pour de l'air à 10°C et $60\% \text{ HR}$ (conditions généralement rencontrées au milieu de l'isolant), l'incertitude est de $\pm 0,35 \text{ g.kg}_{\text{AS}}^{-1}$.

Eq. 12
$$u(HA) = \sqrt{\left(\frac{\partial HA}{\partial HR}\right)^2 \cdot u(HR)^2 + \left(\frac{\partial HA}{\partial T}\right)^2 \cdot u(T)^2}$$

Eq. 13

$$\frac{\partial HA}{\partial HR} = \frac{r_{Vap}}{r_{AS}} \cdot \frac{P_{Sat}(T) \cdot P_{Tot}}{(P_{Tot} - p_{Vap}(HR, T))^2}$$

$$\frac{\partial HA}{\partial T} = \frac{r_{Vap}}{r_{AS}} \cdot \frac{HR \cdot P_{Tot}}{(P_{Tot} - p_{Vap}(\phi, T))^2} \cdot \frac{\partial p_{Sat}(T)}{\partial T}$$

Seuls les fluxmètres ont été calibrés suite à des tests effectués au CSTB lors de l'étude précédente (Piot 09). La sonde platine a été calibrée quant à elle par le constructeur. Pour les thermocouples et les thermo-hygromètres, aucun étalonnage n'a été effectué. Cependant, des tests rapides menés avant la mise en service de la cellule puis pendant son fonctionnement ont permis de vérifier les précisions annoncées par les constructeurs (voir Annexe 1 pour le cas d'un thermo-hygromètre, testé après 4 ans de fonctionnement).

Les mesures qui seront principalement exploitées dans ce document sont celles qui ont été réalisées dans la partie courante des parois verticales, à mi-hauteur et à distance égale des angles de la cellule. Deux schémas de positionnement des capteurs sont proposés dans la Figure 9 : si un pare-vapeur est installé, un thermo-hygromètre supplémentaire est installé de manière à permettre la mesure de l'humidité relative de part et d'autre du pare-vapeur. Les capteurs seront repérés plus tard par rapport aux numéros indiqués dans ce schéma (T1 étant ainsi la mesure de température sur le parement intérieur, HR3 la mesure d'humidité relative au milieu de l'isolant, etc.).

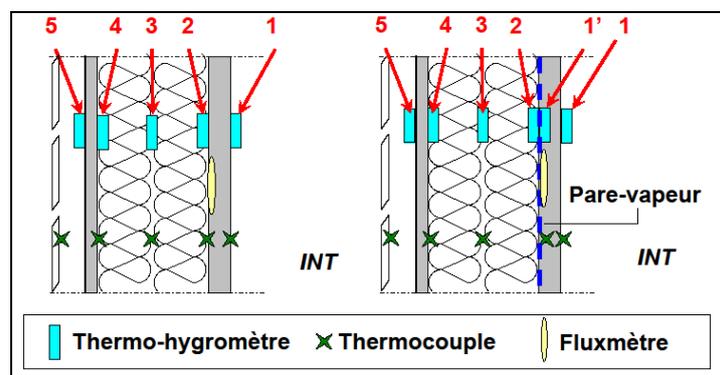


Figure 9 : Schémas de positionnement des capteurs dans la partie courante de la paroi Est à mi-hauteur (gauche) et lorsqu'un pare-vapeur est installé (droite).

La paroi Est a été la plus fortement instrumentée car c'est elle qui subit les sollicitations thermiques les plus importantes (ensoleillement en début de journée). Sur cette paroi, les mesures à mi-hauteur ont été reproduites à proximité de la jonction avec le plancher et le plafond (à l'exception de la mesure de flux). De plus, une trentaine de thermocouples ont été placés au niveau de l'angle Nord-est afin de permettre une étude de cette partie spécifique de la structure où les transferts de chaleur sont susceptibles d'être plus importants (voir Piot 09 pour plus de détails). Ces mesures ne seront pas utilisées dans le cadre de cette étude cependant.

Le positionnement des thermo-hygromètres est identique dans la paroi Ouest mais aucun thermocouple n'a été installé. Les parois Nord et Sud ne comportent pas non plus de thermocouples et seuls les thermo-hygromètres 1, 2 et 4 sont installés (et 1' si un pare-vapeur est installé).

La sonde platine est utilisée comme mesure référence de la température de l'air. Elle est montée sur un mât au centre de la pièce et est protégée des transferts radiatifs par un « doigt de gant ». Trois thermo-hygromètres sont également disposés sur ce mât à des hauteurs différentes. Un fluxmètre est installé au milieu de chaque face de la cellule, y compris au niveau des surfaces horizontales, et un capteur est dédié à la mesure de la densité de flux qui traverse la porte. Des capteurs sont installés pour mesurer l'intensité des courants électriques consommés par l'équipement situé à l'intérieur de la cellule (chauffage, ventilateur, éclairage, système d'acquisition, etc.). Enfin, une balance permet de connaître par la pesée la production des générateurs de vapeur d'eau.

L'acquisition des données se fait par le biais de centrales d'acquisition Campbell : elles permettent la lecture des tensions des différents capteurs, la conversion en données utiles (température, humidité relative ...) et le stockage des données. Les mesures sont effectuées avec une fréquence d'une minute, moyennées sur dix minutes et recopiées dans un fichier sur un poste de contrôle situé en dehors de la cellule.

B.4 Station météo

Une station météorologique est située juste à côté de la cellule test et permet de faire les relevés suivants :

- Température et humidité relative de l'air ;
- Pression atmosphérique ;
- Pluviométrie ;
- Vitesse et direction du vent ;
- Rayonnement solaire global sur une surface horizontale et rayonnement solaire diffus ;
- Concentration en dioxyde de carbone de l'air (depuis juillet 2010).

L'acquisition des mesures est réalisée par une centrale dédiée avec une fréquence de dix secondes. Les mesures sont ensuite moyennées sur dix minutes et stockées dans un fichier sur un poste de contrôle déporté.

Depuis la construction de la cellule test, une autre cellule expérimentale a été installée à proximité et a été équipée d'une station météorologique dédiée. En particulier, elle comporte un pyrgéomètre qui permet de mesurer le flux radiatif émis par la voûte céleste (et par extension, la température du ciel) depuis le mois de mai 2010. Une comparaison des mesures effectuées entre les deux stations a permis de vérifier la qualité des mesures. En particulier, il a été constaté que la première station se situait dans le sillage de la cellule expérimentale et que les mesures de vent étaient erronées (voir Annexe 2). Les données météorologiques utilisées par la suite seront donc une combinaison des mesures faites par les deux stations.

C Comparaison des configurations de paroi

L'instrumentation mise en place permet d'effectuer un suivi des transferts de chaleur et de vapeur à l'échelle de la cellule toute entière. Afin de limiter le nombre de données à traiter, l'étude se focalise sur les transferts dans la partie courante de la paroi Ouest. Bien que la paroi Est soit plus largement instrumentée, elle a déjà fait l'objet d'une étude plus approfondie dans (Piot 09), ce qui permet de donner plus de généralité à l'étude des transferts dans les parois. Enfin, les sollicitations extérieures étant plus fortes sur la paroi Est, elle sera étudiée en détail dans le Chapitre II.

C.1 Séquences expérimentales

Afin d'étudier la réponse de la cellule à des sollicitations liées à une activité humaine, des systèmes ont été installés pour simuler une occupation interne. Un convecteur électrique muni d'un thermostat programmable permet de définir la température de la cellule. Un générateur de vapeur par ultrason permet de diffuser un brouillard, c'est-à-dire de fines gouttelettes d'eau qui se vaporisent très rapidement. Le débit de ce générateur est mesuré par une balance installée directement dans la cellule. Enfin, un ventilateur brasse l'air à l'intérieur de la cellule afin d'obtenir des conditions de température et d'humidité relative homogènes, ce que vérifient les mesures faites sur le mât. Le déroulement d'une séquence expérimentale se décompose alors selon les étapes suivantes :

- Stabilisation : la température intérieure est maintenue constante pendant plusieurs jours afin que les différents transferts dans l'enveloppe se stabilisent.
- Production de vapeur : le générateur est allumé et fonctionne en continu. Il peut être réapprovisionné selon les besoins de l'expérience.
- Evolution : le générateur est éteint et l'humidité relative de l'air intérieur décroît avec le temps jusqu'à une valeur stable.

Cette séquence expérimentale a été répétée pour chaque configuration de paroi. Bien évidemment, les modifications de la composition de la paroi ont provoqué un changement de comportement hygroscopique de la cellule. Par exemple, l'air intérieur est beaucoup plus rapidement saturé en vapeur d'eau pour une configuration de paroi comportant un pare-vapeur. Une fois l'air saturé de vapeur d'eau, de l'eau liquide se dépose au niveau des différentes surfaces, ce qui n'est pas souhaitable (comportement différent des matériaux, perturbation des mesures, éventuel endommagement des appareils électriques, etc.). A l'inverse, pour une configuration de paroi comportant une large proportion de matériaux hygroscopiques (OSB, fibre de bois, ouate de cellulose), une production de vapeur trop faible risque d'être insuffisante pour permettre d'étudier les phénomènes de sorption et de désorption de vapeur d'eau.

Aussi, la production de vapeur d'eau a varié selon les configurations étudiées (voir Tableau 5). Pour les configurations 4 et 5, la capacité de production de vapeur a été augmentée en utilisant deux générateurs simultanément. La mesure par pesée s'est avérée alors être défailante, et par

conséquent, seules les données moyennes sont connues. Pour la configuration 4, les réservoirs ont été rechargés à plusieurs reprises afin de permettre de produire 93 kg de vapeur sur vingt jours, ce qui constitue la production de vapeur la plus importante.

Tableau 5 : Production de vapeur réalisée pour les différentes configurations de paroi

| Composition de paroi | Débit du générateur (g.h ⁻¹) | Durée (jour) | Quantité produite (kg) |
|-----------------------|--|--------------|------------------------|
| 1 ⁽¹⁾ | 20,9 | 13,3 | 6,7 |
| 2 | 58,4 | 3,5 | 4,9 |
| 3 | 68,8 | 3,3 | 5,5 |
| | 244,1 | 1,8 | 10,6 |
| 4 ^{(1), (2)} | 260,0 | 20,0 | 93,0 |
| 5 ⁽²⁾ | 250,0 | 3,0 | 18,0 |
| 6 | 180,0 | 2,0 | 8,6 |

⁽¹⁾ Valeurs moyennes, plusieurs tests ont été menés
⁽²⁾ Estimations – pas de mesure exacte disponible

Outre la production de vapeur, des différences entre les séquences expérimentales apparaissent au niveau des conditions extérieures : par exemple la configuration 1 a été testée en hiver tandis que la configuration 3 a été testée à la fin du mois de mai. Dans ce dernier cas, le flux de chaleur peut changer de sens en journée (i.e. de l'extérieur vers l'intérieur) comme le montrent les graphiques de la Figure 10.

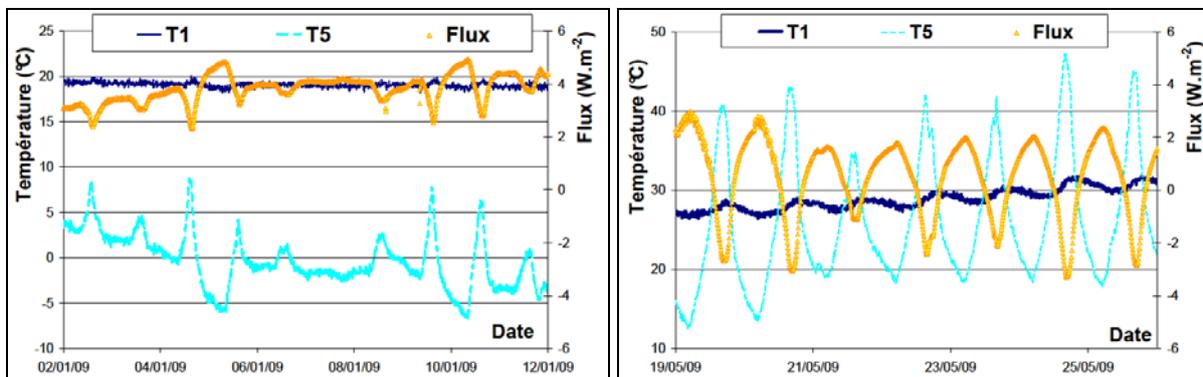


Figure 10 : Température de surface de la paroi Ouest et densité de flux de chaleur mesurées avec la configuration 1 (gauche) avec la configuration 3 (droite)

Les différentes séquences expérimentales ne peuvent donc pas être comparées immédiatement. Cependant, il serait intéressant d'exploiter ces mesures afin d'établir quels sont les différences les plus significatives.

C.2 Eléments de comparaison

Dans le cadre des bâtiments à ossature légère, le déphasage thermique dans les parois est faible et le choix de l'isolant peut avoir une influence. Cet effet provient de l'inertie thermique des constituants de la paroi et est particulièrement visible pour des journées avec de fortes variations de la

température extérieure (le plus souvent, des journées ensoleillées). Une première estimation de ce paramètre peut être obtenue en considérant le produit de la masse volumique par la capacité calorifique. Expérimentalement, le déphasage correspond au temps que met une variation de température à se propager dans le matériau comme le montre le graphique de la Figure 11. Des approches plus complètes pourraient être envisagées pour donner une estimation plus précise du déphasage thermique ; par exemple, une solution analytique pourrait être calculée pour des sollicitations simples et sans prendre en compte le couplage entre transferts de chaleur et de vapeur. Néanmoins, le but de cette partie de l'étude n'est pas tant d'étudier le déphasage thermique des parois que de déterminer si le remplacement des composants de l'enveloppe peut avoir un impact significatif sur ce phénomène.

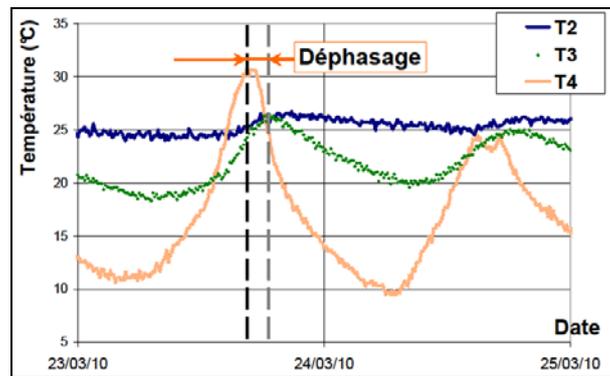


Figure 11 : Estimation du déphasage thermique à partir des mesures de température dans la paroi Ouest, cas du 23/30/10 (configuration 4)

Le second élément de comparaison abordé concerne l'influence des transferts de vapeur d'eau sur les transferts de chaleur. Une approche encore courante en physique du bâtiment consiste à négliger l'impact des transferts de vapeur d'eau, ce qui permet de donner un ordre de grandeur des énergies mises en jeu plus rapidement. Dans cette situation, l'enthalpie (Eq. 5) peut être simplifiée sous la forme présentée dans Eq. 14. De plus, dans l'hypothèse de transferts unidimensionnels, Eq. 6 est remplacée par Eq. 15.

Eq. 14
$$H = m_{Mat} \cdot C_{p,Mat} \cdot T$$

Eq. 15
$$\frac{1}{V} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda_{Sec} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

En supposant que le régime permanent ait été atteint, le terme de gauche devient nul et le flux de chaleur qui traverse la paroi se conserve. L'avantage de cette simplification est qu'elle permet de connaître le flux qui traverse la paroi (les déperditions thermiques) à partir de la résistance thermique R de la paroi. C'est une grandeur très pratique pour comparer rapidement les performances thermiques de différentes configurations de paroi. Pour un seul matériau, la résistance thermique est :

Eq. 16
$$R_{Mat,Sec} = \frac{d}{\lambda_{Sec}}$$

Or la densité de flux Φ traversant la paroi est mesurée par un fluxmètre et les températures aux points 2 et 4, c'est-à-dire de part et d'autre de l'isolant, sont mesurées par des thermo-hygromètres (Figure 9). Lorsque le régime stationnaire est atteint, il est donc possible de calculer une résistance thermique « apparente » comme présenté dans Eq. 17. La mention « apparente » a été choisie car cette démarche se place dans l'hypothèse d'un couplage négligeable entre les transferts de chaleur et de vapeur, bien que la mesure du flux s'effectue dans le cas réel.

$$\text{Eq. 17} \quad R_{\text{Apparente}} = \frac{T_2 - T_4}{\phi}$$

D'une certaine manière, la comparaison des résistances ($R_{\text{Mat,Sec}}$ et $R_{\text{Apparente}}$) permet de conclure sur la validité de l'hypothèse du faible couplage des transferts de vapeur et de chaleur. Plus généralement, cela donne également une idée de l'impact de l'humidité sur les transferts de chaleur. Pour permettre une telle analyse cependant, il est nécessaire d'identifier les parties de l'expérience durant lesquelles le régime stationnaire est atteint. Pour aller plus loin dans la comparaison des configurations de parois et dans le couplage des transferts de chaleur et d'humidité, la distinction a été faite entre deux cas selon que la quantité de vapeur d'eau contenue dans la paroi soit faible ou élevée.

Les mesures réalisées par les thermo-hygromètres dans les parois sont des mesures d'humidité relative. Or, cette grandeur est fortement liée à la température (voir Eq. 8), ce qui ne facilite pas la lecture des résultats, en particulier dans l'isolant où il existe de forts écarts de température. La pression de vapeur par contre ne dépend pas de la température (Eq. 3) et est continue aux interfaces. De plus, elle peut être calculée à partir des mesures de température et d'humidité relative (Eq. 9). Il est donc plus intéressant de considérer cette grandeur pour étudier le comportement hygrique de la paroi. Une seconde alternative consiste à considérer l'humidité absolue, grandeur liée directement à la pression de vapeur, qui représente la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air. C'est cette dernière grandeur qui a été retenue ici.

C.3 Identification des périodes de régime pseudo-stationnaire

Par définition, le régime stationnaire est atteint lorsque la température et l'humidité des parois n'évoluent pas dans le temps. En pratique, il est presque impossible d'observer un tel comportement dans les parois, en grande partie parce que les conditions extérieures varient continuellement. Pour comparer les différentes séquences, les données sont donc intégrées sur des périodes pour lesquelles les variations de température sont les moins importantes, c'est-à-dire pour lesquelles le régime pseudo-stationnaire est atteint (ici entre 0 et 6h).

Les périodes d'humidité faible sont sélectionnées avant l'étape de génération de vapeur (ou plusieurs jours après la fin de la génération, voir Figure 12) et celles de forte d'humidité ont été sélectionnées durant la phase de génération de vapeur (voir Figure 13). Dans ce dernier cas, il est évident que l'hypothèse d'un régime pseudo-stationnaire n'est pas vérifiée en ce qui concerne les

transferts de vapeur d'eau. D'une certaine façon, les comparaisons vont porter autant sur le niveau d'humidité que sur l'impact de la dynamique des transferts de vapeur (ici, en phase d'adsorption).

La Figure 12 et la Figure 13 identifient les périodes sélectionnées pour la configuration de paroi 3. Cet exemple correspond au cas le plus délicat, de fortes variations de température étant observées dans la journée. De ce fait, la température et l'humidité ne sont pas tout à fait stables sur la période définie (évolution de $[1^{\circ}\text{C} ; 0,5 \text{ g.kg}_{\text{AS}}^{-1}]$ pour la période d'humidité faible, $[2^{\circ}\text{C} ; 1 \text{ g.kg}_{\text{AS}}^{-1}]$ pour la période d'humidité élevée). La durée de la génération de vapeur étant limitée, il n'est pas possible d'obtenir des mesures plus stables sur cette séquence. Cependant, les variations observées pour cette configuration de paroi sont les plus importantes par rapport à l'ensemble des expériences.

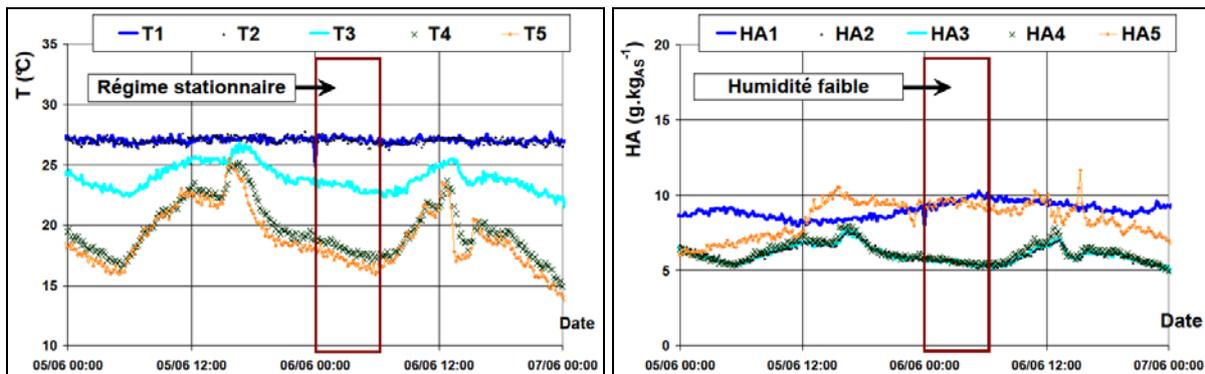


Figure 12 : Identification de la période de faible humidité pour le cas de la configuration 3, mesures de température (gauche) et d'humidité absolue (droite)

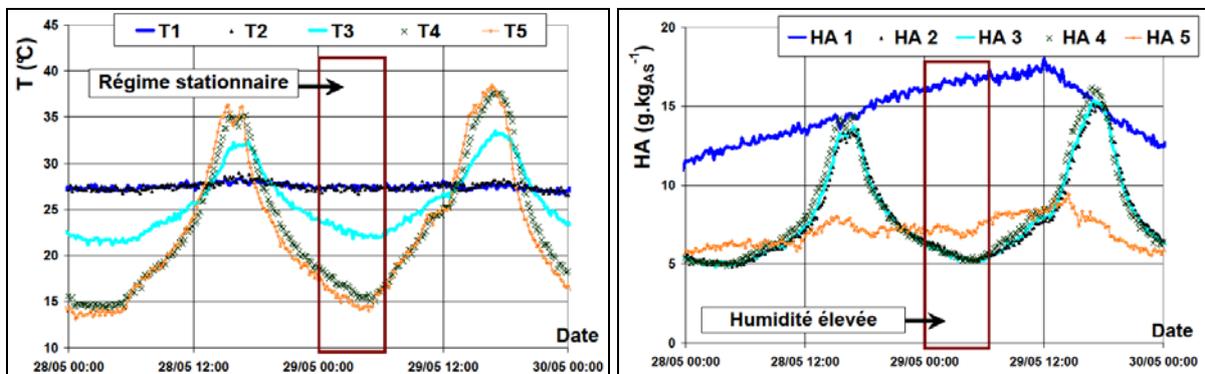


Figure 13 : Identification des mesures intégrées de température (gauche) et d'humidité absolue (droite), cas de la configuration 3 pour un taux d'humidité élevé

Pour chaque configuration de paroi, les mesures d'humidité absolue relevées aux différentes profondeurs de la paroi sont présentées dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Mesures d'humidité absolue ($\text{g}_{\text{vap}}.\text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$) à différentes profondeurs de la paroi et pour différents taux d'humidité

| Configuration | Taux humidité | Date | HA1 | HA2 | HA3 | HA4 | HA5 |
|----------------------|---------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | Bas | 07/01/09 | 2,8 | 3,0 | 2,9 | 2,8 | 2,6 |
| Laine de verre + OSB | Haut | 27/01/09 | 5,7 | 3,8 | 3,9 | 3,8 | 3,7 |
| 2 | Bas | 23/02/09 | 3,8 | 3,2 | 3,3 | 3,3 | 3,8 |

| | | | | | | | |
|------------------------|------|----------|------|------|-----|-----|-----|
| (1) + pare-vapeur | Haut | 01/03/09 | 4,5 | 4,0 | 4,1 | 4,1 | 4,2 |
| 3 | Bas | 06/06/09 | 9,6 | 5,6 | 5,5 | 5,6 | 9,4 |
| (2) -OSB + plâtre | Haut | 29/05/09 | 16,5 | 5,7 | 5,6 | 5,7 | 7,1 |
| 4 | Bas | 12/03/10 | 2,8 | 2,8 | 3,1 | 3,0 | 2,9 |
| Fibre de bois + plâtre | Haut | 09/04/10 | 16,8 | 14,1 | 9,4 | 7,4 | 6,3 |
| 5 | Bas | 17/11/10 | 5,9 | 5,9 | 6,0 | 5,6 | 4,8 |
| Ouate + plâtre | Haut | 25/11/10 | 17,6 | 17,4 | 8,1 | 5,4 | 3,7 |
| 6 | Bas | 20/07/11 | 6,8 | 5,4 | 5,3 | 5,2 | 8,0 |
| (5) + pare-vapeur | Haut | 09/06/11 | 16,5 | 6,9 | 6,4 | 6,1 | 6,9 |

L'humidité absolue a augmenté significativement entre les mesures réalisées pour des taux d'humidité bas et élevé pour les configurations 4 et 5 (respectivement + 6,3 g.kg_{AS}⁻¹ et + 2,1 g.kg_{AS}⁻¹ au point 3 – milieu de l'isolant). Pour les autres configurations de paroi, les variations restent inférieures à 1,1 g.kg_{AS}⁻¹ à cette même position.

Ces faibles variations de l'humidité dans l'isolant sont une conséquence directe de l'utilisation du pare-vapeur (configurations 2, 3 et 6) ou d'un parement intérieur hygroscopique (configuration 1). Dans ces quatre cas, la vapeur générée à l'intérieur de la cellule n'a pas pu migrer jusque dans l'isolant. Toutefois, les configurations 1, 2 et 3 se sont déroulées avec le même isolant (laine de verre) sur six mois. Ainsi, l'humidité au point 3 a augmenté de 2,9 à 5,6 g.kg_{AS}⁻¹ (soit + 2,7 g.kg_{AS}⁻¹), ce qui est du même ordre de grandeur que pour l'expérience menée sur la configuration 5 avec de la ouate de cellulose.

C.4 Résultats : déphasage thermique

Les résultats concernant les déphasages thermiques (voir Figure 11 pour le principe de la mesure) sont présentés dans le Tableau 7 ci-dessous pour les différentes configurations de paroi étudiées. L'analyse des résultats n'a pas permis d'identifier de différence significative entre les périodes de faible ou de fort taux d'humidité. Aussi, les résultats sont regroupés dans le Tableau 7 pour les deux taux d'humidité.

Tableau 7 : Mesures des déphasages thermiques sur les différentes configurations de paroi

| Configuration | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------------------|----------------|------|------|---------------|--------------------|------|
| Déphasage (h) ⁽¹⁾ | 0h40 | 0h40 | 0h40 | 3h50 | 1h30 | 1h30 |
| Isolant | Laine de verre | | | Fibre de bois | Ouate de cellulose | |

⁽¹⁾ La précision de la mesure du déphasage est estimée à ± 0h10

Il n'est pas apparu de différence significative entre les configurations 1, 2 et 3, ce qui signifie que le choix du parement intérieur et l'utilisation d'un pare-vapeur ne sont pas influents sur le déphasage thermique dans l'isolant. Le remplacement de l'isolant par contre a permis d'observer des différences très nettes : le déphasage a augmenté de 0h40 à 3h50 en remplaçant la laine de verre par de la fibre de bois, 1h30 avec de la ouate de cellulose.

Ces résultats peuvent être reliés aux propriétés thermiques des matériaux : pour cela, l'inertie thermique est estimée en multipliant la masse volumique ρ par la capacité calorifique $C_p(w)$. En toute rigueur, la quantité d'eau dans l'isolant varie selon les expériences, et donc l'inertie thermique totale de l'isolant varie aussi. Toutefois, la quantité d'eau adsorbée est relativement faible devant la quantité de matière sèche, y compris pour le cas le plus critique (configuration 4, avec de la fibre de bois). Un calcul mené sur cette expérience a permis de montrer que l'adsorption de la vapeur d'eau représente une variation de l'inertie thermique de l'ordre de 8 %. Cet ordre de grandeur correspond à l'incertitude de mesure du déphasage. Voilà pourquoi aucun écart n'a été constaté expérimentalement entre les taux d'humidité faible et élevé. En première approximation, les inerties peuvent donc être calculées à partir des propriétés moyennes des matériaux et comparées aux déphasages thermiques (voir Tableau 8). Les colonnes « ratio » sont calculées en prenant pour référence les valeurs les plus élevées, c'est-à-dire celles de la fibre de bois.

Tableau 8 : Comparaison des mesures de déphasage thermique avec les propriétés des différents isolants

| Isolant | Inertie thermique $\text{kJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ | Ratio % | Déphasage h | Ratio % |
|--------------------|---|------------|----------------|------------|
| Laine de verre | 15 | 8 | 0h40 | 17 |
| Ouate de cellulose | 76 | 38 | 1h30 | 39 |
| Fibre de bois | 202 | 100 | 3h50 | 100 |

Les ratios entre inertie thermique et déphasage thermique sont voisins, sauf pour la laine de verre où les écarts sont plus importants. Cela provient en partie de la mesure du temps de déphasage, relativement court par rapport au pas de temps des mesures (10 minutes). En effet, d'après les propriétés des matériaux secs, le temps de déphasage devrait se situer aux alentours de 20 minutes. Toutefois, ces résultats suffisent à montrer que l'isolant a un impact sur l'inertie d'une paroi légère et que cela provient plus des propriétés « globales » du matériau, c'est-à-dire en considérant la quantité moyenne d'eau contenu dans le matériau, que des transferts de masse.

C.5 Résultats : résistances thermiques

La résistance thermique mesurée sur un matériau sec et la résistance apparente sont présentées dans le Tableau 9 pour l'ensemble des configurations étudiées.

Tableau 9 : Comparaison des résistances thermiques mesurées sur les isolants secs avec les résistances apparentes pour les différentes configurations de paroi et taux d'humidité

| Configuration | Isolant | HA3 $\text{g.kg}_{\text{AS}}^{-1}$ | $R_{\text{Mat, Sec}}$ $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$ | $R_{\text{Apparente}}$ $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$ | Incertitude % | $ \Delta R $ % |
|---------------|----------------|---------------------------------------|---|--|------------------|-------------------|
| 1 | Laine de verre | Bas (2,9) | 5,0 | 4,7 | 10 | 6 |
| | | Haut (3,9) | | 4,7 | | 7 |
| 2 | | Bas (3,3) | | 4,6 | | 8 |

| | | | | | | |
|---|--------------------|------------|-----|-----|----|----|
| 3 | | Haut (4,1) | | 4,7 | | 6 |
| | | Bas (5,5) | | 4,7 | | 6 |
| | | Haut (5,6) | | 4,8 | | 4 |
| 4 | Fibre de bois | Bas (3,1) | 4,3 | 4,2 | 10 | 1 |
| | | Haut (9,4) | | 6,6 | | 54 |
| 5 | Ouate de cellulose | Bas (6,0) | 3,8 | 4,7 | 20 | 23 |
| | | Haut (8,1) | | 5,9 | | 54 |
| 6 | | Bas (5,3) | | 4,4 | | 16 |
| | | Haut (6,4) | | 4,3 | | 13 |

La dernière colonne présente la valeur absolue de l'écart relatif entre les deux résistances, comparée à la précision de la mesure. Cette précision a été estimée à partir des constats suivants :

- L'échantillon à partir duquel les propriétés ont été estimées peut ne pas être représentatif du matériau mis en œuvre ;
- La conductivité thermique varie avec la température. La résistance thermique a été estimée pour une seule température (23°C) alors que les températures mesurées lors des expériences varient entre 0 et 35°C ;
- Les conditions de stationnarité ne sont en pratique jamais atteintes et le fluxmètre peut être perturbé par les transferts de vapeur.

Voilà pourquoi il semble raisonnable de considérer une incertitude de 10 % sur les valeurs de $R_{\text{Mat, Sec}}$, 20 % pour le cas de la ouate de cellulose en raison sa faible homogénéité.

Les résultats obtenus avec la laine de verre (configurations 1, 2 et 3) évoluent peu d'une expérience à l'autre : les valeurs de $R_{\text{Mat, Sec}}$ et $R_{\text{Apparente}}$ sont en effet très proches et les écarts ne dépassent pas 8 %, ce qui reste inférieur à l'incertitude de mesure. Le taux d'humidité semble donc avoir un impact négligeable sur les performances thermiques de la laine de verre sur une gamme d'humidité comprise entre 2,9 et 5,6 g.kg_{AS}⁻¹.

Par contre, des écarts importants entre les résistances $R_{\text{Mat, Sec}}$ et $R_{\text{Apparente}}$ sont apparues pour les configurations 4, 5 et 6, c'est-à-dire avec des isolants hygroscopiques. Toutefois, les résultats ne sont pas homogènes et doivent être commentés dans le détail.

Les résultats de la configuration 5 (taux d'humidité bas) et 6 (taux d'humidité bas et haut) sont voisins et valent respectivement 23, 16 et 13 %. Bien qu'élevées, ces valeurs sont assez proches de l'incertitude de mesure pour la ouate de cellulose. Lorsque le taux d'humidité est élevé pour la fibre de bois (configuration 4) et pour la ouate de cellulose sans pare-vapeur (configuration 5), l'écart peut dépasser 50 % pour les deux isolants. La valeur de $R_{\text{Apparente}}$ étant calculée alors qu'un flux de vapeur important traverse la paroi, de l'intérieur vers l'extérieur, il est possible de conclure que le couplage entre transfert de chaleur et de vapeur ne peut être négligé.

C.6 Discussion

L'interprétation la plus plausible de ces derniers résultats tient dans la chaleur latente de vaporisation : la vapeur produite à l'intérieur de la cellule migre dans les parois isolées, et en particulier dans l'isolant si aucun pare-vapeur n'est installé. Dans le cas d'un matériau hygroscopique, une partie du flux de vapeur est adsorbée, ce qui se traduit par un dégagement de chaleur (chaleur latente de vaporisation L_{vap}). Ce terme apparaît dans les équations de transferts couplées (Eq. 5) mais pas dans le calcul de $R_{\text{Apparente}}$ (Eq. 17) puisque le couplage est négligé. D'un certain point de vue, il se produit un dégagement de chaleur à l'intérieur de l'isolant, ce qui contribue à réduire le flux qui traverse la paroi tout en maintenant constant l'écart de température. Cela conduit logiquement à une valeur plus importante de $R_{\text{Apparente}}$.

Pour cette raison, il est nécessaire de rester prudent quant à l'utilisation des valeurs de $R_{\text{Mat, Sec}}$, en particulier si l'étude se situe en conditions dynamiques et lorsque des matériaux hygroscopiques sont mis en jeu. Si cette hypothèse est vérifiée, un phénomène inverse devrait être observé lors de la désorption de la vapeur d'eau dans l'isolant : la valeur de $R_{\text{Apparente}}$ devrait être inférieure à celle de $R_{\text{Mat, Sec}}$. De fait, sur un cycle complet d'absorption / désorption, la valeur moyenne de $R_{\text{Apparente}}$ devrait être égale à celle de $R_{\text{Mat, Sec}}$, aux incertitudes de mesure près. Cependant, ces expériences ne sont pas suffisamment précises pour approfondir ce point. Des mesures en conditions contrôlées pourraient le permettre, notamment en vérifiant si ce phénomène a bien lieu lors de la phase de désorption.

D'une manière générale, les comparaisons menées ici pointent les difficultés liées à l'analyse des résultats expérimentaux en conditions non-contrôlées. Cette limite illustre l'intérêt d'utiliser des modèles numériques, les paramètres d'entrée de la simulation étant facilement modifiables, par exemple en appliquant des conditions extérieures et une production de vapeur identiques pour plusieurs configurations de paroi. Enfin, pour peu que le modèle soit validé, les différents flux peuvent être décomposés, ce qui facilite l'analyse des transferts.

D Simulation des transferts couplés

La validation des transferts dans les parois a été partiellement effectuée dans (Piot 09) : en particulier, l'étude des transferts dans les montants de l'ossature et dans la partie courante pour les configurations 1 à 3 a été présentée. Ici, l'étude est étendue aux cas des isolants fortement hygroscopiques (fibre de bois et ouate de cellulose). Une fois les transferts de chaleur et de masse validés, le rôle du flux de chaleur latent sera discuté.

D.1 Modélisation d'une paroi dans HAM-Tools

Les équations de conservation présentées au début de ce chapitre (Eq. 4, Eq. 5 et Eq. 6) peuvent être simplifiées à partir des hypothèses suivantes :

- Les transferts sont supposés unidirectionnels ;
- Pour une épaisseur élémentaire dx , la variation spatiale de la conductivité thermique est supposée négligeable ;
- La chaleur spécifique de la vapeur d'eau $C_{P,Vap}$ est négligeable devant la chaleur latente de vaporisation L_{Vap} .

Il est alors possible de décrire les équations de transfert couplées de chaleur et de masse à l'aide des équations Eq. 18 et Eq. 19. Le développement figure dans (Hens 07, ch.3).

$$\text{Eq. 18} \quad \rho_{Mat} \cdot C_P(w) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{Mat}(w) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_{Vap} \cdot \frac{\partial g_{Vap}}{\partial x}$$

$$\text{avec : } C_P(w) = C_{P,Mat} + \frac{1}{\rho_{Mat}} \cdot C_{P,l} \cdot w$$

$$\text{Eq. 19} \quad \frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{\partial g_{Vap}}{\partial x}$$

$$= - \frac{\partial}{\partial x} \left(- \delta_{Vap,Mat}(w) \cdot \frac{\partial p_{Vap}}{\partial x} \right)$$

A chaque pas de temps du calcul, le bilan massique (Eq. 19) est utilisé pour déterminer la teneur en eau des matériaux. Les valeurs de la conductivité thermique $\lambda_{Mat}(w)$, de la perméabilité à la vapeur d'eau $\delta_{Vap,Mat}(w)$ et de l'humidité relative du matériau sont ensuite mises à jour de la manière suivante :

- Pour la conductivité thermique, la relation Eq. 10 est utilisée.
- Pour les propriétés de sorption, une interpolation linéaire est effectuée à partir des mesures faites sur le matériau (voir Figure 7) et les mesures sont extrapolées pour des valeurs d'humidité relative supérieures à 94 %.
- Pour la perméabilité à la vapeur d'eau, les valeurs sont interpolées entre les deux points de mesures (humidité relative de 25 % et 75 %) et prises constantes en dehors de cette gamme.

Dans HAM-Tools, toutes les parois sont modélisées comme une succession de nœuds, chacun représentant une fraction du volume. Les parements intérieurs et extérieurs sont modélisés à l'aide de 4 nœuds et l'isolant en comporte 9 comme le montre le graphique de la Figure 14. Les capteurs étant installés entre deux couches de matériaux, la taille des mailles a été réduite au niveau des interfaces afin de permettre une meilleure comparaison avec les mesures ; elle est de l'ordre de 5.10^{-4} m dans les parements intérieurs et extérieurs, 3.10^{-3} m au niveau des interfaces de l'isolant avec les parements, et de 6.10^{-3} m au milieu de l'isolant.

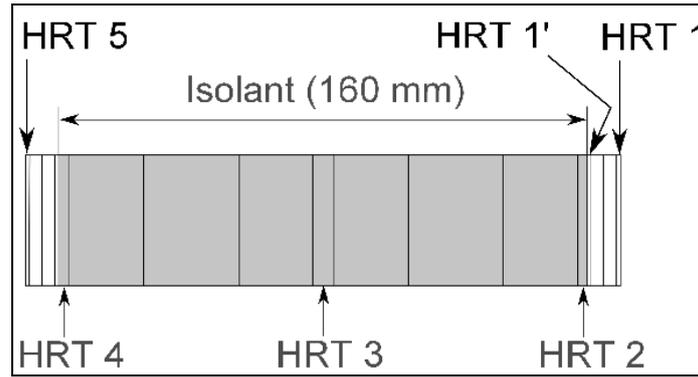


Figure 14 : Maillage d'une paroi verticale courante et rappel de la position des capteurs

Pour une maille i de largeur d , située à l'intérieur de la paroi (c'est-à-dire qu'elle n'échange pas avec l'air intérieur ou extérieur) les bilans s'écrivent comme présenté dans Eq. 20 et Eq. 21.

Eq. 20

$$\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} = \frac{1}{K} \cdot \left(\left(\frac{T_{i-1}^t - T_i^t}{R_{Th,i-1} + R_{Th,i}} + \frac{T_{i+1}^t - T_i^t}{R_{Th,i+1} + R_{Th,i}} \right) - L_{Vap} \cdot \left(\frac{p_{Vap,i-1}^t - p_{Vap,i}^t}{R_{Vap,i-1} + R_{Vap,i}} + \frac{p_{Vap,i+1}^t - p_{Vap,i}^t}{R_{Vap,i+1} + R_{Vap,i}} \right) \right)$$

$$\text{Avec: } K = \frac{1}{\rho_{Mat} \cdot C_p(w) \cdot d}$$

$$R_{Th} = \frac{d/2}{\lambda_{Mat}(w)}$$

$$R_{Vap} = \frac{d/2}{\delta_{Vap,Mat}(w)}$$

Eq. 21

$$\frac{w_i^{t+\Delta t} - w_i^t}{\Delta t} = \frac{1}{d} \cdot \left(\frac{p_{Vap,i-1}^t - p_{Vap,i}^t}{R_{Vap,i-1} + R_{Vap,i}} + \frac{p_{Vap,i+1}^t - p_{Vap,i}^t}{R_{Vap,i+1} + R_{Vap,i}} \right)$$

Au niveau des transferts entre la surface du parement intérieur et l'air intérieur, la paroi échange de la chaleur et de la vapeur d'eau par convection. Cela se traduit par l'introduction d'un coefficient d'échange thermique ($h_{C,Int}$) et massique ($h_{Vap,Int}$) comme le montre Eq. 22. Enfin, la paroi échange également par rayonnement avec les autres surfaces de la cellule, dont on considère la température moyenne ($T_{Surf,Int,Moy}$). Ces échanges sont linéarisés en introduisant le coefficient $h_{R,Int}$ (Kalagasidis 04).

Eq. 22

$$\begin{aligned} \varphi_{Int \rightarrow Paroi} &= h_{C,Int} \cdot (T_{Int} - T_{Surf}) + h_{R,Int} \cdot (T_{Surf,Int,Moy} - T_{Surf}) + L \cdot g_{Int \rightarrow Paroi} \\ g_{Int \rightarrow Paroi} &= h_{Vap,Int} \cdot (p_{Vap,Int} - p_{Vap,Surf}) \end{aligned}$$

Pour les transferts entre le parement extérieur et l'air de la lame d'air, les échanges sont simplifiés dans ce chapitre et seront développés dans le Chapitre II. Ici, la température de surface du parement extérieur est imposée (température mesurée par le capteur 5). Seuls les transferts de vapeur d'eau sont modélisés en supposant que la pression de vapeur dans l'air de la lame d'air est égale à celle de l'air extérieur (voir Figure 15). Aussi, seul le coefficient $h_{Vap,Ext}$ défini dans Eq. 23 est introduit ici pour modéliser les transferts avec l'air extérieur.

Eq. 23

$$g_{Ext \rightarrow Paroi} = h_{Vap,Ext} \cdot (p_{Vap,Ext} - p_{Vap,Surf})$$

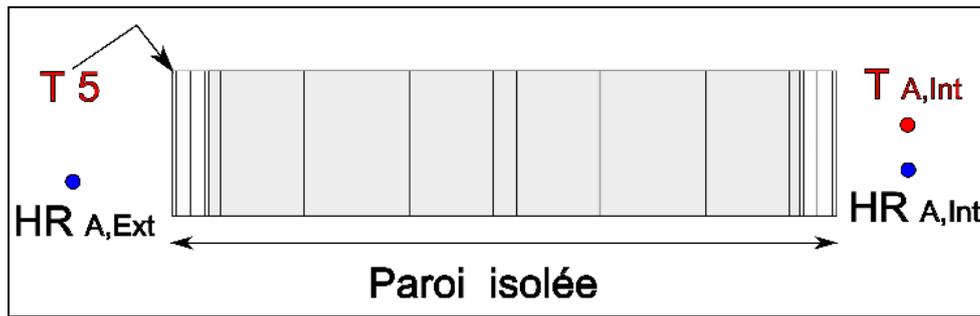


Figure 15 : Identification des conditions limites de la simulation

D.2 Simulation sur une séquence sans génération de vapeur

Les propriétés des matériaux étant connues, seuls quatre coefficients de transferts sont à identifier ($h_{C,Int}$; $h_{Vap,Int}$; $h_{R,Int}$ et $h_{Vap,Ext}$). Pour des études se situant à l'échelle du bâtiment, plusieurs études font l'hypothèse que ces différents coefficients peuvent être approchés par des constantes (Miranville 02), bien que d'autres proposent des corrélations (Hagentoft 01). Compte tenu des bons résultats obtenus par (Piot 09) avec des coefficients constants et pour de la laine de verre, les mêmes valeurs sont reprises ici et valent :

- $h_{C,Int} = 6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;
- $h_{R,Int} = 4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;
- $h_{Vap,Int} = 1.10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$;
- $h_{Vap,Ext} = 1.10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$.

Pour valider ces paramètres, une simulation est effectuée à partir d'une séquence expérimentale avec la configuration 4 (fibre de bois) qui a eu lieu du 17/11/09 au 05/03/2010, ce qui représente une durée de plus de 3 mois. Le chauffage a été réglé de manière à maintenir une température intérieure de 25°C, ce qui permet d'observer de forts écarts de température dans les parois. Il est apparu quelques journées au cours desquelles la puissance de l'appareil (1000 W) ne permettait pas de maintenir cette température cependant. Une comparaison partielle des mesures de température avec les résultats de la simulation est présentée dans le graphique de la Figure 16. La comparaison des mesures d'humidité absolue et des résultats de la simulation est présentée dans la Figure 17. Les écarts moyens et maximums en température et en humidité sont présentés dans le Tableau 10.

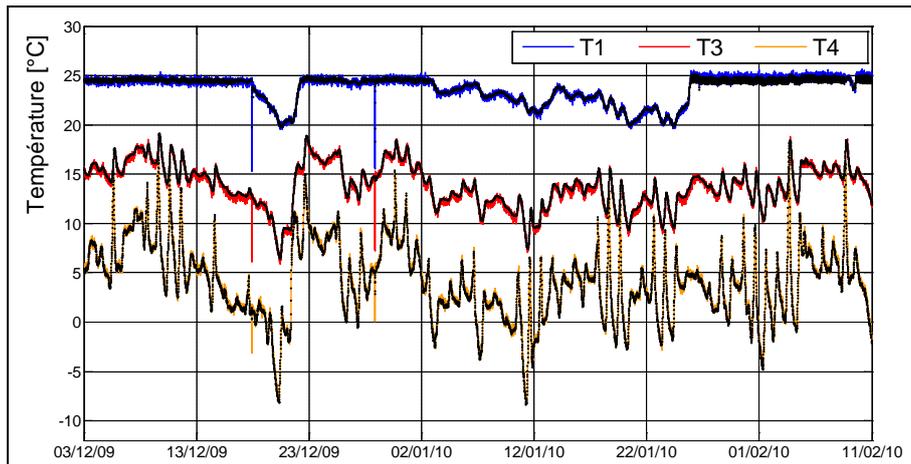


Figure 16 : Comparaison des températures mesurées (traits pleins colorés) et simulées (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4.

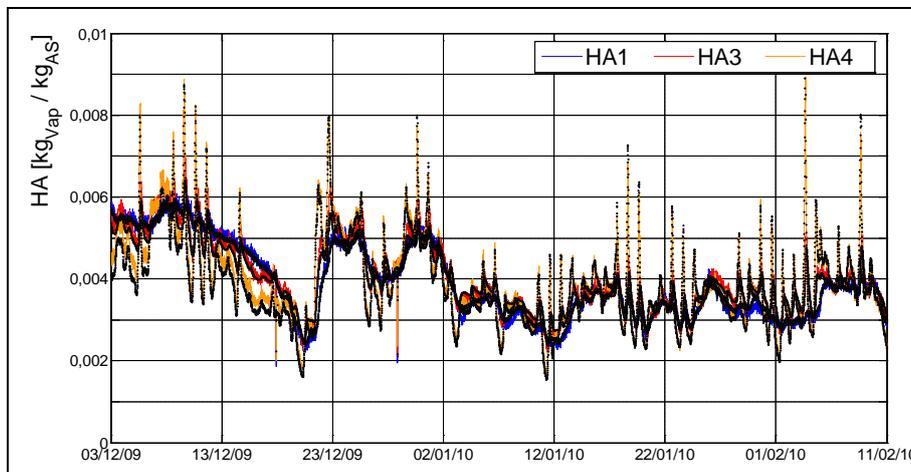


Figure 17 : Comparaison de l'humidité absolue de l'air mesurée (traits pleins colorés) et simulée (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4.

Tableau 10 : Ecarts moyens et maximums en température et en humidité aux positions des différents capteurs dans la paroi Ouest (période du 17/11/09 au 05/03/10)

| Capteur | $ \Delta T _{\text{Moyen}}$ (°C) | $ \Delta T _{\text{Max}}$ (°C) | $ \Delta HA _{\text{Moyen}}$ (g _{vap} .kg _{AS} ⁻¹) | $ \Delta HA _{\text{Max}}$ (g _{vap} .kg _{AS} ⁻¹) |
|---------|-------------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| HRT1 | 0,2 | 1,9 | 0,1 | 1,0 |
| HRT2 | 0,2 | 1,3 | 0,1 | 0,9 |
| HRT3 | 0,2 | 1,2 | 0,2 | 1,1 |
| HRT4 | 0,2 | 1,2 | 0,2 | 1,1 |
| HRT5 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 1,4 |

Les écarts moyens en température sont faibles sur l'ensemble de la séquence et inférieurs à la précision des thermo-hygromètres ($\pm 0,8^\circ\text{C}$, voir Tableau 4). Des valeurs plus importantes peuvent apparaître ponctuellement, mais leur impact est très limité dans le temps et le modèle ne dérive pas. Ces ordres de grandeur sont similaires à ceux observés par (Piot 09) avec des configurations de paroi comportant de la laine de verre. En ce qui concerne l'humidité, les écarts moyens sont là aussi relativement faibles (l'incertitude de $\pm 0,35 \text{ g.kg}_{\text{AS}}^{-1}$ pour de l'air à 10°C , 60 % HR). Cependant, des écarts ponctuels plus importants apparaissent de la même façon que les écarts de température. Enfin,

des tests ont permis de montrer qu'augmenter le nombre de mailles (jusqu'à 9 mailles dans l'isolant) ne permettait pas d'améliorer significativement la précision du modèle.

Un point souligné dans (Piot 09) concerne le choix des conditions initiales en humidité. En effet, les humidités sont mesurées au niveau des surfaces des matériaux (sauf pour l'isolant où une mesure est réalisée au point 3). Ces valeurs sont imposées en conditions initiales pour les mailles correspondant à la position des capteurs et une interpolation permet de définir les valeurs initiales des autres mailles. Cependant, la migration de la vapeur à l'intérieur de l'épaisseur des matériaux hygroscopiques est un phénomène lent devant les vitesses de transferts à la surface : il est donc possible que le profil en humidité ne soit pas linéaire sur toute l'épaisseur. La quantité d'eau globale contenue dans un matériau tel que le parement extérieur étant importante ($> 60 \text{ kg.m}^{-3}$ à 60 % HR), un écart sur les valeurs d'initialisation de la simulation peut donc avoir un impact plusieurs semaines plus tard. Cela se voit bien sur le graphique de la Figure 17 où l'humidité au point 4 est sous-estimée depuis le début de la simulation jusqu'au 17/12 (soit un mois). Toutefois, le modèle tend à retrouver les valeurs mesurées au bout d'une certaine durée, c'est-à-dire qu'il ne dérive pas non plus en humidité.

Mis à part un réglage manuel et au cas par cas, il semble difficile de proposer une méthode plus efficace en termes de définition des conditions initiales en humidité des matériaux. Simuler le comportement de la paroi plusieurs semaines avant la période étudiée peut permettre de limiter les écarts.

D.3 Simulation d'une séquence avec génération de vapeur

Les performances du modèle pour une paroi comportant un isolant hygroscopique ont donc été jugées satisfaisantes en l'absence de sollicitations internes. Afin d'étendre la validation du modèle, une séquence avec production de vapeur a été étudiée. Elle s'est déroulée du 12/03/10 au 21/03/10 et la phase de production de vapeur dure 48h, entre le 15/03 et le 17/03. Quatre générateurs ont été utilisés simultanément. Le débit et la quantité exacts de vapeur générée ne sont pas connus et sont estimés à $0,31 \text{ kg}_{\text{vap}}.\text{h}^{-1}$ et $15,5 \text{ kg}_{\text{vap}}$ respectivement.

En parallèle de la production de vapeur, des apports solaires importants ont eu lieu durant cette séquence. De ce fait, des variations de plus de 20°C sont mesurées au cours d'une journée au niveau du capteur 4. Ces fortes variations en température sont également visibles en humidité : lorsque le parement extérieur subit cette élévation de température, il désorbe de la vapeur d'eau qui se propage vers l'intérieur de la paroi isolée. A ce moment là, le flux de vapeur est de sens opposé à celui provoqué par les sollicitations internes. Puis, la température du parement diminue et le phénomène inverse se produit. Plus généralement, il apparaît que les variations de température les plus fortes correspondent avec la fin de la phase de production de vapeur. Les transferts qui se sont développés durant cette phase sont donc susceptibles d'être complexes.

Afin de limiter les écarts liés à l'initialisation en humidité des matériaux, la simulation a débuté plus d'un mois avant la période étudiée. Les résultats sont comparés aux mesures de température dans le graphique de la Figure 18 et aux mesures d'humidité absolue dans le graphique de la Figure 19. Les écarts sont donnés dans le Tableau 11 et ont été décomposés en trois phases, avant la génération de vapeur (du 13/03 au 15/03) pendant (du 15/03 au 17/03) et plusieurs jours après (du 21/03 au 23/03).

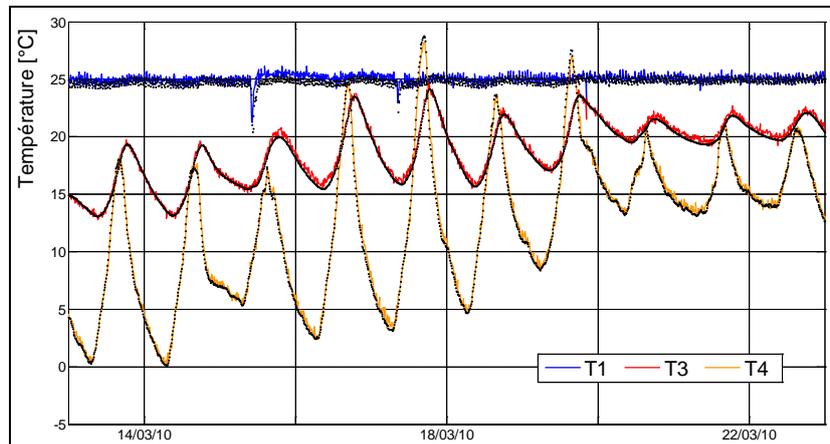


Figure 18 : Comparaison de la température mesurée (traits pleins colorés) et simulée (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4.

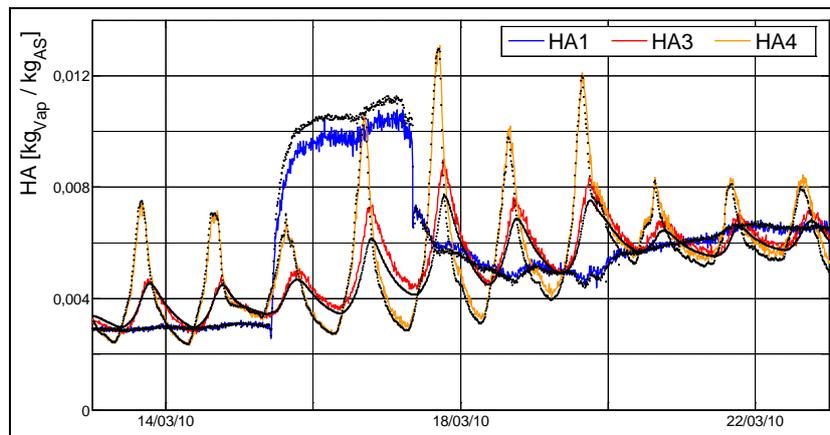


Figure 19 : Comparaison de l'humidité absolue de l'air mesurée (traits pleins colorés) et simulée (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4.

Les performances du modèle en température avant la génération de vapeur sont similaires à celles observées sur la séquence précédente. Le calcul des écarts fait apparaître des valeurs légèrement plus importantes lors de la génération de vapeur : les écarts moyens aux points 2, 3 et 4 ont augmenté de 0,2°C, mais restent inférieurs à la précision de la mesure (0,8°C). Enfin, les écarts après la génération de vapeur diminuent pour revenir au même niveau que les écarts avant la génération de vapeur. De manière plus générale, les variations observées ici ne sont pas assez importantes pour être significatives.

Avant la production de vapeur, les performances du modèle en humidité sont similaires à celles observées sur la séquence précédente. Lors de la phase de génération par contre, les écarts

deviennent plus importants, en particulier au point 1 (parement intérieur) où le modèle surestime l'humidité de $0,6 \text{ g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$. Au point 3, les écarts sont irréguliers : en particulier, l'augmentation de l'humidité due aux variations de température est mal représentée et les écarts dépassent $1,2 \text{ g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$ le 16/03 à 18h00. Or, le 17/03 à 6h00, l'écart n'est plus que de $0,4 \text{ g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$ alors que la phase de production de vapeur n'était pas encore terminée. Cette forte variation dans les performances du modèle montre que les écarts observés ici proviennent de la combinaison des sollicitations intérieures et extérieures. Après la génération de vapeur, les écarts sont du même ordre de grandeur qu'avant la phase de production de vapeur, sauf au niveau du point 4 où le modèle sous-estime l'humidité de $0,4 \text{ g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$.

Tableau 11 : Ecart moyen et maximaux en température et en humidité dans la paroi Ouest (période du 13/03/10 au 23/03/10) avant, pendant et après la génération de vapeur.

| | Avant génération | | Pendant génération | | Après génération | |
|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | $ \Delta T _{\text{Moy}}$ (°C) | $ \Delta T _{\text{Max}}$ (°C) | $ \Delta T _{\text{Moy}}$ (°C) | $ \Delta T _{\text{Max}}$ (°C) | $ \Delta T _{\text{Moy}}$ (°C) | $ \Delta T _{\text{Max}}$ (°C) |
| HRT1 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | 0,8 | 0,3 | 0,7 |
| HRT2 | 0,2 | 0,6 | 0,4 | 0,8 | 0,2 | 0,7 |
| HRT3 | 0,2 | 0,9 | 0,4 | 1,3 | 0,3 | 1,0 |
| HRT4 | 0,3 | 2,0 | 0,5 | 2,1 | 0,3 | 1,4 |

| | Avant génération | | Pendant génération | | Après génération | |
|------|--|--|--|--|--|--|
| | $ \Delta HA _{\text{Moy}}$ ($\text{g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$) | $ \Delta HA _{\text{Max}}$ ($\text{g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$) | $ \Delta HA _{\text{Moy}}$ ($\text{g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$) | $ \Delta HA _{\text{Max}}$ ($\text{g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$) | $ \Delta HA _{\text{Moy}}$ ($\text{g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$) | $ \Delta HA _{\text{Max}}$ ($\text{g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$) |
| HRT1 | 0,1 | 0,3 | 0,6 | 1,6 | 0,1 | 0,4 |
| HRT2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,8 | 0,1 | 0,3 |
| HRT3 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 1,2 | 0,2 | 0,6 |
| HRT4 | 0,2 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 0,4 | 0,6 |
| HRT5 | 0,2 | 0,9 | 0,3 | 0,8 | 0,2 | 1,1 |

D.4 Discussion

De manière générale, les performances du modèle en température et en humidité sont un peu moins bonnes lors de la phase de génération de vapeur. Cependant, les profils de température et d'humidité sont à nouveau correctement représentés après la génération de vapeur. Cela signifie que les écarts concernent essentiellement le comportement dynamique de la paroi et que les transferts globaux sont correctement modélisés.

Toutefois, une légère dérive a été observée au niveau du point 4 à l'issue de cette séquence expérimentale. Il est difficile de conclure sur ce point : ces écarts pourraient être liés aux fortes variations de température du parement extérieur (panneau d'aggloméré), dont les propriétés hygroscopiques ont été déterminées pour 23°C uniquement. D'autre part, ces écarts pourraient résulter d'une mauvaise estimation du transport de la vapeur produite à l'intérieur de la cellule à travers l'isolant. Enfin, il pourrait s'agir d'une combinaison de plusieurs phénomènes.

Pour étendre l'analyse des performances du modèle, une séquence expérimentale avec de la ouate de cellulose a été simulée (Annexe 3). La principale différence entre les deux séquences provient du fait que les conditions extérieures, et donc la température du parement extérieur, sont restées plus stables tout au long de cette seconde expérience. Des écarts similaires sont apparus sur l'humidité de l'isolant durant la production de vapeur. Toutefois, aucune dérive n'a été constatée à la fin de la phase de génération de vapeur.

Aussi, les écarts et pistes d'amélioration peuvent être décomposés en deux types :

- Prise en compte de la dynamique des transferts : sous l'effet d'une sollicitation hygrique importante, le modèle estime le taux d'humidité dans l'isolant avec une précision moindre. Toutefois, ces écarts ne produisent pas de dérive ;
- Effet des variations de température sur les transferts de vapeur : lorsque d'importantes variations de température sont appliquées au parement extérieur, le comportement en humidité du matériau est mal représenté par le modèle et peut conduire à une dérive. Une étude approfondie des transferts thermo-hygriques à l'échelle du matériau pourrait permettre d'améliorer ce point.

Ces pistes d'amélioration se situent donc essentiellement à l'échelle du matériau. D'une certaine manière, cela montre aussi les limites de la validation d'un modèle à partir de mesures effectuées en conditions réelles : la complexité des sollicitations peut rendre plus difficile l'analyse des résultats et l'ajustement du modèle. A l'échelle de la paroi toute entière, la précision du modèle est jugée satisfaisante, bien que des écarts puissent apparaître ponctuellement lors de sollicitations hygriques et thermiques prononcées. A l'échelle du bâtiment, et donc pour des simulations appliquées à des périodes de plusieurs mois, voire d'années, ces écarts ne devraient pas influencer significativement l'estimation des performances de l'enveloppe.

À ce stade du développement du modèle, il n'est pas encore pertinent de proposer une comparaison numérique des différentes enveloppes (c'est-à-dire en se plaçant à l'échelle du bâtiment). Une comparaison pourrait être proposée en se basant sur la réponse des différentes configurations de parois à une production de vapeur et de chaleur identiques. Cependant, les simulations s'appuient jusqu'à présent sur la connaissance de l'humidité relative de l'air intérieur et sur celle de la température du pare-pluie. D'une part, les effets de la production de vapeur sur l'humidité de l'air intérieur dépendent du bilan en humidité à l'échelle de la cellule : c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de déterminer quelle sera l'humidité de l'air intérieur à partir de la connaissance de la production de vapeur uniquement. D'autre part, le flux de chaleur qui traverse la paroi isolée dépend en partie du comportement de la lame d'air, qui n'est pas encore validé : par extension, la validation actuelle du modèle ne permet donc pas de déterminer la température du parement extérieur. Dans l'immédiat, il est donc plus intéressant d'utiliser l'outil de simulation pour identifier les différents transferts qui se développent dans la paroi pour des sollicitations complexes, c'est-à-dire lorsque l'analyse des résultats expérimentaux est la plus difficile.

D.5 Retour sur le calcul de la résistance thermique apparente

A partir de la séquence expérimentale précédente (configuration 4, fibre de bois, génération de vapeur), les équations couplées utilisées dans la simulation (Eq. 20 et Eq. 21) ont été décomposées en 7 termes de la façon suivante :

Eq. 24

$$\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} = \frac{1}{K} \cdot \left(\left(\frac{T_{i-1}^t - T_i^t}{R_{Th,i-1} + R_{Th,i}} + \frac{T_{i+1}^t - T_i^t}{R_{Th,i+1} + R_{Th,i}} \right) - L_{Vap} \cdot \left(\frac{P_{Vap,i-1}^t - P_{Vap,i}^t}{R_{Vap,i-1} + R_{Vap,i}} + \frac{P_{Vap,i+1}^t - P_{Vap,i}^t}{R_{Vap,i+1} + R_{Vap,i}} \right) \right)$$

(1) (2) (3) (4) (5) (6)

Eq. 25

$$\frac{w_i^{t+\Delta t} - w_i^t}{\Delta t} = \frac{1}{d} \cdot \left(\frac{P_{Vap,i-1}^t - P_{Vap,i}^t}{R_{Vap,i-1} + R_{Vap,i}} + \frac{P_{Vap,i+1}^t - P_{Vap,i}^t}{R_{Vap,i+1} + R_{Vap,i}} \right)$$

(7) (5) (6)

Grâce à l'outil de simulation, tous les termes peuvent être observés séparément et pour chaque nœud de la paroi. Ici, pour commenter les transferts de chaleur et de vapeur, il a été décidé de n'en retenir que quelques-uns au niveau du point 2 (nœud de l'isolant le plus proche du parement intérieur). Les termes (6) et (7) sont comparés dans le graphique de gauche de la Figure 20, les termes (4) et (7) dans le graphique de droite.

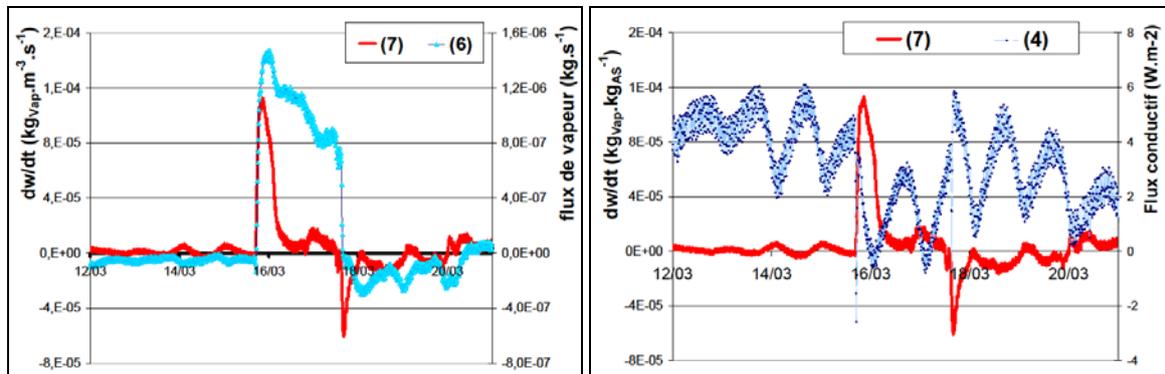


Figure 20 : Comparaison du flux de vapeur au point 2 de la paroi Ouest avec la variation de masse (gauche) et comparaison du flux de chaleur conductif avec la variation de masse (droite) pour la configuration 4, du 12/03 au 21/03/2012

Lors de la phase de production de vapeur, le flux de vapeur (6) devient nettement plus important et change de sens, ce qui traduit le fait que la vapeur migre de l'intérieur de la cellule vers l'extérieur. Au début de la production de vapeur, une partie importante du flux est absorbée par le matériau (7). Puis au bout de quelques heures, la proportion absorbée devient beaucoup plus faible, ce qui signifie qu'une plus grande partie de la vapeur traverse ce nœud vers les couches extérieures de la paroi. Au total, le taux d'humidité w de ce nœud a augmenté de $9,6 \text{ g.m}^{-3}$ sur l'ensemble de la phase de production de vapeur, dont 82 % a été absorbé sur les 15 premières heures (34 % du temps de la production de vapeur).

D'une certaine façon (7) représente aussi le dégagement de chaleur latente à un facteur près. Cet apport local d'énergie contribue alors à réduire le flux de chaleur mesuré entre le parement intérieur et l'isolant. Cela se voit sur le terme (4) dans le graphique de droite de la Figure 20 : dès le début de la phase de production de vapeur, il apparaît un saut brutal de $4,3 \text{ W.m}^{-2}$ à $2,7 \text{ W.m}^{-2}$ (soit une diminution de 37 %). Toutefois, ce décalage ne semble pas être compensé par la suite alors que la prise de masse devient moins importante. En effet, lorsque l'adsorption de vapeur d'eau devient moins importante, le flux de vapeur atteint une couche de l'isolant plus profonde où le phénomène se répète. Ainsi, l'isolant est « chauffé » de l'intérieur et le flux conductif diminue tant que le phénomène d'adsorption est observé, c'est-à-dire ici, sur toute la durée de la production de vapeur. Ce dégagement de chaleur latente permet donc de maintenir une température aux extrémités de l'isolant pour un flux conductif moindre. Il est donc logique de calculer une valeur de la résistance thermique apparente inférieure à la valeur mesurée sur des matériaux secs (Chapitre IC.5).

Cet exemple illustre l'intérêt d'utiliser des outils de simulation : alors qu'il est difficile d'analyser des mesures ayant eu lieu dans des situations complexes, l'outil permet de décomposer les différents flux et facilite l'analyse des résultats.

E Synthèse

La cellule expérimentale a été instrumentée afin de permettre un suivi en humidité et en température, notamment en ce qui concerne la partie courante des parois verticales. Les propriétés thermo-hygriques de l'ensemble des matériaux testés ont été mesurées en laboratoire. Six configurations de paroi ont été testées depuis la mise en service de la cellule, chacune avec des propriétés hygroscopiques différentes. En particulier, deux isolants fortement hygroscopiques (fibre de bois et ouate de cellulose) ont été testés en comparaison avec de la laine de verre, matériau faiblement hygroscopique. Chacune des six configurations de paroi a été testée pendant plusieurs mois. Toutes ont été soumises à une période de production de vapeur d'eau suivie d'une période d'évolution libre, de manière à permettre l'observation des transferts de masse à travers l'enveloppe. La comparaison des différentes configurations de paroi n'est pas triviale du fait du changement des conditions extérieures et intérieures d'une expérience à l'autre, mais l'analyse des résultats expérimentaux a permis de mettre en évidence plusieurs différences significatives (Labat *et al.* 12c).

Tout d'abord, le remplacement de la laine de verre par des isolants hygroscopiques a permis d'augmenter significativement l'inertie thermique de la paroi. Toutefois, ces écarts proviennent des propriétés thermiques et non hygriques des matériaux et cet impact n'est significatif que pour des bâtiments à ossature légère. Le second élément de comparaison concerne le couplage des transferts de chaleur et de vapeur. En particulier, il a été mis en évidence que le flux de chaleur qui traverse les parois diminue significativement lorsque d'importantes quantités de vapeur d'eau sont adsorbées par un isolant hygroscopique. L'explication réside dans le flux de chaleur latent de la vapeur d'eau, c'est-à-dire l'énergie dégagée lors du changement de phase vapeur vers la phase liquide. En toute logique,

un phénomène inverse devrait apparaître lorsque l'isolant désorbe de la vapeur d'eau. Toutefois, il est difficile de vérifier ces conclusions à partir des mesures uniquement, l'expérience se situant en conditions non-contrôlées. Des expériences en laboratoire cherchant à vérifier ce constat ou des simulations menées pour des sollicitations simples permettraient d'approfondir ce point. Cela illustre donc l'intérêt d'un outil de modélisation.

L'outil de transferts couplés HAM-Tools a ensuite été utilisé pour simuler les transferts dans les parois en imposant les mesures de température et d'humidité en conditions limites. L'étude et la validation des transferts dans les parois comportant de la laine de verre ayant déjà été réalisé dans (Piot 09), ce chapitre s'est limité à la validation des transferts dans les parois comportant des isolants hygroscopiques.

Une première séquence, d'une durée de trois mois et sans sollicitations hygriques, a permis de valider le maillage de la paroi, l'initialisation de la température et de l'humidité des matériaux, la prise en compte des propriétés des matériaux et la modélisation des transferts avec l'air intérieur et extérieur. Puis une seconde simulation a porté sur une séquence expérimentale pour laquelle des sollicitations hygriques et thermiques ont eu lieu simultanément du fait de fortes variations des conditions extérieures. Des écarts plus importants entre les mesures et les résultats de la simulation sont apparus : les écarts moyens en température sont restés inférieurs à la précision des capteurs ($0,8^{\circ}\text{C}$), par contre, des écarts pouvant atteindre $0,6 \text{ g}_{\text{vap}}\cdot\text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$ sont apparus en humidité et une légère dérive a été constatée ($0,2 \text{ g}_{\text{vap}}\cdot\text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$). La comparaison avec une séquence expérimentale aux sollicitations moins sévères a permis de conclure que cette dérive est liée aux fortes variations de température du parement extérieur, constitué d'un matériau fortement hygroscopique (panneaux d'agglomérés). Une étude approfondie du couplage des transferts à l'échelle du matériau et pour des sollicitations variées pourrait permettre d'améliorer le modèle sur ce point. Toutefois, le modèle permet de décomposer les transferts qui ont lieu dans un isolant hygroscopique lors de la phase d'adsorption et de vérifier l'effet de la chaleur latente sur le bilan énergétique constaté expérimentalement.

Les performances de ce modèle de paroi sont donc suffisantes pour qu'il puisse être intégré à une simulation des transferts couplés à l'échelle du bâtiment. Les chapitres suivants vont donc s'attacher à décrire et à valider les autres transferts qui se développent à cette échelle.

Chapitre II

Modélisation des transferts dans la lame d'air ventilée

A Définition de la problématique

La fonction première d'un bardage est de protéger la paroi isolée de la pluie battante afin d'en améliorer la durabilité. Si le matériau utilisé est opaque, il agit également comme un écran au niveau des transferts radiatifs et limite ainsi les apports solaires et les transferts avec la voûte céleste. Dans le cas d'un bardage ventilé, le renouvellement d'air dans la lame d'air favorise les transferts de vapeur avec la paroi isolée et limite le transport d'eau liquide à travers le bardage. Une présentation plus approfondie peut être trouvée dans les travaux de thèse de (Nore 09), intégralement consacrés aux bardages ventilés.

De manière générale, le bardage limite l'impact des conditions extérieures sur la paroi isolée. Pour une première approche en modélisation, cet élément de construction permet de prendre en compte des conditions aux limites simplifiées. Une approche simplifiée consiste à considérer que l'air de la lame d'air est à la température et humidité relative de l'air extérieur et que le renouvellement de la lame d'air est constant quelles que soient les conditions extérieures (Hägersted et Hardeerup 11). Pour une approche réaliste cependant, il est nécessaire de prendre en compte l'impact des conditions extérieures plus en détail. Par exemple, il peut être intéressant de déterminer le débit de la lame d'air en fonction de la vitesse et de la direction du vent (Nore 09, Gudum 03). Dans ces deux cas, les expériences menées en climat réel ont mis ce phénomène en évidence mais ont abouti à l'utilisation de formules empiriques spécifiques aux bâtiments testés. En effet, (Nore *et al.* 10) précisent que la grande variété de géométrie de bardage rend toute généralisation difficile.

A ce stade, il est intéressant de remarquer que les auteurs mentionnent le rôle potentiel des effets thermiques sur le comportement de la lame d'air mais ne les modélisent pas (Gudum 03, Nore 09). En effet, les parois étudiées étaient orientées Nord afin de limiter l'influence des apports solaires

(Desta *et al.* 11) ce qui justifie cette simplification. Dans le cas de la cellule étudiée dans ce projet, cette hypothèse n'est plus vraie car toutes les orientations sont prises en compte, y compris lors de périodes d'ensoleillement direct important. De plus, (Piot *et al.* 11) précisent que les apports solaires peuvent avoir un impact conséquent sur les transferts de vapeur d'eau. Dans la Figure 21, les mesures météorologiques ont été utilisées pour estimer les apports solaires totaux reçus par la face Est de la cellule au cours du mois d'août 2011 et la vitesse du vent est reportée dans le second graphique.

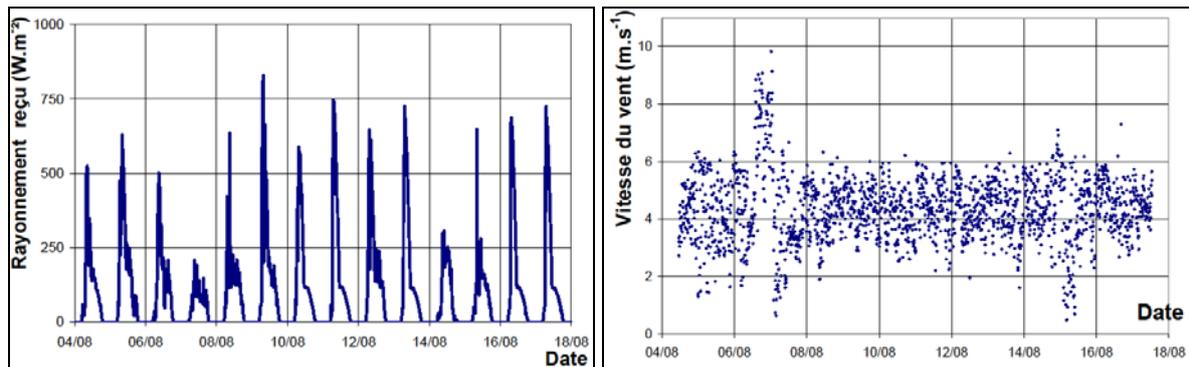


Figure 21 : Densité de puissance du rayonnement solaire reçu par la face Est de la cellule (gauche) et vitesse du vent mesurée à une altitude de 10 m (droite).

Le rayonnement reçu par le bardage atteint fréquemment 500 W.m^{-2} et peut dépasser 800 W.m^{-2} en pic (le 09/08/2011). (Marinosci *et al.* 11) ont mesuré un échauffement de plus de 15°C de la paroi extérieure d'une cavité ventilée pour des apports de 450 W.m^{-2} et ont mis en évidence un fort impact sur la vitesse de la lame d'air. La problématique associée au bardage se situe donc directement au niveau du couplage des transferts de chaleur et d'air. Les transferts d'humidité sont moins influents, bien qu'impactés par le champ de température. Par ailleurs, la vitesse du vent étant relativement régulière au cours de cette période et les études préliminaires ayant montré le fort impact du rayonnement solaire, l'étude du bardage se rapproche de thématiques de recherche associées aux écoulements d'air provoqués par convection naturelle. Les études des façades à double peau (Balocco 02, Hensen *et al.* 02, Saelens *et al.* 04, Gavan 09, Kuznik *et al.* 11), de l'intégration des panneaux photovoltaïques au bâtiment (Gan 09, Lau *et al.* 12), de cheminées solaires (Punyasompun 09), de collecteurs solaires (Rodrigues *et al.* 00) ou de la ventilation passive (Ziskind *et al.* 02, Letan *et al.* 03) présentent des similitudes avec le cas étudié ici, notamment en ce qui concerne la prise en compte des conditions limites dynamiques. Toutefois, ces géométries sont assez éloignées de celle du bardage étudié.

Il s'agit d'un bardage à claire voie composé de 44 lames de dimensions $5*0,08*0,02 \text{ m}^3$ (Longueur*Hauteur*Largeur), verticalement séparées par un vide d'air d'environ $0,008 \text{ m}$. L'entrée de la lame d'air est terminée par une grille dont les orifices sont suffisamment larges pour ne pas perturber significativement l'écoulement de l'air (ils représentent plus de 60 % de la surface). Le haut de la lame d'air est fermé par la toiture, aussi l'orifice de sortie est un vide d'air de $0,008 \text{ m}$, identique à l'espacement qui existe entre chaque lame. Enfin, des montants verticaux espacés de $0,6 \text{ m}$ maintiennent les lames du bardage par groupe de six. Ces montants ferment ainsi la lame d'air, ce

qui a pour effet de créer plusieurs cavités indépendantes les unes des autres. Enfin, la lame d'air définie entre le bardage et le pare-pluie est d'une épaisseur de 0,027 m. Une photographie en propose une illustration dans la Figure 22.

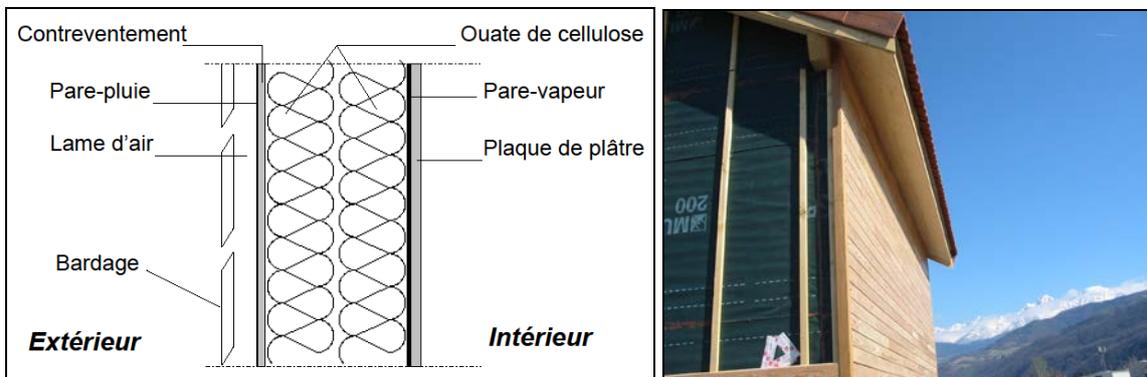


Figure 22 : Schéma de la paroi courante (gauche) et photographie de l'angle Sud-Ouest prise durant la construction de la cellule, la face Sud seule étant équipée d'un bardage à cette étape des travaux (droite)

La lame d'air ventilée peut être considérée comme un canal vertical ouvert asymétriquement chauffé. Des configurations similaires ont été étudiées expérimentalement par (Habib *et al.* 02) et numériquement par (Fedorov et Viskanta 97, Lau *et al.* 12) entre autres. (Fossa *et al.* 08) mettent en avant la sensibilité de l'écoulement à la largeur du canal et ont étudié l'influence de la répartition des sources. (Sanjuan *et al.* 11) insistent sur l'impact d'entrées d'air dans la lame d'air, tandis que (Marinosci *et al.* 11) montrent que cet impact est négligeable pour une géométrie de bardage différente. Le comportement thermo-aéraulique de la lame d'air étant sensible à plusieurs paramètres, il semble donc difficile d'extrapoler les résultats de la littérature au cas spécifique étudié ici, d'autant plus que l'étude se place en conditions climatiques réelles.

Dans le but d'améliorer la modélisation des transferts de chaleur au niveau du bardage dans HAM-Tools, il a été décidé de caractériser expérimentalement le comportement de la lame d'air lorsque le bardage est soumis à un rayonnement solaire important. Pour cela, des études préliminaires ont été menées à l'aide de deux outils : la thermographie infrarouge et la simulation numérique CFD (Computational Fluid Dynamics). Sur la base de ces observations, l'instrumentation du bardage a été étendue et a permis de définir une séquence expérimentale de référence permettant d'établir et de valider la modélisation des transferts d'air et de chaleur autour du bardage. Enfin, ces résultats ont été implantés dans HAM-Tools et sont discutés à la fin de ce chapitre.

B Caractérisation expérimentale

B.1 Un premier outil, la thermographie infrarouge

La mesure de la température de la face extérieure du bardage impose des contraintes différentes des mesures de température faites dans la paroi car le rayonnement solaire direct risque d'échauffer un capteur ponctuel (thermocouple, thermo-hygromètre) et perturber la mesure. De plus, utiliser un nombre limité de mesures ponctuelles présente toujours le risque de mal représenter le champ de température, surtout si ce dernier est inhomogène.

Une alternative intéressante consiste à faire appel à la thermographie infrarouge. Cette technique de mesure est développée depuis plusieurs années et a été utilisée avec succès en ambiances contrôlées ou non. (Korukçu et Kilic 09) s'en sont servis pour effectuer des mesures dynamique de température dans l'habitacle d'une automobile, (Bazilian *et al.* 02) pour mesurer l'échauffement de panneaux photovoltaïques en conditions réelles, (Dactu *et al.* 05) pour détecter un défaut d'isolation dans le mur d'un bâtiment.

Toutefois, cette technique ne permet pas de réaliser une mesure directe : en effet, une caméra infrarouge ne mesure pas une température mais la densité du flux de chaleur radiatif. Pour le cas particulier d'un corps noir, elle s'exprime de la façon suivante :

$$\text{Eq. 26} \quad \varphi_R = \sigma_0 \cdot T^4$$

Dans le domaine du bâtiment, les matériaux peuvent être assimilés à des corps gris caractérisés par leur émissivité ε . Ainsi, ils n'absorbent pas la totalité du rayonnement incident mais en renvoient une partie que mesure la caméra infrarouge. Aussi, il est nécessaire de considérer l'équation Eq. 27 présentée dans (Buchlin 02).

$$\text{Eq. 27} \quad \varphi_{R,SE} = \varepsilon_{Lame} \cdot \sigma_0 \cdot T_{SE}^4 + (1 - \varepsilon_{Lame}) \cdot \sigma_0 \cdot T_{Env}^4$$

La mesure de température doit donc nécessairement être accompagnée de la mesure de l'émissivité du bardage et de celle de la température de l'environnement. L'émissivité de chaque lame du bardage a été estimée par comparaison (Bazilian *et al.* 02) avec un morceau de scotch noir d'excellente conductivité thermique collé sur chaque lame et dont l'émissivité est de $0,88 \pm 0,01$. Cette mesure est effectuée une seule fois et en l'absence de rayonnement solaire. La précision de cette méthode a été validée par comparaison avec des mesures faites en laboratoire avec un pyrgomètre hémisphérique.

La température de l'environnement T_{Env} est estimée à l'aide d'un matériau très réfléchissant aux infrarouges ne privilégiant aucune direction particulière (ici, une feuille d'aluminium froissée). Des mesures préliminaires ont permis de constater que la température de l'environnement n'est pas

homogène sur toute la hauteur de la paroi. Aussi elle est estimée à cinq hauteurs différentes comme le montrent les photos de la Figure 23.



Figure 23 : Scotch noir et la feuille d'aluminium permettant d'estimer respectivement l'émissivité des lames et la température de l'environnement

Une caméra infrarouge FLIR A-320 a été utilisée pour mesurer la température de surface du bardage de la face Est de la cellule lorsque ce dernier est soumis à un rayonnement solaire. La résolution de la caméra est de 320×420 pixels et elle est sensible aux rayonnements dont la longueur d'onde est comprise entre 7,5 et 13,0 μm . Le matériel n'étant pas protégé contre l'eau liquide, les mesures ont été effectuées sur des durées limitées (entre l'aube jusqu'à une heure après la fin des apports directs) avec une fréquence d'acquisition d'une minute. Le logiciel de pilotage Researcher® permet d'assigner l'émissivité et la température de l'environnement pour chaque point de mesure et pour chaque cliché de la paroi. Ainsi, la précision de la mesure est estimée à $\pm 1^\circ\text{C}$ (voir Annexe 4 pour le détail des calculs), ce qui est voisin des conclusions de (Dactu *et al.* 05).

B.2 Mesures de la température de surface du bardage

Des mesures préliminaires ont permis de constater que la température du bardage variait essentiellement avec la hauteur et était homogène sur la largeur. Par souci de simplification, les phénomènes sont supposés bidimensionnels et les effets au niveau des angles de la cellule non représentatifs du comportement de la paroi courante. Aussi, les mesures se limitent au cas de la lame d'air comprise entre le montant central de la paroi Est et le montant situé juste à sa droite (au Nord). La température moyenne des 44 premières lames de cette partie de la lame d'air est mesurée. Les lames les plus hautes du bardage ne sont pas prises en compte car supposées spécifiques à la partie centrale de la paroi de par l'inclinaison de la toiture (la position de la 44^{ème} lame correspond à l'extrémité de la feuille d'aluminium la plus haute dans la Figure 23).

Les mesures de température du 16/08/2011 sont typiques d'une journée ensoleillée et par temps calme. Elles sont présentées dans les graphiques de la Figure 24 sous deux formes différentes afin de donner une idée des températures mesurées sur le bardage. La température est tracée en fonction de l'heure solaire (midi correspond au zénith dans la course du soleil) et de la hauteur relative du point de mesure ($z^* = 1$ correspond à la 44^{ème} lame, soit une hauteur de 3,8 m par rapport au bas

du bardage). Enfin, la comparaison avec les mesures de température de l'air extérieur T_{Ext} et du pare-pluie T_{pp} à mi-hauteur permet de donner une idée de l'échauffement du bardage et de son impact sur la paroi isolée.

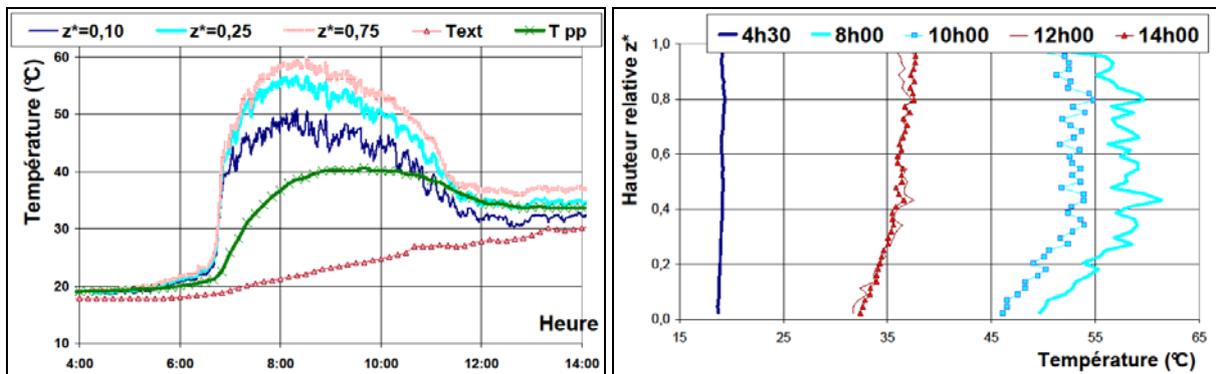


Figure 24 : Evolution de la température de surface du bardage pour quelques hauteurs relatives (gauche) et sélection de profils de température (droite). Mesures du 16/08/2011.

Ces mesures montrent clairement l'impact du soleil sur la température du bardage. Ce type d'expérience a été répété à plusieurs reprises et pour différentes conditions (voir Annexe 4), ce qui permet de formuler les conclusions générales suivantes :

- Avant l'aube, la température du bardage est homogène sur la totalité de la hauteur à la précision des mesures près. Cette température et celles de l'air extérieur et du pare-pluie sont voisines à un degré près ;
- Dès que le bardage est exposé au rayonnement solaire direct (environ 6h30 ici), la température de sa surface augmente quelle que soit la position considérée. La température du pare-pluie augmente également, mais l'échauffement est « amorti » par le bardage et la lame d'air ;
- L'échauffement du bardage n'est pas homogène : la température la plus faible est mesurée tout en bas du bardage, le point le plus chaud situé aux alentours de $z^* = 0,7$. La température est relativement homogène ($\pm 3^\circ\text{C}$) au dessus de $z^* = 0,25$. L'écart de température entre le bardage et l'air extérieur peut avoisiner les 40°C dans ces conditions ;
- De 9h00 à 11h30, les apports solaires directs diminuent progressivement ainsi que les températures de surface du bardage ;
- En après midi, la température du bardage varie plus modérément et se rapproche progressivement de la température de l'air extérieur. La température est homogène à $\pm 2^\circ\text{C}$ sur l'ensemble de la hauteur. A hauteur relative égale enfin, la température du bardage est très proche de celle du pare-pluie.

Par ailleurs, il est intéressant de noter qu'une mesure menée sur la face Sud a montré un comportement voisin, mais les sollicitations sont différentes. Tout d'abord, les apports solaires sont moins importants en été de par l'orientation et la position du soleil. D'autre part, l'avancée de la toiture agit comme un masque sur le tiers supérieur du bardage comme le montrent les clichés infrarouges de la Figure 25.

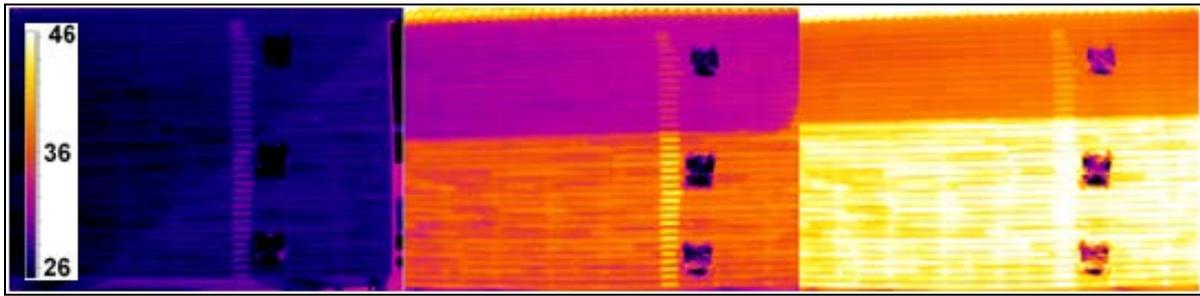


Figure 25 : Clichés infrarouges de la face Sud pris à 7h40 (gauche), 9h40 (centre) et 11h40 (droite). L'échelle de température est commune aux trois clichés et comprise entre 26 et 46°C.

Ces premières mesures permettent de constater l'impact des apports solaires sur la température du bardage. Bien que l'étude soit restreinte à la partie centrale de la paroi, les mesures mettent en évidence un comportement différent selon la hauteur, c'est-à-dire un effet bidimensionnel. Il est fortement probable que la convection autour du bardage et dans la lame d'air joue un rôle à ce niveau, mais les mesures actuelles sont insuffisantes pour le caractériser.

Pour cette raison, il a été décidé d'avoir recours à un second outil pour améliorer la connaissance des transferts de chaleur et de masse autour du bardage. L'étude se limite volontairement au cas de la paroi Est en été afin de ne pas prendre en compte les problématiques de masque solaire et de se concentrer sur le cas de la sollicitation thermique la plus forte.

B.3 Un outil numérique, la simulation CFD

La simulation CFD est un outil utilisé par plusieurs auteurs pour améliorer la connaissance des écoulements (Sanjuan *et al.* 11), prévoir le comportement de systèmes pour différentes conditions climatiques et comparer les performances de plusieurs systèmes (Patania *et al.* 10). Toutefois, l'utilisation de tels outils n'est pas triviale et un travail préliminaire important est nécessaire afin de valider les paramètres de simulation. Dans le cadre de cette étude, le rôle des simulations est d'apporter des informations complémentaires sur l'allure de l'écoulement dans la lame d'air en vue d'une meilleure prise en compte des transferts à l'échelle du bâtiment. En particulier, des transferts d'air entre la lame d'air et l'extérieur sont susceptibles d'apparaître au niveau des espacements entre les lames du bardage. Aussi, cette partie se limite à une présentation des choix de simulation.

Le comportement en régime permanent du bardage ventilé de la face Est est simulé lorsque ce dernier est soumis à un ensoleillement important. Pour cela, le logiciel commercial Star-CCM a été utilisé. Les conditions de la simulation sont adaptées d'une séquence expérimentale ayant eu lieu le 08/07/2010 pour laquelle la température du bardage avait été mesurée par caméra infrarouge. La température de l'air extérieur relevée à 8h00 était de 23°C tandis que le rayonnement solaire reçu était de 570 W.m⁻², ce qui correspond aux apports maximaux pour cette journée. Enfin, la mesure de température du parement intérieur est de 23°C et celle de l'air dans les combles de 32°C.

Les mesures infrarouges ayant mis en évidence une bonne homogénéité en température à une altitude constante, le domaine de simulation est limité à deux dimensions. Cette simplification a également été effectuée dans (Yilmaz et Frazer 07, Gan 09). Une seconde simplification concerne la prise en compte du vent. D'une part, les mesures infrarouges ont montré le rôle prépondérant des apports solaires sur la température du bardage. D'autre part, la complexité de l'écoulement provoqué par le vent autour d'un bâtiment est trop importante pour en permettre une représentation simplifiée en 2D, ne serait-ce que par l'influence de l'incidence du vent (Becker *et al.* 02). Si (Marinosci *et al.* 11) insistent sur l'impact avéré du vent sur le renouvellement d'air de la lame d'air, ils précisent également qu'il est très difficile de le modéliser. Aussi, les effets du vent ne sont pas pris en compte dans la simulation, ce qui correspond à une situation favorisant l'échauffement du bardage (Gan 09). C'est-à-dire dans le cas d'une convection naturelle pure. Cette simulation pourrait être développée pour être plus réaliste. Cependant, cela est suffisant pour donner une première estimation du comportement de la lame d'air lorsque le bardage est soumis au rayonnement solaire.

Seul le bardage et les éléments qui échangent directement avec lui ont été représentés. Les différents éléments simulés sont donc :

- Les 44 lames du bardage (les montants qui les maintiennent ne sont pas représentés) ;
- Les trois épaisseurs de la paroi isolée (contreventement / isolant / parement intérieur) sur une hauteur de 3,10 m. Cela correspond à la hauteur entre le bas du plancher de la cellule et le plancher des combles ;
- L'air dans les combles, sur une hauteur de 0,7 m et pour une épaisseur égale à celle de l'isolant plus celle du parement intérieur. Cet élément est séparé de la lame d'air par le contreventement ;
- L'air extérieur, qui s'étend jusqu'à 0,6 m au-dessus et au-dessous du bardage, 0,5 m dans la direction horizontale. Tout en haut de la lame d'air, le domaine est défini de manière à représenter un débordement de la toiture de 0,1 m par rapport au bardage. L'espacement vertical avec la lame la plus haute est de 0,008 m, comme entre chaque lame. Ces choix se sont appuyés sur une étude préliminaire, non présentée ici, qui a permis de constater qu'augmenter la taille du domaine ou le nombre de mailles ne modifiait pas les résultats de la simulation mais nécessitait des temps de calcul plus importants.

La pression relative en limite du domaine fluide est imposée et nulle, de manière à ce que l'écoulement ne résulte que des effets de la poussée d'Archimède (Gan 09). Les mesures de température du parement intérieur et des limites de domaine de l'air des combles et extérieur sont imposées. Le plancher, le sol en extérieur, la toiture et les limites des combles sont définis comme des murs adiabatiques. Afin de représenter l'échauffement des lames sous l'effet du rayonnement solaire, une source de chaleur est ajoutée à chaque lame du bardage. Répartie sur toute la hauteur d'une lame et sur une épaisseur de 0,001 m, elle est ajustée afin de prendre en compte l'émissivité solaire du matériau (valeur mesurée en laboratoire $\epsilon_{\text{Sol}} = 0,6$). Les transferts radiatifs Grandes Longueurs d'Ondes dans la lame d'air et avec l'environnement sont également pris en compte.

En s'appuyant sur les simulations réalisées par (Sanjuan *et al.* 11), la finesse du maillage a été fixée à 0,001m dans la lame d'air, dans les lames du bardage et dans le contreventement extérieur. La taille des mailles augmente progressivement jusqu'à 0,0025 m pour les domaines adjacents et peut atteindre 0,005 m pour les domaines les plus éloignés (isolant dans la paroi, air extérieur). Au final, chaque lame du bardage comporte 1500 mailles et la lame d'air en compte 140 000. Enfin, le maillage est construit avec des mailles hexagonales. La géométrie, les conditions limites et un exemple du maillage sont illustrés par les schémas de la Figure 26.

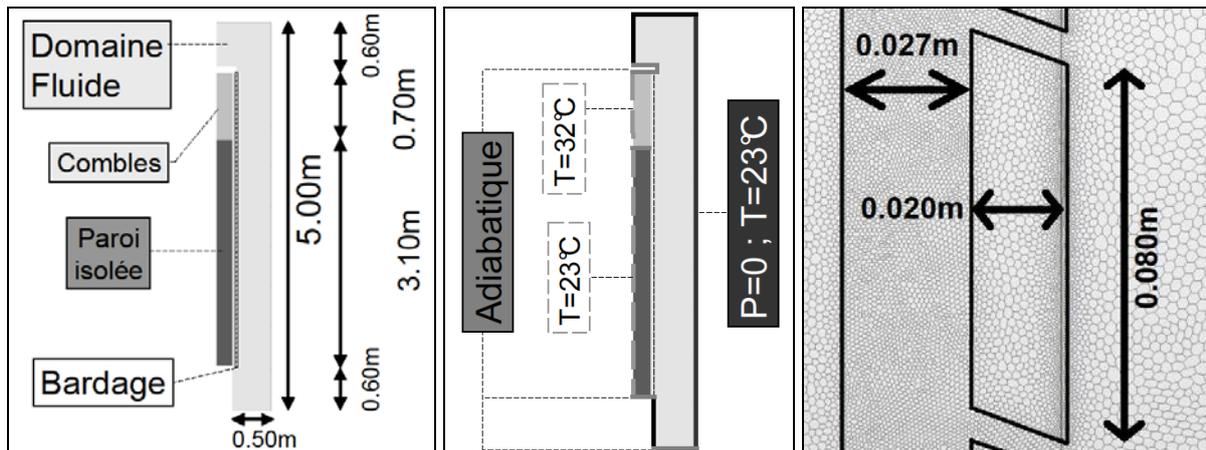


Figure 26 : Identification des différents domaines représentés (gauche), des conditions limites appliquées (centre) et du maillage d'une lame du bardage et du domaine fluide qui l'entoure (droite)

Bien que l'écoulement puisse être laminaire, au moins sur une partie de la hauteur (Rodrigues 00, Nore 10), (Letan *et al.* 03) ont montré que l'écoulement dans un canal comprenant des entrées d'air était mieux représenté par des simulations prenant en compte la turbulence. Ce choix est commun à plusieurs études numériques pour des systèmes et avec des puissances injectées semblables à celui étudié ici (Yilmaz et Frazer 07, Gan 09). Cependant, la modélisation de la turbulence peut être abordée de nombreuses façons (Kuznik 05) et reste un paramètre délicat à régler. Le modèle « k-ε réalisable » a été retenu pour cette étude, ce qui a également été le cas pour les études portant sur l'écoulement dans une cavité ventilée de faible épaisseur (Nore *et al.* 10) ou comportant des entrées d'air (Sanjuan *et al.* 11).

Enfin, les propriétés thermiques des éléments solides (conductivité thermique, densité, capacité calorifique) sont celles mesurées en laboratoire. Les transferts de vapeur d'eau ne sont, quant à eux, pas pris en compte.

B.4 Allure générale de l'écoulement dans la lame d'air

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de lignes iso-vitesses autour de quelques lames du bardage dans les graphiques de la Figure 27. Pour donner un aperçu plus global, quelques profils de vitesse verticale et les vitesses horizontales moyennes des flux d'air circulant entre les lames sont tracés dans les graphiques de la Figure 28.

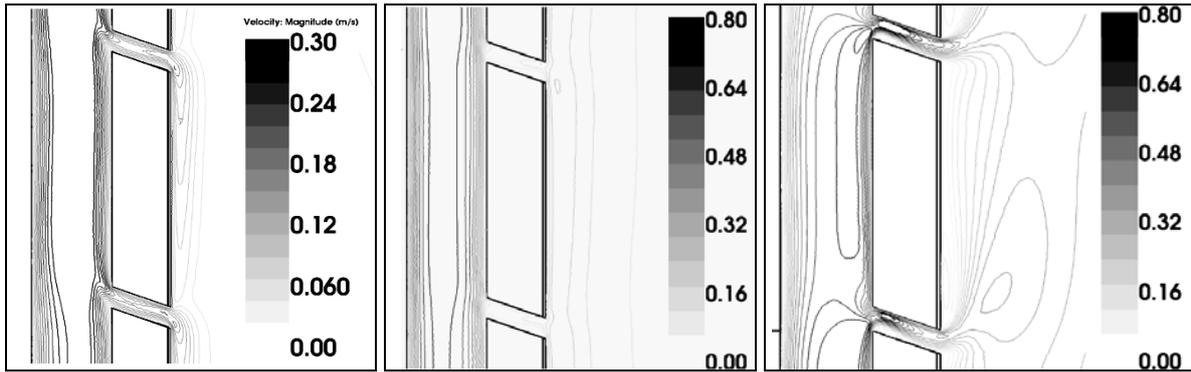


Figure 27 : Iso-vitesses pour une hauteur relative $z^* = 0,11$ (gauche, échelle de 0 à 0,3 $m.s^{-1}$), $z^* = 0,50$ (centre, échelle de 0 à 0,8 $m.s^{-1}$) et $z^* = 0,91$ (droite, échelle de 0 à 0,8 $m.s^{-1}$).

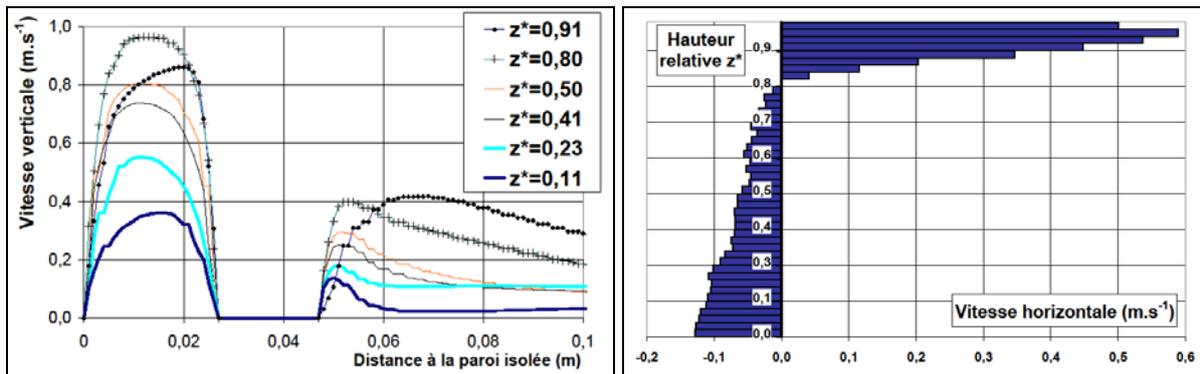


Figure 28 : Profils de vitesse verticale pour quelques hauteurs relatives (gauche) et vitesse horizontale de l'air entre chaque lame (droite, une valeur négative indique un débit d'air entrant dans la lame d'air, une valeur positive un débit sortant)

Deux écoulements distincts se développent : le premier dans la lame d'air (entre 0 et 0,027 m dans la Figure 28) et le second sur la surface extérieure du bardage (pour une distance supérieure à 0,047 m dans la Figure 28).

Les lignes iso-vitesse montrent que l'écoulement qui se développe à l'extérieur du bardage rentre dans la lame d'air entre les lames du bas du bardage. De ce fait, la vitesse verticale dans la lame d'air augmente avec la hauteur, ce qui se vérifie dans le graphique de gauche de la Figure 28. Au fur et à mesure que la vitesse dans la lame d'air augmente, la contribution des débits horizontaux s'amenuise, bien que l'écoulement secondaire continue de se développer. A partir de $z^* = 0,23$ environ, le profil de la vitesse verticale dans la lame d'air est symétrique et semblable à ceux observés dans les canaux ouverts sans entrées d'air sur la hauteur (Yilmaz et Frazer 07). Bien que l'écoulement dans la lame d'air soit toujours alimentée par les débits horizontaux, il en est moins perturbé. La vitesse de cet écoulement principal augmente jusqu'à atteindre 0,95 $m.s^{-1}$ à $z^* = 0,80$ pour les conditions d'ensoleillement et de température extérieure imposées ici. Au-dessus, l'air est expulsé hors de la lame d'air et perturbe l'écoulement secondaire.

Les ordres de grandeur obtenus ici sont éloignés de l'hypothèse faite par (Hägerstedt et Hardeerup 11) qui proposaient de considérer une vitesse constante de 0,3 $m.s^{-1}$ pour un canal de cette largeur en l'absence d'apports solaires. En ce qui concerne les entrées d'air, un comportement

similaire est relevé dans (Sanjuan *et al.* 11) bien que la hauteur relative pour laquelle les écoulements secondaires s'inversaient était proche de 0,5 dans leur configuration. Les écarts constatés avec ces résultats pourraient provenir des différences de géométrie au niveau des entrées et sorties de la lame d'air, des ouvertures dans la lame d'air et de la largeur du canal.

L'utilisation de la CFD a permis de mettre en évidence l'influence des transferts d'air entre les lames du bardage. Le comportement de la lame d'air est donc fortement bidimensionnel, ce qui rejoint les conclusions des mesures de température faites par thermographie infrarouge. De plus, l'ordre de grandeur de la vitesse de la lame d'air, des débits horizontaux et l'allure de l'écoulement sont désormais connus. Ces deux études préliminaires permettent donc de réaliser une instrumentation adéquate de la lame d'air. La connaissance de l'évolution de la vitesse de la lame à différentes hauteurs relatives et pour des sollicitations réelles pourra alors servir de référence pour la validation d'un modèle de bardage.

Concernant la précision de la simulation CFD, tous les paramètres n'ont pas été entièrement validés. L'influence de la rugosité des surfaces, la variabilité des propriétés des matériaux (notamment l'absorptivité solaire) et le choix du modèle de turbulence restent à étudier. En effet, la comparaison avec les mesures de température faites par thermographie infrarouge a montré un écart important à mi-hauteur. Cet approfondissement n'est pas immédiat (Nore *et al.* 10), mais autoriserait à terme d'effectuer des bilans d'énergie par exemple et d'identifier les paramètres sensibles de l'écoulement (Patania *et al.* 10). Toutefois, cette étape ne pourrait se passer d'une comparaison avec des mesures in-situ. Il a donc été décidé de ne pas poursuivre l'utilisation des simulations CFD dans le cadre de cette étude.

C Campagne expérimentale de référence

Le bardage de la paroi Est a été instrumenté durant l'été 2011 afin de réaliser des mesures dans la lame d'air lorsque le rayonnement solaire incident est important. Outre l'affinement des conclusions précédentes, ces mesures serviront de référence à la validation du modèle de bardage.

C.1 Instrumentation du bardage

La vitesse et la température dans la lame d'air sont mesurées par deux anémomètres à fils chauds EE75. Compte tenu des conclusions de la simulation CFD et des données issues de la littérature, ces instruments ont été choisis afin d'être sensibles sur une gamme de vitesse d'air comprise entre 0,06 et 2,00 m.s⁻¹ avec une précision de $\pm 0,03$ m.s⁻¹. Ils ne sont pas sensibles à la direction de l'écoulement cependant. L'un des capteurs est placé à mi-hauteur et sert de référence tandis que le second a été régulièrement déplacé (voir Tableau 12). Les orifices permettant l'insertion des anémomètres ont été pratiqués au milieu d'une lame du bardage et à des hauteurs différentes de celles des thermocouples. Enfin, l'élément sensible des capteurs est positionné au milieu de

l'épaisseur de la lame d'air. Ces instruments sont similaires à ceux utilisés par (Marinosci *et al.* 11) pour effectuer une campagne de mesure sur une paroi orientée Ouest. Des précisions supplémentaires concernant l'instrumentation du bardage et son étude sont données dans l'Annexe 5.

Tableau 12 : Position des anémomètres à fil chaud dans la lame d'air

| Position | 1 | 2 | 3 ⁽¹⁾ | 4 | 5 |
|------------------------|------|------|------------------|------|------|
| Hauteur relative z^* | 0,23 | 0,41 | 0,55 | 0,68 | 0,91 |

⁽¹⁾ Position de référence : un capteur y effectue une mesure en permanence

Une campagne expérimentale s'est déroulée en continu du 03/08/2011 au 19/08/2011. Pour chaque changement de position des anémomètres, le bardage a été laissé en évolution libre pendant une journée entière alors que la température de sa surface extérieure était mesurée par thermographie infrarouge.

C.2 Mesure de la vitesse d'air dans la lame d'air

Bien que variables, les conditions météorologiques sont voisines pour les différentes positions des anémomètres ; le développement de la convection naturelle autour du bardage était favorisé par une densité de puissance du rayonnement solaire reçue importante (voir Figure 21 dans Chapitre IIA). Les mesures de vitesse dans la lame d'air sont présentées dans les graphiques de la Figure 29 et de la Figure 30.

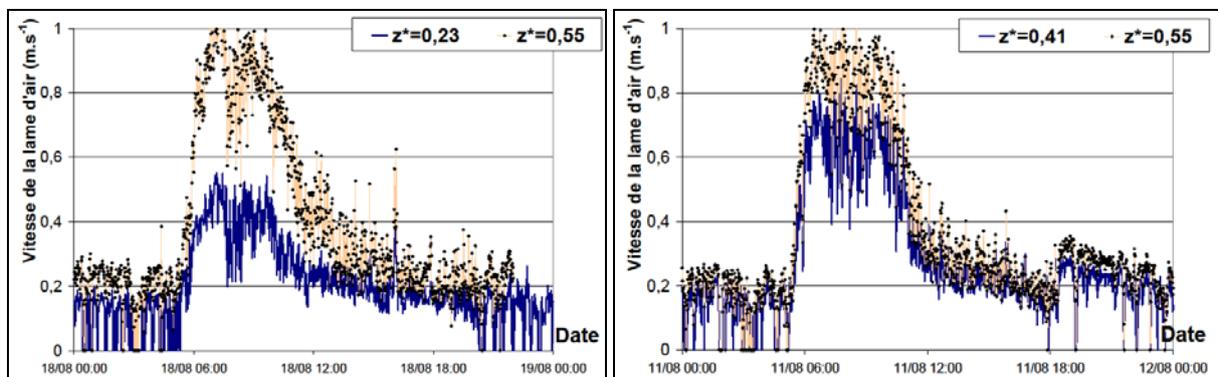


Figure 29 : Comparaison des mesures de vitesse faites aux positions 1 et 3 (gauche, 18/08/2011) et aux positions 2 et 3 (droite, 11/08/2011)

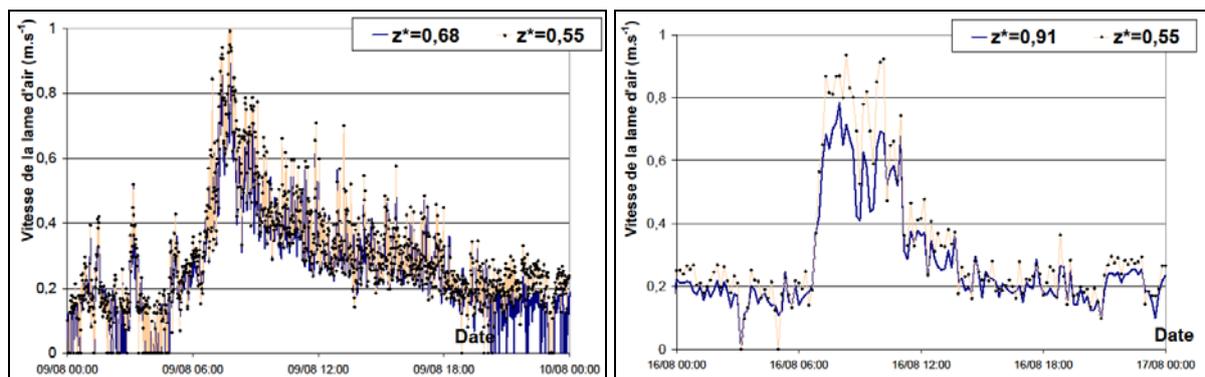


Figure 30 : Comparaison des mesures de vitesse faites aux positions 4 et 3 (gauche, 09/08/2011) et aux positions 5 et 3 (droite, 16/08/2011 – la fréquence d’acquisition est de 10 minutes)

Ces mesures ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- Les vitesses mesurées sont comprises entre 0 et $0,25 \text{ m.s}^{-1}$ en l’absence de rayonnement solaire. Comme le relèvent (Marinosci *et al.* 11), la précision des instruments est plus faible dans ces ordres de grandeur et ces mesures sont assez difficiles à exploiter. Lorsque le bardage est soumis au rayonnement solaire direct cependant, les vitesses mesurées peuvent dépasser $0,9 \text{ m.s}^{-1}$ (voir Figure 29) ;
- Les effets du vent semblent peu influents sur la vitesse d’air de la lame d’air ventilée : en l’absence de rayonnement solaire, les mesures sont dispersées mais sur une gamme relativement restreinte ($\pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$) comparée aux variations provoquées par le rayonnement solaire. D’une certaine façon, l’hypothèse d’une vitesse constante proposée par (Hägersted et Hardeerup 11) est valable en l’absence de rayonnement solaire, et donc pour le cas d’une paroi orientée Nord ;
- La vitesse verticale de la lame d’air augmente rapidement en début de matinée, c’est-à-dire lorsque les apports solaires sont les plus importants. Sur cette période, son évolution est semblable à celle de la température de la surface extérieure du bardage (voir Figure 24) ;
- La vitesse de l’air n’est pas constante sur toute la hauteur de la lame d’air : par exemple, elle est presque doublée entre les hauteurs relatives $z^* = 0,25$ et $z^* = 0,55$ le 18/08/2011 à 8h00. Elle est similaire entre les hauteurs $z^* = 0,55$ et $z^* = 0,68$, ce qui signifie que l’axe neutre doit se situer entre ces deux positions. Enfin, la vitesse de la lame d’air diminue au niveau du point de mesure le plus haut ($z^* = 0,91$).

Ces observations sont cohérentes avec les conclusions des simulations CFD, bien que des écarts apparaissent, notamment la hauteur à laquelle les débits horizontaux s’inversent (entre $z^* = 0,55$ et $z^* = 0,68$ ici contre $z^* = 0,8$ dans les simulations CFD). Comme il l’a été mentionné précédemment, les simulations CFD ne permettent pas, en l’état actuel des choses, d’offrir une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques. Aussi, il a été décidé de se limiter aux mesures présentées ici pour valider le modèle de bardage.

D Modélisation du bardage

La modélisation du bardage doit permettre de prendre en compte les transferts à l’échelle de la paroi toute entière. Les mesures ayant mis en évidence le comportement fortement bidimensionnel de la lame d’air, le modèle doit donc permettre de représenter la stratification verticale en température. Cette modélisation sera enfin intégrée dans HAM-Tools, c’est-à-dire un modèle à l’échelle du bâtiment, et a donc également pour objectif de permettre de réaliser des bilans globaux.

D.1 Principe général du modèle

Un modèle de bardage est déjà présent dans la bibliothèque d'HAM-Tools : la partie solide du bardage est modélisée comme une paroi constituée d'un seul matériau (3 nœuds), séparée par une lame d'air (1 nœud) de la paroi isolée (17 nœuds). Pour simuler les transferts à travers la paroi toute entière, il suffit de connaître les conditions météorologiques et d'imposer la température et l'humidité de l'air intérieur.

Ici, et afin de prendre en compte le comportement bidimensionnel de la lame d'air, plusieurs modèles de parois identiques sont superposés. Ainsi la paroi verticale est modélisée par plusieurs « tranches » comme l'illustre le schéma de la Figure 31. En supposant que les effets bidimensionnels soient limités à la lame d'air, seuls les nœuds la représentant échangent des flux de chaleur et de masse avec les nœuds des tranches supérieures et inférieures (approche de type « 1D et un demi »). Les conditions aux limites du problème sont inchangées par rapport au modèle initial : la température et l'humidité relative de l'air intérieur et les conditions extérieures sont imposées.

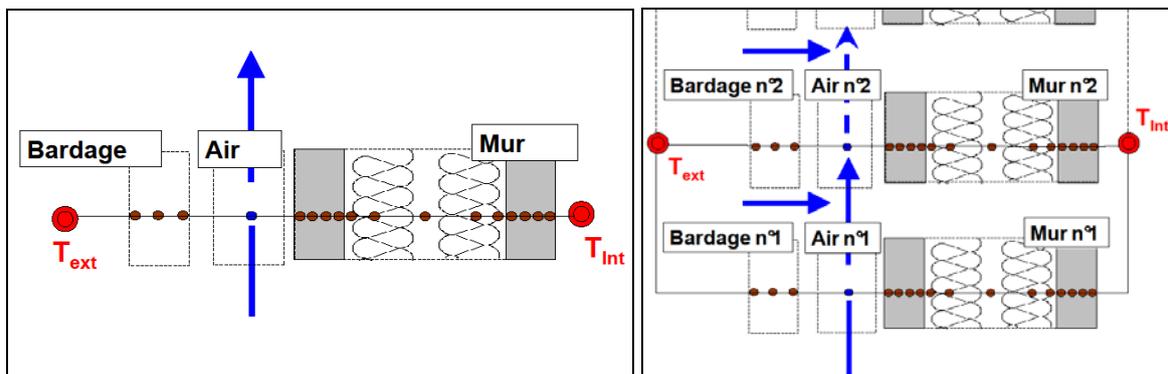


Figure 31 : Principe du modèle 1D initial (gauche) et du modèle « 1D et un demi » (droite)

Le comportement de la lame d'air est représenté comme une succession d'états stationnaires (Balocco 02) et un bilan de masse et de chaleur est appliqué à chaque nœud j de la lame d'air. Le bilan de masse s'écrit :

Eq. 28
$$q_{z,j} = q_{x,j} + q_{z,j-1}$$

Le bilan de chaleur comporte quant à lui cinq termes : les flux de chaleur apportés par les trois flux d'air ainsi que les flux convectifs échangés avec les deux surfaces du canal. Pour les bilans de chaleur appliqués aux deux surfaces du canal (deux dernières lignes dans Eq. 29), ils ne sont pas modifiés par rapport aux bilans appliqués dans le modèle initial mais doivent être recalculés pour chaque tranche j . Une représentation schématique est donnée dans les graphiques de la Figure 32.

$$\begin{aligned}
 & q_{z,j} \cdot T_{LA,j} \cdot C_{P,A} = q_{x,j} \cdot T_{qx,j} \cdot C_{P,A} + q_{z,j-1} \cdot T_{LA,j-1} \cdot C_{P,A} + \\
 & \quad h_{C,SLA,j} \cdot (T_{SLA,j} - T_{LA,j}) + h_{C,PP,j} \cdot (T_{PP,j} - T_{LA,j}) \\
 \text{Eq. 29} \quad & d \cdot \rho \cdot C_P \cdot \frac{\partial T_{PP,j}}{\partial t} = h_{C,PP,j} \cdot (T_{LA,j} - T_{PP,j}) + h_{R,LA} \cdot (T_{SLA,j} - T_{PP,j}) + \frac{\lambda}{d} \cdot (T_{PP+1,j} - T_{PP,j}) \\
 & d \cdot \rho \cdot C_P \cdot \frac{\partial T_{SLA,j}}{\partial t} = h_{C,SLA,j} \cdot (T_{LA,j} - T_{SLA,j}) + h_{R,LA} \cdot (T_{PP,j} - T_{SLA,j}) + \frac{\lambda}{d} \cdot (T_{SLA-1,j} - T_{SLA,j})
 \end{aligned}$$

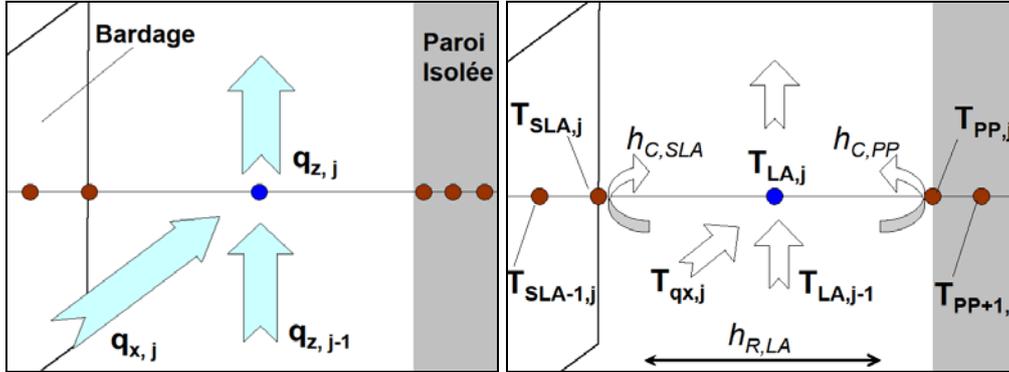


Figure 32 : Schéma du bilan de masse dans la lame d'air (gauche) et des transferts de chaleur dans la lame d'air (droite)

En ce qui concerne le bilan de chaleur au niveau de la surface extérieure du bardage, il n'est pas non plus modifié ; seule la température de la surface extérieure du bardage varie entre les différentes tranches comme le montre Eq. 30. Les transferts mis en jeu dans ce bilan sont représentés schématiquement dans le graphique de la Figure 33.

$$\begin{aligned}
 \text{Eq. 30} \quad & d \cdot \rho \cdot C_P \cdot \frac{\partial T_{SE,j}}{\partial t} = h_{C,SE,j} \cdot (T_{Ext} - T_{SE,j}) + h_{R,SS} \cdot (T_{SS} - T_{SE,j}) + h_{R,Ciel} \cdot (T_{Ciel} - T_{SE,j}) + \\
 & \quad \Phi_{Sol-Vertical} \cdot \varepsilon_{So,SE} + \frac{\lambda}{d} \cdot (T_{SE+1,j} - T_{SE,j})
 \end{aligned}$$

Afin de résoudre ces bilans, il convient de définir chaque coefficient de transfert de chaleur ainsi que les débits d'air qui se développent au niveau de chaque tranche. Dans un premier temps, les mesures expérimentales seront utilisées pour proposer une corrélation sur les débits d'air en fonction des conditions de température et de la hauteur. Puis les transferts de chaleur radiatifs et convectifs seront décrits à l'aide de relations issues de la littérature.

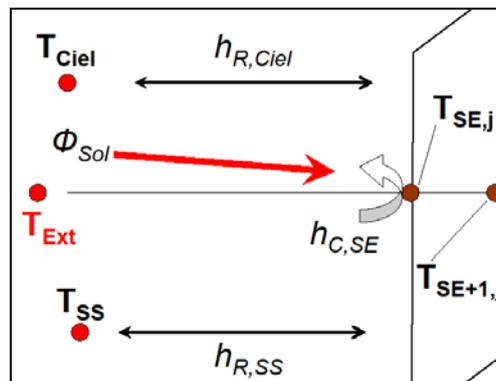


Figure 33 : Schéma des transferts de chaleur au niveau de la surface extérieure du bardage

D.2 Transferts de masse

L'étude bibliographique n'a pas permis de fournir de corrélation adaptée à la lame d'air dont ce travail fait l'objet. L'étude de la configuration de canal la plus proche, présentée dans (Sanjuan *et al.* 11), aboutit à des observations similaires à celles de la campagne expérimentale mais ne propose aucune formulation mathématique.

Toutefois, les différentes expériences menées sur le bardage permettent de définir le comportement général de la lame d'air. Les mesures de vitesses réalisées avec les anémomètres en particulier ont permis de constater que la vitesse de la lame d'air est essentiellement pilotée par les effets thermiques (voir Figure 34). Dans ce contexte, une corrélation simplifiée mais réaliste des débits d'air est proposée à partir des hypothèses suivantes :

- Les vitesses mesurées sont supposées représentatives de la vitesse moyenne de l'écoulement, aussi le débit peut être obtenu par la multiplication de la vitesse avec la section de la lame d'air ;
- Il existe un axe neutre (z_{REF}) pour lequel les débits horizontaux q_x sont nuls. En supposant que l'air circule toujours du bas vers le haut (cas de la convection naturelle en journée), les débits q_x sont positifs en dessous de cette hauteur (entrant dans la lame d'air) et négatifs au dessus (sortant de la lame d'air). Le débit vertical q_z est donc maximal pour $z^* = z_{REF}$;
- En absence de rayonnement solaire, le débit vertical q_z ($z^* = z_{REF}$) est minimal et vaut q_0 . Autrement, il apparaît que le débit varie linéairement avec l'écart de température entre la lame d'air et l'air extérieur $\Delta T_{z^* = z_{REF}}$ et une constante k (voir Figure 34) ;
- La contribution relative des débits horizontaux varie linéairement avec la hauteur relative en fonction d'une constante γ (voir Figure 34) ;
- De fait, le débit vertical en entrée de la lame d'air (q_z ($z^* = 0$)) est proportionnel au débit vertical de l'axe neutre (q_z ($z^* = z_{REF}$)), ce que représente la constante δ . Il en va de même pour le débit vertical en sortie de la lame d'air (q_z ($z^* = 1$)). Ces hypothèses participent à la définition des conditions limites du problème (voir Eq. 33) ;
- La variation du débit vertical (dq_z) ne dépend que des débits horizontaux ;
- Le comportement de la lame d'air n'est pas symétrique : les coefficients de la partie inférieure de la lame d'air ($z^* \leq z_{REF}$) seront notés avec l'indice (_{INF}) et ceux de la partie supérieure ($z^* > z_{REF}$) avec l'indice (_{SUP}). Le problème comporte donc deux équations, une pour chaque partie de la lame d'air, liée par une équation de continuité à l'altitude z_{REF} (voir Eq. 34).

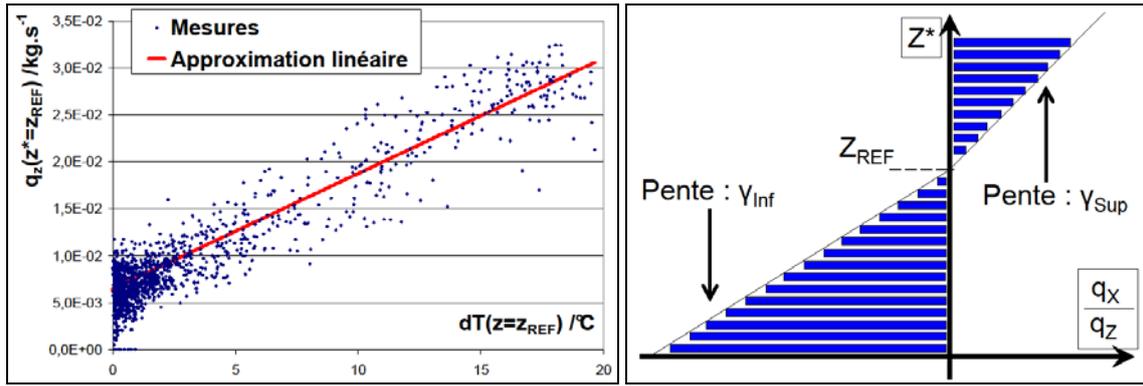


Figure 34 : Mesures de vitesse faites à la position 3 en fonction de l'écart de température entre la lame d'air et l'air extérieur (gauche) et schéma de principe de répartition des débits horizontaux

A partir de ces hypothèses, le problème est écrit sous la forme différentielle pour la partie inférieure de la lame d'air (voir Eq. 31). L'équation est identique pour la partie supérieure aux indices près.

$$\text{Eq. 31} \quad \frac{dq_z(z^*)}{q_z(z^*)} = \gamma_{INF} \cdot \left(1 - \frac{z^*}{z_{REF}}\right)$$

La solution générale de cette équation est donnée dans Eq. 32 pour les deux parties de la lame d'air et introduit deux constantes A_1 et A_2 qui dépendent des conditions aux limites du problème (Eq. 33). Enfin, la condition de continuité entre les deux parties de la lame d'air est présentée dans Eq. 34.

$$\text{Eq. 32} \quad q_z(z^* < z_{REF}) = A_1 \cdot e^{\gamma_{INF} \left(z^* - \frac{z^{*2}}{2 \cdot z_{REF}}\right)}$$

$$q_z(z^* > z_{REF}) = A_2 \cdot e^{\gamma_{SUP} \left(z^* - \frac{z^{*2}}{2 \cdot z_{REF}}\right)}$$

$$\text{Eq. 33} \quad q_z(z^* = 0) = \delta_{INF} \cdot (q_0 + k \cdot \Delta T_{z^*=z_{REF}})$$

$$q_z(z^* = 1) = \delta_{SUP} \cdot (q_0 + k \cdot \Delta T_{z^*=z_{REF}})$$

$$\text{Eq. 34} \quad q_z(z^* = z_{REF}) = q_0 + k \cdot \Delta T_{z^*=z_{REF}}$$

De plus, au vu des hypothèses proposées, le paramètre γ peut être exprimé en fonction des autres données du problème. Pour cela, l'équation Eq. 31 est intégrée entre 0 et z_{REF} .

$$\text{Eq. 35} \quad [\ln(q_z(z))]_0^{z_{REF}} = \gamma_{INF} \cdot \left[z^* - \frac{z^{*2}}{2 \cdot z_{REF}} \right]_0^{z_{REF}}$$

$$\gamma_{INF} = -\frac{2}{z_{REF}} \cdot \ln(\delta_{INF})$$

Eq. 36

$$\gamma_{SUP} = \left(1 - \frac{1}{2 \cdot z_{REF}} - \frac{z_{REF}}{2}\right)^{-1} \cdot \ln(\delta_{SUP})$$

Les constantes d'intégration sont déterminées dans Eq. 37 à l'aide des conditions aux limites du problème et la solution est donnée dans Eq. 38.

$$q_Z(z^* = 0) = \delta_{INF} \cdot (q_0 + k \cdot \Delta T_{z^*=z_{REF}}) = A_1$$

$$q_Z(z^* = z_{REF}) = q_0 + k \cdot \Delta T_{z^*=z_{REF}} = A_1 \cdot e^{\frac{\gamma_{INF} z_{REF}}{2}} = A_2 \cdot e^{\frac{\gamma_{SUP} z_{REF}}{2}}$$

$$q_Z(z^* = 1) = \delta_{SUP} \cdot (q_0 + k \cdot \Delta T_{z^*=z_{REF}}) = A_2 \cdot e^{\gamma_{SUP} \left(1 - \frac{1}{2 \cdot z_{REF}}\right)}$$

Eq. 37

$$q_Z(z^* < z_{REF}) = \delta_{INF} \cdot (q_0 + k \cdot \Delta T_{z^*=z_{REF}}) \cdot e^{\gamma_{INF} \left(z^* - \frac{z^{*2}}{2 \cdot z_{REF}}\right)}$$

$$q_Z(z^* > z_{REF}) = \delta_{SUP} \cdot (q_0 + k \cdot \Delta T_{z^*=z_{REF}}) \cdot e^{-\gamma_{SUP} \left(1 - \frac{1}{2 \cdot z_{REF}}\right)} \cdot e^{\gamma_{SUP} \cdot \left(z^* - \frac{z^{*2}}{2 \cdot z_{REF}}\right)}$$

Eq. 38

D.3 Identification des paramètres de transferts de masse

Les cinq paramètres : z_{REF} , q_0 , k , δ_{Inf} et δ_{Sup} sont identifiés par la méthode inverse des moindres carrés entre la corrélation et les débits d'air estimés par la mesure. Les valeurs qui ont permis d'obtenir l'écart minimal sont présentées dans le Tableau 13. A noter que lors de cette étape, la différence de température ΔT n'est pas calculée mais est déduite des mesures de température effectuées par les thermo-anémomètres dans la lame d'air et les relevés effectués à la station météo.

Tableau 13 : Valeurs des coefficients obtenues par méthode inverse

| z_{REF} (-) | q_0 (kg.s ⁻¹) | k (kg.s ⁻¹ .K ⁻¹) | δ_{Inf} (-) | δ_{Sup} (-) |
|---------------|-----------------------------|--|--------------------|--------------------|
| 0,57 | 6,48.10 ⁻³ | 1,23.10 ⁻³ | 0,18 | 0,73 |

La valeur de q_0 correspond à 180 volumes par heure et se situe à mi-chemin entre la valeur proposée par (Hägersted et Hardeerup 11 ; 30 vol.h⁻¹) et les valeurs de références utilisées par (Nore et al. 10, entre 400 et 1200 vol.h⁻¹ pour un vent de plus de 3 m.s⁻¹ et avec de larges ouvertures en entrée et sortie de la lame d'air). La corrélation (Eq. 38) est comparée aux mesures faites aux positions 1, 3 et 5 dans la Figure 35.

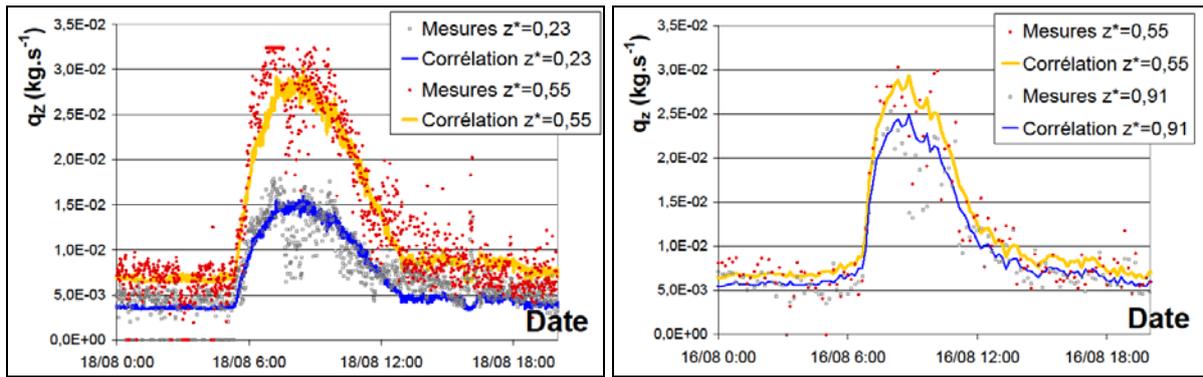


Figure 35 : Comparaison de la corrélation sur la vitesse d'air avec les mesures faites par les capteurs aux positions 1 (gauche), 5 (droite) et 3 (deux graphes)

Par hypothèse, les effets du rayonnement solaire ont été considérés dominants ici et les effets du vent secondaires. De ce fait, l'allure générale de la vitesse d'air est correctement représentée aux différentes hauteurs. Par contre, les variations rapides des vitesses d'air mesurées sont moins bien suivies, ce qui pourrait être imputé aux effets du vent ou à d'éventuelles erreurs de mesures (effets tridimensionnels dans la lame d'air). Cependant, il a été vérifié qu'introduire la vitesse du vent dans la corrélation ne permettait pas d'améliorer les résultats de manière significative. Le fait que les lames d'air soient indépendantes les unes des autres (présence des montants verticaux tous les 0,6 m) pourrait également expliquer le rôle limité du vent devant celui des effets thermiques.

Une seconde remarque concerne le domaine de validité de la corrélation : le calcul du débit en entrée et sortie de la lame d'air, c'est-à-dire au-dessous l'altitude $z^* = 0,23$ et au dessus l'altitude $z^* = 0,91$ peut être vu comme une extrapolation. Cependant, cette limite est relativement peu contraignante car les extrémités de la lame d'air sont influencées par des éléments spécifiques à cette expérience (avancée de la toiture, bâtiment surélevé, ...).

Ces deux limites mises à part, cette démarche devrait être généralisable à toute étude qui porterait sur une configuration différente (géométrie de la lame d'air, environnement proche, climat ...) en réalisant une nouvelle identification des paramètres de la corrélation (voir Tableau 13). De plus, il est intéressant de constater que cette approche permet de ne déterminer les débits dans la lame d'air qu'à partir de la température de l'air au niveau de l'axe neutre z_{REF} . La précision de l'estimation des transferts de masse dépend donc de la précision avec laquelle les transferts de chaleur sont déterminés.

D.4 Transferts radiatifs

Le coefficient de transfert radiatif h_R dépend de la température des surfaces, de leur émissivité et du facteur de forme (fraction du flux émis par une surface reçue par la seconde). Sur ce dernier point, quelques exemples fréquemment rencontrés dans le bâtiment sont présentés dans (Hagentoft 01). Le cas particulier de la surface extérieure du bardage peut être vu comme une surface

échangeant avec deux plans perpendiculaires infinis. Le premier plan représente le ciel, tandis que le second représente le sol. L'expression de h_R est alors :

$$\begin{aligned} \text{Eq. 39} \quad h_{R,Ciel} &= \sigma_0 \cdot (T_{Ciel} + T_{SE}) \cdot (T_{Ciel}^2 + T_{SE}^2) \cdot \frac{\varepsilon_{Lame}}{2} \\ h_{R,SS} &= \sigma_0 \cdot (T_{SS} + T_{SE}) \cdot (T_{SS}^2 + T_{SE}^2) \cdot \frac{\varepsilon_{Lame}}{2} \end{aligned}$$

La température du ciel est mesurée par un pyrogéomètre situé à la station météo. Usuellement la température de l'environnement est prise égale à celle de l'air. Cependant, l'environnement proche de la cellule est majoritairement constitué de bitume (sauf pour la paroi Ouest). Des mesures rapides ont permis de montrer qu'il était plus juste de considérer que la température évoluait en fonction du flux solaire (voir Annexe 6). Aussi, le coefficient a_{SS} ($= 0,015^\circ\text{C W}^{-1}.\text{m}^2$) a été introduit et la température de l'environnement est estimée de la façon suivante :

$$\text{Eq. 40} \quad T_{SS} = T_{Ext} + a_{SS} \cdot \varphi_{Sol-Horizontal}$$

Enfin, le coefficient de transfert radiatif dans la lame d'air se calcule en utilisant la formule qui décrit les transferts entre deux plans parallèles :

$$\text{Eq. 41} \quad h_{R,LA} = \sigma_0 \cdot (T_{SLA} + T_{PP}) \cdot (T_{SLA}^2 + T_{PP}^2) \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{Lame}} + \frac{1}{\varepsilon_{PP}} - 1}$$

Il apparaît donc que les coefficients de transferts varient en fonction de plusieurs températures. Aussi, les valeurs de ces coefficients sont calculées à chaque pas de temps.

D.5 Transferts convectifs

Le second type de transfert de chaleur qu'il est nécessaire de définir concerne les transferts convectifs. De nombreuses références dans la littérature scientifique traitent des transferts de chaleur dans un canal vertical. Il est assez difficile de déterminer laquelle est la plus adaptée à ce cas précis, en grande partie à cause des entrées d'air aux différentes hauteurs. L'étude qui semble s'approcher le plus du canal étudié ici est présentée par (Fossa *et al.* 08). Cette étude a été menée sur un canal ouvert de 0,03 m de large, asymétriquement chauffé par des sources continues ou discontinues sur la hauteur, ce qui se rapproche sensiblement de la configuration dont il est question ici. Cette étude aboutit à une corrélation sur le coefficient de transfert convectif local (i.e. selon la hauteur) qui dépend de la nature de la source (continue / discontinue). La formulation générale proposée par les auteurs est donnée par Eq. 42. La paroi verticale étant discrétisée, ce coefficient est ensuite intégré sur la hauteur de la tranche j considérée.

Eq. 42

$$h_C(H) = a_{FOS} \cdot \left(\frac{\beta \cdot g}{\alpha_A \cdot v_A \cdot \lambda_A} \cdot H^4 \cdot \varphi_{pp} \right)^{b_{FOS}} \cdot \frac{\lambda_A}{H}$$

$$\bar{h}_C = \frac{1}{H_j - H_{j-1}} \cdot \int_{H_{j-1}}^{H_j} h(H) \cdot dH$$

Le cas du pare-pluie s'approche de celui d'une plaque verticale chauffée par un flux homogène sur une hauteur continue. L'intégration est alors appliquée pour chaque tranche de paroi j définie entre les altitudes H_j et H_{j-1} et les coefficients proposés par (Fossa *et al.* 08) sont ($a_{FOS} = 0,6410$; $b_{FOS} = 0,1954$). Pour les lames du bardage, la configuration des sources se rapproche du cas d'une source discontinue. Les coefficients proposés par (Fossa *et al.* 08) sont alors ($a_{FOS} = 0,4032$; $b_{FOS} = 0,2168$).

Pour le coefficient de transfert convectif entre la surface extérieure du bardage et l'air extérieur $h_{C,Ext}$, (Palyvos 08) en recense une quarantaine qui adoptent la forme générale suivante :

Eq. 43

$$h_{C,Ext} = h_{C,A} + h_{C,B} \cdot V_{Vent}$$

Les valeurs des coefficients ($h_{C,A}$; $h_{C,B}$) varient fortement selon les auteurs et dépendent des conditions d'application. Les coefficients ($h_{C,A} = 1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$; $h_{C,B} = 3,9 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} \cdot (\text{m.s}^{-1})^{-1}$) ayant servi de référence dans (Palyvos 08), ils sont choisis ici dans un premier temps ; les auteurs précisent que V_{Vent} dans Eq. 43 désigne dans ce cas là la composante de la vitesse parallèle à la paroi.

Enfin, (Saelens *et al.* 04) proposent de définir la température d'entrée de la lame d'air différente de celle de l'air extérieur en fonction d'autres paramètres dans le cadre d'une façade à double peau. Cette idée a été reprise ici pour exprimer la température des débits horizontaux T_H : elle est supposée comprise entre la température de l'air extérieur T_{Ext} et la température de la surface extérieure des lames du bardage T_{SE} , ce que représente Ω (nombre adimensionnel compris entre 0 et 1) dans l'équation Eq. 44.

Eq. 44

$$T_{qx,j} = (1 - \Omega) \cdot T_{Ext} + \Omega \cdot T_{SE,j}$$

Les caractérisations expérimentales ne permettant en aucun cas de définir la valeur du paramètre Ω et l'étude menée par (Saelens *et al.* 04) étant appliquée à un cas trop éloigné de celui-ci, Ω est défini constant sur toute la hauteur et égal à 0,5 dans un premier temps.

D.6 Identification de la valeur du paramètre Ω

La campagne expérimentale présentée dans la partie C a été simulée avec le modèle de bardage développé dans cette partie. La paroi verticale a été décomposée en sept tranches comme le présente le graphique de la Figure 36. La tranche n°4 est définie afin de correspondre à la position des capteurs dans la paroi, ce qui permet une comparaison entre résultats de la simulation et mesures. La tranche 6 correspond quant à elle à la position de l'axe neutre.

Tester le modèle avec la valeur par défaut de Ω a permis de constater que l'allure de l'évolution en température du pare-pluie était globalement suivie : les pics de température en matinée dus aux apports solaires directs sont sous-estimés (-8°C le 05/08/2011 à 10h), mais aucune dérive n'est constatée sur le long terme. Les températures mesurées en après-midi et pendant la nuit sont estimées avec une précision de l'ordre de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. D'autres simulations ont été effectuées en faisant varier la valeur de Ω et il est apparu qu'une valeur de 0,8 permettait de mieux représenter les pics de température en fin de matinée sans pour autant perdre en précision aux autres moments de la journée (voir Figure 36). Il a également été vérifié que l'évolution et les ordres de grandeur des températures de la face extérieure du bardage et des vitesses de la lame d'air correspondaient aux mesures faites par thermographie infrarouge et avec les anémomètres à fil chaud (voir Annexe 7).

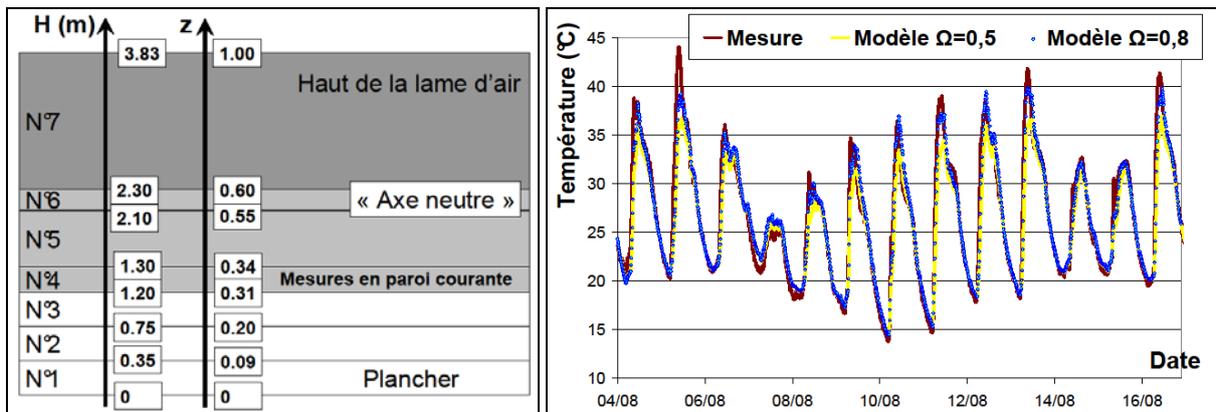


Figure 36 : Schéma de la décomposition de la paroi en tranches (gauche) et comparaison des mesures de température sur le pare-pluie avec les résultats de la simulation au niveau de la tranche n°4 pour $\Omega = 0,5$ et $\Omega = 0,8$ (droite)

E Résultats et discussion

E.1 Séquence de référence

L'évolution de la température du pare-pluie pouvant être très rapide ($+20^{\circ}\text{C}$ de 5h30 à 7h40 le 11/08), un léger décalage temporel peut se traduire par des écarts importants au niveau des températures de surface. Ainsi, bien que l'évolution en température soit correctement représentée, des écarts de plus de 8°C peuvent apparaître et faussent l'interprétation des résultats. Pour cette raison, il semble plus judicieux de considérer le bilan de chaleur à l'échelle de la journée pour estimer les performances globales du modèle. Le flux de chaleur derrière le pare-pluie est donc intégré sur une journée, en faisant la distinction entre énergie absorbée (comptée positivement) et cédée par la paroi. La Figure 37 présente une comparaison entre les énergies calculées en imposant les mesures de température avec les résultats obtenus en utilisant le modèle de bardage.

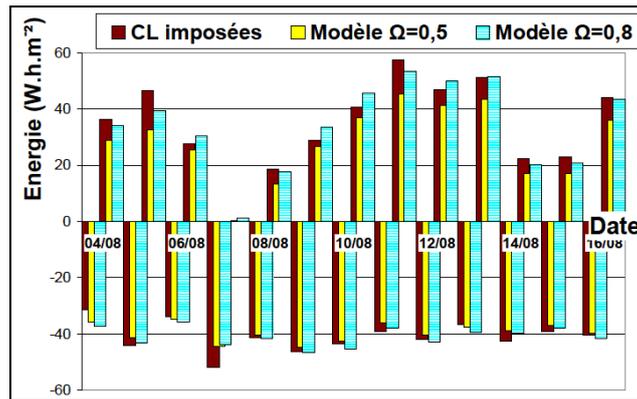


Figure 37 : Comparaison des énergies reçues et cédées par la paroi en imposant la mesure de température du pare-pluie avec les résultats obtenus en utilisant le modèle initial et ajusté.

Ajuster la valeur de Ω à 0,8 permet de rendre compte de la quantité d'énergie reçue par la paroi avec une précision moyenne de 8 % (contre 21 % pour $\Omega = 0,5$). Ponctuellement, l'écart peut être plus important (15 % le 05/08, soit une sous-estimation de 7 W.h.m^{-2}). En ce qui concerne l'énergie cédée par la paroi, l'écart est de 6 % en moyenne (16 % le 07/08, soit une sous-estimation de 8 W.h.m^{-2}). De manière générale, l'ensemble de ces écarts se compense sur la période étudiée (i.e. les énergies surestimées et sous-estimées sont du même ordre de grandeur).

L'ajustement du modèle a été effectué en modifiant la valeur de Ω car aucune référence dans la littérature n'a permis de le définir avec précision pour le cas étudié ici. Cependant, ce paramètre n'est pas le seul qui pourrait être ajusté. En effet, des incertitudes demeurent au niveau de l'émissivité solaire du bardage qui a fortement varié depuis la construction de la cellule test : elle a augmenté de 0,4 à 0,6, et ce de manière non uniforme. Ici, une valeur de 0,6 a été appliquée sur toute la hauteur.

Par ailleurs, de nombreuses corrélations existent pour décrire les effets du vent sur le coefficient de transfert convectif $h_{C,SE}$. Peut-être qu'une autre serait plus adaptée à ce problème, en particulier du fait que la cellule soit surélevée de 0,6 m par rapport au sol.

Enfin, (Sankar et Do 10) ont montré que dans le cas d'un écoulement autour d'un cylindre chauffé par des sources espacées, le nombre de Nusselt variait très fortement au niveau du bord d'attaque de l'écoulement sur les sources de chaleur. Cette conclusion est également soulignée par (Chang 07) dans le cas d'une convection mixte dans un canal comportant un élément vertical chauffé. Ici, il est possible que ces effets se combinent au niveau des lames du bardage et aient un impact sur le coefficient $h_{C,SLA}$: les entrées d'air entre les lames pourraient produire un effet similaire à celui du bord d'attaque et à partir d'une certaine hauteur, il serait possible que le cas d'une convection mixte soit plus adapté que celui de la convection naturelle. Cependant, les auteurs ne proposent pas de corrélations applicables directement ici, et il est probable que les phénomènes varient selon la hauteur, ce qui impliquerait d'effectuer une modélisation plus détaillée de la lame d'air.

De plus, l'interaction des différents transferts de chaleur peut facilement mener à un phénomène de compensation des erreurs, ce qui ajoute de la difficulté lorsqu'il s'agit de déterminer si une corrélation améliore la précision du modèle ou non. Il faudrait alors considérer l'ensemble de

corrélations envisageables pour déterminer la combinaison qui permettrait de reproduire au mieux les mesures de température. Une méthode d'optimisation de type algorithme génétique pourrait être utilisée (une description simplifiée est proposée dans Bouhaya 10) pour résoudre ce problème. Cette poursuite a été jugée superflue : le but de cette étude se limite à proposer un modèle de bardage réaliste qui doit s'intégrer à un outil de simulation des transferts à l'échelle du bâtiment. Un approfondissement serait plus pertinent dans le cadre d'une étude spécifique aux transferts de chaleur à l'échelle de la lame d'air. Par contre, il peut être intéressant d'étudier les performances du modèle pour d'autres conditions climatiques et d'autres orientations.

E.2 Autres séquences expérimentales

La validation du modèle a donc été poursuivie à partir des deux séquences suivantes (seul le modèle ajusté, c'est-à-dire avec $\Omega = 0,8$ a été testé) :

- En été, sur la face Ouest, du 1 au 15 août 2010, afin de tester le modèle pour des flux de chaleur importants en fin de journée (Figure 38) ;
- En hiver, sur la face Est, du 2 au 16 janvier 2011, afin de considérer le cas d'un flux de chaleur majoritairement cédé par la paroi à lame d'air (voir Figure 39).

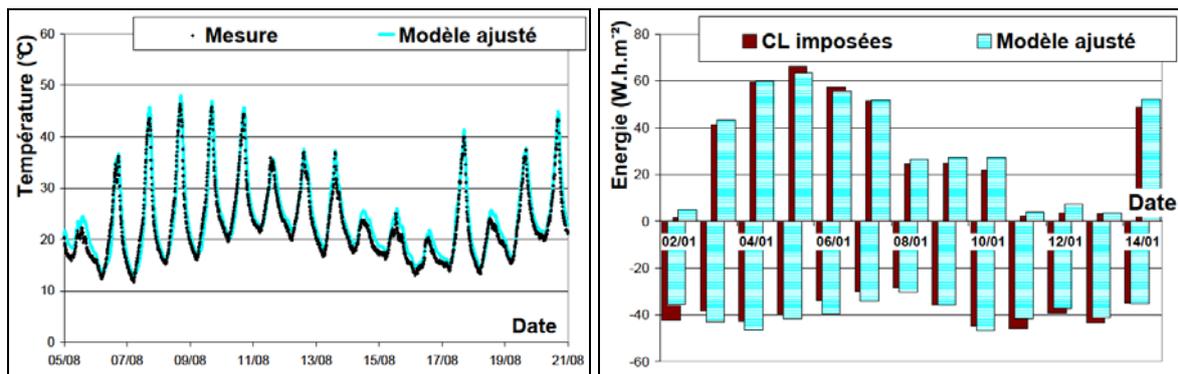


Figure 38 : Comparaison des évolutions de température (gauche) et des flux échangés (droite) pour le cas de la paroi Ouest en été

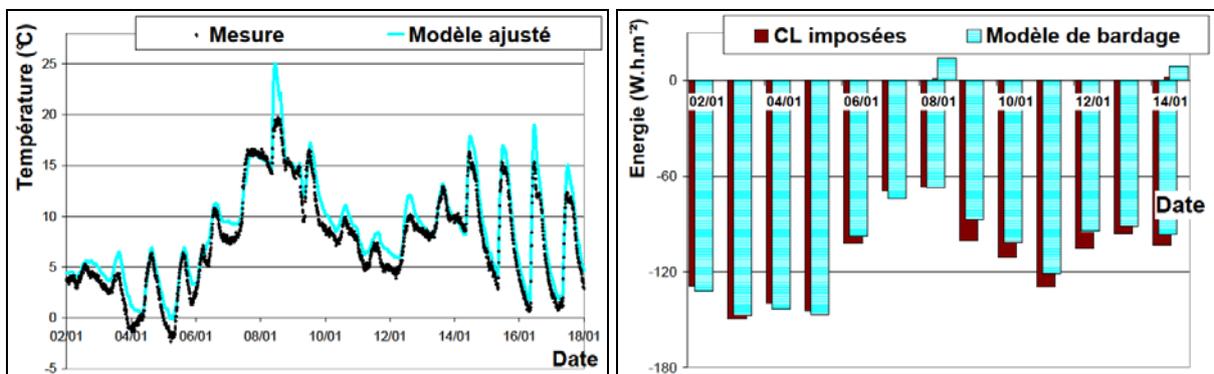


Figure 39 : Comparaison des évolutions de température (gauche) et des flux échangés (droite) pour le cas de la paroi Est en hiver

Les performances du modèle sont comparées pour les trois séquences dans le Tableau 14. Pour cela, les énergies de même signe sont sommées sur l'ensemble d'une séquence et l'écart relatif est calculé. Une quatrième ligne présente l'écart journalier moyen (calculé en utilisant les valeurs absolues des écarts journaliers). Les énergies reçues par la paroi en hiver étant très faibles, les écarts ne sont pas jugés significatifs et ne sont donc pas reportés dans le tableau.

Tableau 14 : Performances du modèle ajusté pour les trois séquences expérimentales étudiées

| Energies (W.h.m ⁻²) | | Est été 2011 | Ouest été 2010 | Est hiver 2011 |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------|----------------|----------------|
| Energie cédée | Total - CL imposées | -533 | -579 | -1829 |
| | Total - Modèle ajusté | -537 | -590 | -1781 |
| | Ecart relatif | 0,7 % | 1,9 % | -2,6 % |
| | Ecart relatif journalier moyen | 6,0 % | 8,2 % | 5,3 % |
| Energie reçue | Total - CL imposées | 444 | 505 | 23 |
| | Total - Modèle ajusté | 456 | 534 | 40 |
| | Ecart relatif | 2,7 % | 5,9 % | N.A. |
| | Ecart relatif journalier moyen | 7,6 % | 7,0 % | N.A. |

Le modèle permet de retrouver l'ordre de grandeur les énergies échangées entre la paroi et l'extérieur avec une précision d'au moins 6 %. À l'échelle d'une journée, les écarts peuvent être plus importants et avoisiner 20 %. La tendance générale est que le modèle surestime les transferts d'énergies, aussi bien celles qui sont reçues que celles qui sont cédées par la paroi. Le cas de la séquence d'hiver 2010 fait figure d'exception toutefois.

D'une manière plus générale, l'évolution en température et les énergies échangées sont le mieux représentées pour des journées avec un ensoleillement direct important, c'est-à-dire pour un climat voisin de celui ciblé dans cette étude. Pour d'autres conditions climatiques, la précision du modèle reste du même ordre de grandeur. Compte tenu de la complexité des phénomènes qui se développent autour du bardage et des nombreuses hypothèses simplificatrices effectuées, il ne semble pas intéressant de poursuivre le développement du modèle de bardage. Il devrait maintenant permettre de représenter le comportement moyen du bardage avec une précision suffisante pour réaliser des bilans à l'échelle du bâtiment.

F Synthèse

Le comportement du bardage de la face Est de la cellule a été étudié lorsqu'il était soumis à un rayonnement solaire incident important. Pour cela, plusieurs outils ont été utilisés. Tout d'abord, la thermographie infrarouge a permis de mesurer l'évolution en température de la face extérieure du bardage (Labat *et al.* 11b). Cette évolution est apparue être bidimensionnelle et fortement liée aux apports solaires. L'échauffement important (> 30°C) par rapport à l'air extérieur indique la présence d'un phénomène de convection naturelle important. Pour caractériser cet écoulement, un outil

numérique (simulation CFD) a été utilisé. Cette seconde approche a permis de mettre en évidence le rôle prépondérant des entrées d'air situées à différentes hauteurs sur le bardage.

Suite à ce constat, le bardage a été équipé de deux anémomètres à fil chaud qui permettent la mesure de la vitesse d'air de la lame d'air. Une campagne expérimentale de 15 jours consécutifs a été menée sur la face Est durant le mois d'août 2011. Les mesures de vitesses se sont avérées être en accord avec les observations précédentes. La compréhension des phénomènes qui se développent autour du bardage dans ces conditions est donc apparue suffisante pour permettre de proposer un modèle de lame d'air ventilée réaliste (Labat *et al.* 12a).

Une corrélation a été définie afin de représenter le débit moyen aux différentes hauteurs lorsque le bardage est soumis à un rayonnement solaire important. Les mesures de vitesse d'air ont permis de réaliser l'identification des différents paramètres de cette corrélation. Pour permettre l'intégration de ces résultats dans HAM-Tools, le modèle de paroi a été enrichi d'un modèle de bardage qui permet la prise en compte des effets bidimensionnels induits par la lame d'air. Les transferts de chaleur ont quant à eux été définis à partir de corrélations générales issues de la littérature.

Les résultats en termes d'énergie échangée entre la paroi isolée et l'extérieur ont été comparés au modèle utilisant les mesures de température du pare-pluie comme condition limite. Moyennant l'identification d'un paramètre agissant sur la température des débits horizontaux, la précision moyenne de ce modèle de bardage est apparue être de l'ordre de 8 %. La validation du modèle a été étendue à deux autres cas et des résultats similaires ont été obtenus (Labat *et al.* 12d).

De nombreuses hypothèses simplificatrices ont été effectuées pour arriver à la modélisation des transferts, et des approches plus complètes pourraient être envisagées. Toutefois, une telle approche nécessiterait une modélisation probablement plus complexe, et de fait plus délicate à intégrer dans HAM-Tools. Aussi, approfondir cette étude ne semble pas pertinent dans le cadre des transferts à l'échelle du bâtiment.

Chapitre III

Caractérisation du renouvellement d'air de la cellule

A Définition de la problématique

A.1 Renouvellement d'air en conditions naturelles

Les transferts couplés de chaleur et de masse dans les parois et les transferts de chaleur avec l'extérieur ont été validés au cours de deux chapitres précédents en imposant les conditions limites sur l'air intérieur à partir des mesures. Afin de proposer un modèle complet des transferts à l'échelle du bâtiment, il est maintenant nécessaire de modéliser le volume d'air intérieur et l'ensemble des transferts qui s'y développent. Les échanges de chaleur et de vapeur d'eau entre les parois et l'air intérieur ont déjà été étudiés dans le Chapitre I. Par contre, les transferts d'air entre le volume intérieur et l'extérieur, c'est à dire le renouvellement d'air (RA) de la cellule, restent à définir.

L'étude des transferts d'air dans le bâtiment constitue en soi un domaine de recherche à part entière. En effet, les exigences des réglementations thermiques étant de plus en plus strictes, l'étude des transferts d'air prend une place importante dans l'étude des performances énergétiques des bâtiments. L'amélioration de la résistance thermique des enveloppes a permis de réduire les flux de chaleur conductif mais a de fait accru l'impact des autres transferts de chaleur, notamment convectifs. Une première solution consiste donc à améliorer la perméabilité à l'air de l'enveloppe pour limiter les transferts d'air entre les ambiances intérieure et extérieure. Bien que cette technique soit efficace du point de vue énergétique, elle fait apparaître de nouvelles problématiques, notamment celles liées à la qualité de l'air (Blondel et Plaisance 11 Karlson et Moshfegh 06) et à l'accumulation de l'humidité.

Plusieurs stratégies de ventilation existent à ce jour et permettent d'améliorer les performances énergétiques tout en préservant la qualité de l'air (Woloszyn *et al.* 09, Koffi 09). Une

seconde approche concerne la ventilation naturelle, qui présente l'avantage de ne nécessiter aucune énergie pour fonctionner. En effet, le renouvellement d'air résulte de la différence de pression entre l'ambiance intérieure et extérieure. Les systèmes de ventilation permettent d'imposer une différence de pression constante et donc de maîtriser le renouvellement d'air. Toutefois, et quel que soit le bâtiment considéré, il existe une différence de pression sous l'effet du vent et de la différence de masse volumique (effet de tirage thermique). Bien que variables dans le temps et dépendants de la géométrie du bâtiment, ces phénomènes peuvent être exploités pour créer un renouvellement d'air : c'est la ventilation naturelle. La réalisation d'un dispositif efficace peut être simple (ajout d'ouvertures à l'enveloppe (Santamouris *et al.* 08)) ou en ayant recours à des éléments architecturaux spécifiques, par exemple des cheminées solaires (Afonso et Oliveira 00). Compte tenu de la variabilité des conditions extérieures, et donc de la différence de pression, il est cependant plus difficile de prévoir le renouvellement d'air en conditions naturelles que pour un système de ventilation maîtrisé (Larsen et Heiselberg 08, Li et Desante 01, Li *et al.* 01).

Or les expériences réalisées sur la cellule test ont eu lieu en conditions naturelles, ce qui signifie que le renouvellement d'air de la cellule n'est pas constant mais doit être déterminé. De plus, cette étude se place dans le cadre des transferts couplés à l'échelle du bâtiment, il est donc aussi important de déterminer le renouvellement d'air que son impact sur les transferts de chaleur et de vapeur d'eau.

A.2 Bilan en vapeur d'eau et rôle du renouvellement d'air

Par exemple, l'impact sur les transferts de vapeur d'eau peut être mis en évidence à partir d'une séquence expérimentale sur laquelle un bilan en vapeur d'eau est appliqué. Cette séquence s'est déroulée du 5 au 13 février 2012 et peut être résumée à l'aide des points suivants :

- Les parois verticales sont composées de plaques de plâtre / pare-vapeur / ouate de cellulose / panneau de particules (soit la configuration de paroi 6, voir Chapitre I).
- Température intérieure maintenue à $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$;
- Génération de vapeur à débit constant ($\sim 200 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$) à partir du 06/02 à 13h pendant 28 heures (soit une masse de vapeur produite de plus de 5,5 kg) ;
- Renouvellement d'air en conditions naturelles.

Quelques mesures d'humidité absolue sont présentées dans le graphique de la Figure 40. La période durant laquelle la génération de vapeur a eu lieu est repérée par deux barres verticales sur le graphique. L'humidité absolue entre le parement intérieur et le pare-vapeur (HA1) suit l'humidité absolue de l'air intérieur (HA int), ce qui montre que les parements intérieurs (plaques de plâtre) ont un impact limité sur les transferts de vapeur d'eau. L'humidité de l'isolant juste derrière le pare-vapeur (HA2) n'est pas influencée par la génération de vapeur, ce qui prouve l'efficacité du pare-vapeur. Pour ce cas particulier, les transferts de vapeur entre l'air et les parois sont donc limités aux transferts avec les parements intérieurs.

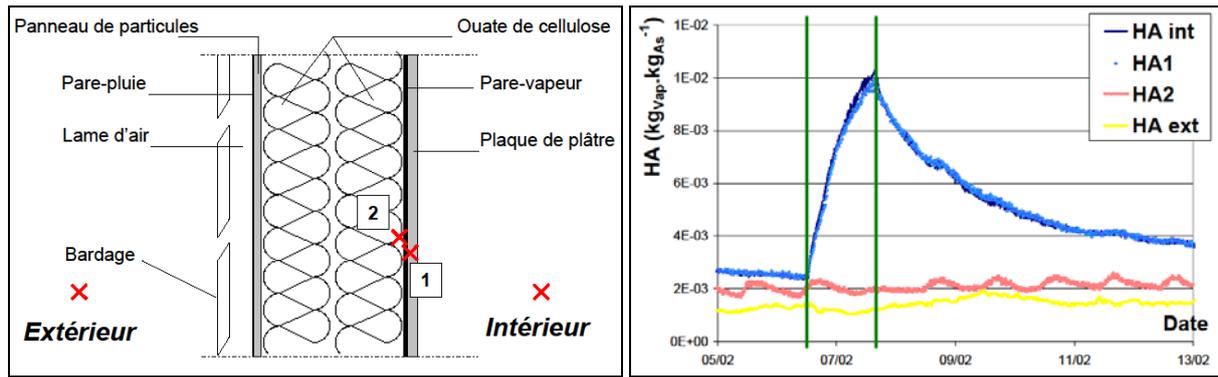


Figure 40 : Composition de la paroi et position de capteurs (gauche) et évolution de l'humidité absolue pour la séquence expérimentale du 05/02 au 13/02 – les barres verticales délimitent la période de génération de vapeur (droite)

L'équation de conservation de la vapeur d'eau est appliquée au volume d'air et comporte quatre termes : les transferts avec les parois, les infiltrations d'air, le générateur de vapeur, et enfin la capacité hygrique de l'air intérieur. Ces quatre termes peuvent être assimilés à des sources (ou à des puits) de vapeur et caractérisés par leur débit G . Le débit du générateur (G_{So}) est mesuré par pesée. G_{Int} représente la variation de la teneur en eau de l'air intérieur sur un pas de temps. Les débits d'infiltrations ($G_{Infiltr}$) et aux parois (G_{Parois}), ne sont pas connus directement mais peuvent être estimés par le bilan en humidité présenté dans Eq. 45. Cette approche est similaire à celle proposée par (Santos et Mendès 04).

$$\text{Eq. 45} \quad G_{Par} + G_{Infiltr} = -(G_{So} + G_{Int})$$

Le bilan peut être décomposé en trois étapes de 28 heures : avant la génération, pendant, puis juste après. Les résultats sont présentés dans le Tableau 15. Une valeur positive signifie que l'air intérieur reçoit de la vapeur d'eau, dans le cas contraire, il en cède (aux parois ou à l'air extérieur par infiltrations).

Tableau 15 : Débits moyens des différentes sources de vapeur (en g.h⁻¹) pour les trois étapes de l'expérience

| Etape | G_{So} | G_{Int} | $G_{Par} + G_{Infiltr}$ |
|----------------------|----------|-----------|-------------------------|
| Avant génération | 0 | 1 | -1 |
| Génération de vapeur | 200 | -18 | -182 |
| Après génération | 0 | 10 | -10 |

Lors de la phase d'humidification, seulement 10 % de la masse d'eau produite contribue à l'augmentation de l'humidité de l'air de la cellule. 90 % de la vapeur est donc absorbée par les parois ou évacuée par le renouvellement de l'air. À l'arrêt de la génération de vapeur, l'air et les parois évoluent vers un état d'équilibre hygrique (Hameury 06). Puis ce sont les débits d'infiltration qui pilotent l'évolution de l'humidité des parois et de l'air intérieur : lorsqu'une certaine quantité de vapeur est évacuée vers l'extérieur, les parois désorbent de la vapeur d'eau de manière à ce que le système tende vers l'équilibre. Les matériaux des parois horizontales (ici OSB au plancher, plâtre au plafond) participent également aux transferts de vapeur. En particulier, l'OSB au sol joue le rôle d'un important

tampon hygroscopique comme l'indiquent ses propriétés hygriques présentées dans le Tableau 16 : le plancher doit absorber près de 4,5 kg de vapeur d'eau pour que son humidité relative augmente de 30 à 50 % (lors de cette expérience, 5,5 kg de vapeur ont été générés et l'humidité relative de l'air intérieur a augmenté de 30 à 80 %).

Tableau 16 : Quantité de vapeur (en kg) contenue dans les matériaux pour différents taux d'humidité

| Humidité relative | OSB (0,45 m ³) | Plâtre (0,85 m ³) | Air à 20°C (50 m ³) |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 30 % | 10,3 | 0,77 | 0,26 |
| 50 % | 14,5 | 1,44 | 0,44 |
| 65 % | 21,9 | 2,03 | 0,57 |
| 80 % | 31,0 | 4,25 | 0,70 |
| 94 % | 70,2 | 7,65 | 0,83 |

Par ailleurs, les transferts de vapeur entre les parois et l'air intérieur ont déjà été validés dans le Chapitre I. Il est donc possible d'illustrer l'impact des infiltrations d'air sur le bilan de vapeur en effectuant une simulation de cette séquence expérimentale sans prendre en compte le renouvellement d'air. Les résultats sont présentés dans la Figure 41.

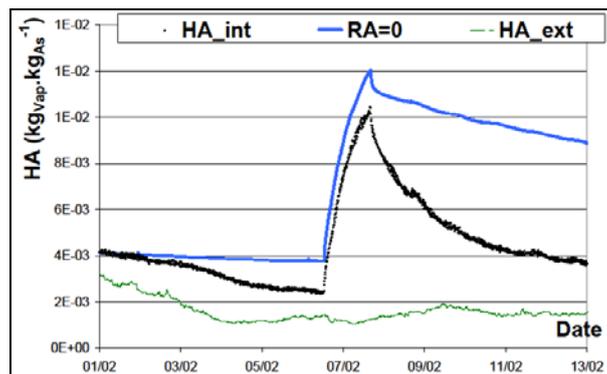


Figure 41 : Comparaison de l'humidité absolue de l'air intérieur mesurée et simulée avec HAM-Tools en négligeant le renouvellement d'air (courbe RA=0)

Les écarts importants entre les mesures et les résultats de la simulation illustrent bien le rôle non négligeable du renouvellement d'air dans le bilan de vapeur d'eau, bien que l'effet hygroscopique des parois soit important. L'évolution de l'humidité de l'ensemble de la cellule dépend donc du renouvellement d'air.

En première approximation, un débit d'infiltrations d'air pourrait être considéré comme constant, ce qui serait modélisable rapidement dans HAM-Tools. Cependant, cette hypothèse est difficilement valable dans le cas d'un renouvellement d'air en conditions naturelles, c'est-à-dire non contrôlées. Pour illustrer cela, l'exemple précédent est simulé une seconde fois en utilisant un renouvellement d'air constant. Puis, cette démarche est appliquée à une seconde séquence qui a eu lieu en mai 2009, similaire en ce qui concerne la composition des parois et le scénario, mais pour des conditions extérieures différentes. Les résultats sont présentés dans les graphiques de la Figure 42.

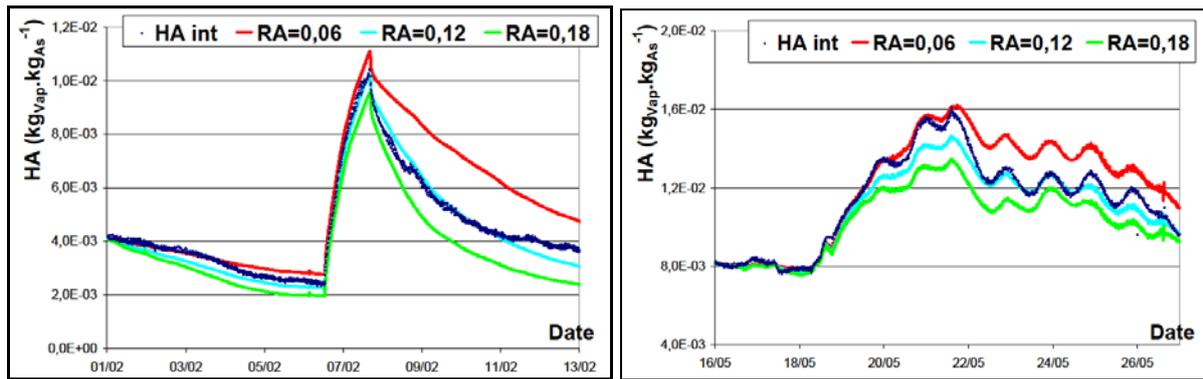


Figure 42 : Comparaison de l'humidité absolue de l'air intérieur mesurée et simulée avec HAM-Tools pour plusieurs renouvellements d'air constants (RA) pour la séquence expérimentale de février 2012 (gauche) et de mai 2009 (droite)

Dans le cas de la séquence expérimentale de février 2012, les résultats qui s'approchent le plus des mesures sont ceux obtenus avec un renouvellement d'air constant de 0,12 vol.h⁻¹ (soit 6 m³.h⁻¹). L'humidité de l'air intérieur est cependant sous estimée à la fin de la décroissance. Pour la séquence de mai 2009 par contre, les résultats les plus proches des mesures lors de la phase de génération de vapeur sont obtenus avec un renouvellement d'air deux fois moins important (soit 3 m³.h⁻¹). L'hypothèse d'un renouvellement d'air constant de la cellule n'est donc pas valable. Le but de ce chapitre est donc de déterminer les transferts d'air à l'échelle de la cellule en fonction des conditions extérieures.

En premier lieu, la perméabilité à l'air de l'enveloppe sera caractérisée à l'aide d'un instrument imposant une différence de pression entre l'ambiance intérieure et extérieure. Cette méthode permet d'identifier le comportement global de la cellule mais ne suffit pas à décrire le renouvellement d'air en conditions naturelles. Pour cela, il faut en effet pouvoir décrire les pressions mises en jeu par les effets du vent et du tirage thermique. Afin de valider la description de ces phénomènes, il a été décidé de mettre en place une mesure du renouvellement d'air qui se déroule en conditions naturelles (mesure par Gaz Traceur) et pour différentes conditions extérieures. Après une description de la méthode de mesure et une présentation des résultats obtenus, une modélisation de la partie aéraulique du modèle sera proposée. Puis le modèle sera validé à partir des mesures faites par gaz traceur et ses performances seront discutées.

B Transferts d'air à l'échelle du bâtiment

B.1 Perméabilité de l'enveloppe

La relation générale qui lie le débit d'air en fonction de la différence de pression est donnée par l'équation Eq. 46.

$$\text{Eq. 46} \quad q_{v,i} = C_i \cdot \Delta p_i^{n_i}$$

Appliquée à l'échelle du bâtiment tout entier, cette relation caractérise la perméabilité à l'air de l'enveloppe ($q_{v,i}$ représente les débits infiltrations). C'est un indicateur des performances énergétiques de l'enveloppe, de plus en plus répandu dans le domaine du bâtiment : il est donc possible de trouver facilement de la documentation et des équipements permettant de réaliser ce type de mesure. Ici, deux appareils différents ont été utilisés : une Porte Soufflante et le Perméascope[®] (instrument développé par la société ALDES) dont les photos sont proposées dans la Figure 43.



Figure 43 : Photo de la Porte Soufflante (gauche) et du Perméascope[®] (droite)

Le principe de fonctionnement de ces deux appareils est similaire : ils permettent de mesurer le débit extrait pour plusieurs différences de pression imposées (ici entre 20 et 100 Pa). Les coefficients C et n (Eq. 46) sont ensuite déterminés par régression linéaire. Cette mesure est encadrée par une norme qui stipule que toutes les ouvertures doivent être obstruées (bouches d'aération) et les portes et fenêtres fermées. Ainsi, le débit extrait correspond bien aux débits d'infiltrations. (Walker *et al.* 98) ont montré que cette approche restait valide pour des conditions naturelles bien que les écarts de pressions soient moindres (plus généralement entre 0 et 20 Pa).

La principale différence entre ces deux appareils provient du fait que le Perméascope[®] est installé dans la cellule et rejette l'air par les conduits d'aération situés dans les combles alors que la Porte Soufflante est installée en remplacement de la porte de la cellule. De fait, la mesure avec le Perméascope[®] permet de prendre en compte les infiltrations d'air au niveau de la porte. Cette différence est significative ici car la porte est l'unique percement des parois verticales (aucune fenêtre n'est installée), et constitue donc un passage privilégié pour les infiltrations d'air.

Concernant la précision de ces mesures, il est assez difficile de la quantifier : en effet, les instruments permettent de réaliser des mesures de pression et de débit avec une excellente précision, ce qui permet la plupart du temps d'obtenir une relation linéaire entre le débit et le logarithme de la différence de pression avec un coefficient de régression R^2 proche de 1. De fait, l'incertitude de mesure est plutôt due à la qualité de la mise en œuvre de la mesure (mise en œuvre de l'appareil, efficacité des joints placés sur la porte soufflante ou sur le tuyau du Perméascope[®]...). Les mesures présentées par la suite ont toutes été conduites par des équipes spécialisées, ce qui devrait donc limiter les erreurs de mesure.

Enfin, l'utilisation des indices n_{50} et I_4 permet de comparer plusieurs mesures simplement. n_{50} représente le débit d'infiltration sous une différence de pression de 50 Pa ramené au volume de l'air intérieur (ici 50 m^3). Cet indice est utilisé comme référence par plusieurs standards énergétiques, dont le standard « Passiv Haus » qui exige une valeur inférieure à $0,6 \text{ vol.h}^{-1}$. L'indice I_4 est défini autrement (voir RT-2005, partie "Règlementation" Art 20, p6). Il représente le débit d'infiltration sous une différence de pression de 4 Pa, ramené à la surface des parois froides (ici les parois verticales, 45 m^2). D'après un rapport émis en 2006 par le CETE de Lyon (Centre d'Etudes Techniques), la valeur équivalente de l'indice I_4 à l'indice n_{50} pour une maison passive serait de 0,16. Dans le cas du bâtiment étudié ici, il peut être plus judicieux de considérer l'indice I_4 que n_{50} car le volume de l'air intérieur est très petit par rapport à celui d'un logement « traditionnel », ce qui est pénalisant dans le calcul de l'indice n_{50} . Toutefois, la comparaison des indices pour différentes configurations de paroi et sur un même bâtiment reste pertinente.

Les résultats obtenus avec les deux appareils de mesure présentent des écarts de 30 % et 40 % pour les indices I_4 et n_{50} respectivement (voir Tableau 17). Ces écarts sont suffisamment importants pour être imputables à la méthode (le Perméascope® prend en compte les infiltrations au niveau de la porte) plutôt qu'à la qualité de la mise en œuvre. Par conséquent, seules les mesures effectuées avec le Perméascope® seront considérées par la suite.

Tableau 17 : Comparaison des mesures de perméabilité effectuées pour une même configuration de paroi avec la porte soufflante et le Perméascope®

| Instrument | C | n | I_4 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) | n_{50} (vol.h^{-1}) |
|------------------|------|------|--|----------------------------------|
| Porte Soufflante | 2,64 | 0,73 | 0,16 | 0,9 |
| Perméascope® | 5,39 | 0,63 | 0,28 | 1,3 |

La perméabilité à l'air dépend de l'enveloppe, et donc de la composition des parois. Comme la configuration des parois verticales a été modifiée à plusieurs reprises, les mesures de perméabilité ont été répétées pour plusieurs d'entre elles et sont présentées dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Mesures de perméabilité avec le Perméascope® pour différentes configurations de paroi

| Isolant | Pare-vapeur | C | n | I_4 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) | n_{50} (vol.h^{-1}) |
|--------------------|-------------|------|------|--|----------------------------------|
| Laine de verre | Non | 5,39 | 0,63 | 0,28 | 1,3 |
| Laine de verre | Oui | 2,16 | 0,7 | 0,13 | 0,7 |
| Ouate de cellulose | Non | 5,64 | 0,69 | 0,33 | 1,7 |
| Ouate de cellulose | Oui | 2,92 | 0,73 | 0,18 | 1,0 |

Plusieurs conclusions peuvent être déduites de ces mesures :

- L'utilisation d'un pare-vapeur augmente fortement l'étanchéité à l'air de l'enveloppe : l'indice I_4 est diminué de près de 55 % dans le cas de la laine de verre ($S_d = 78 \text{ m}$), 45 % pour la ouate de cellulose ($S_d = 18 \text{ m}$). Ainsi, les valeurs de l'indice I_4 équivalentes à celles du standard « Passiv Haus » sont presque systématiquement atteintes lorsque le pare-vapeur est utilisé ;

- La perméabilité à l'air est légèrement plus faible lorsque la ouate de cellulose est utilisée comme isolant en remplacement de la laine de verre. Cela peut s'expliquer par le fait que la ouate est mise en œuvre par un procédé de projection par voie humide et qu'un léger tassement est constaté au bout de quelques mois (de l'ordre de 0,01 m). Ce phénomène n'est pas observé sur la laine de verre qui est conditionnée en panneaux ;
- Les mesures faites sur les configurations de paroi pour lesquelles aucun pare-vapeur n'est installé sont supérieures au standard « Passiv Haus », et ce quelque soit l'indice considéré. Cependant, elles reflètent une bonne étanchéité à l'air de la cellule par rapport au parc actuel ; (Sfakianaki *et al.* 08) considèrent que l'étanchéité est bonne pour une valeur de n_{50} inférieure à 4.

B.2 Répartition des débits d'air

La mesure de perméabilité, réalisée avec le Perméascope[®], est une mesure globale, c'est à dire qu'elle prend en compte toutes les infiltrations d'air pour une seule mesure. Pourtant, les transferts d'air au niveau de la porte sont différents de ceux qui apparaissent au niveau des parois verticales. De plus, la mesure de perméabilité ne permet pas de déterminer les infiltrations au niveau de la bouche d'aération dans le plafond, fermée lors de la mesure mais ouverte durant les expériences. Toutefois, à partir de plusieurs mesures de perméabilité, il est possible d'identifier une loi débit-pression similaire à celle présentée par Eq. 46 pour chaque passages que l'air peut emprunter (parois, porte, bouche d'aération).

Tout d'abord, la mesure par Porte Soufflante ne prend en compte que les infiltrations au niveau des parois. Avec le Perméascope[®], les infiltrations au niveau de la porte s'ajoutent (voir Figure 44). Les infiltrations au niveau de la porte peuvent donc être estimées en soustrayant les deux relations (Eq. 47). Cette relation est valable quelle que soit la configuration de paroi étudiée.

$$\text{Eq. 47} \quad q_{V,Porte} = 5.39 \cdot \Delta p_{Porte}^{0.63} - 2.64 \cdot \Delta p_{Porte}^{0.73}$$

En ce qui concerne les infiltrations au niveau des parois, elles varient selon la configuration de paroi étudiée (voir Tableau 18). Elles sont estimées par soustraction entre une mesure faite par le Perméascope[®] avec Eq. 47 (infiltrations au niveau de la porte). Enfin, elles sont supposées équitablement réparties entre les différentes faces verticales, ce qui permet d'écrire Eq. 48 pour une paroi verticale donnée.

$$\text{Eq. 48} \quad q_{V,Mur} = \frac{1}{4} \cdot \left(C_{Perméascope} \cdot \Delta p_{Mur}^{n_{Perméascope}} - q_{V,Porte} \right)$$

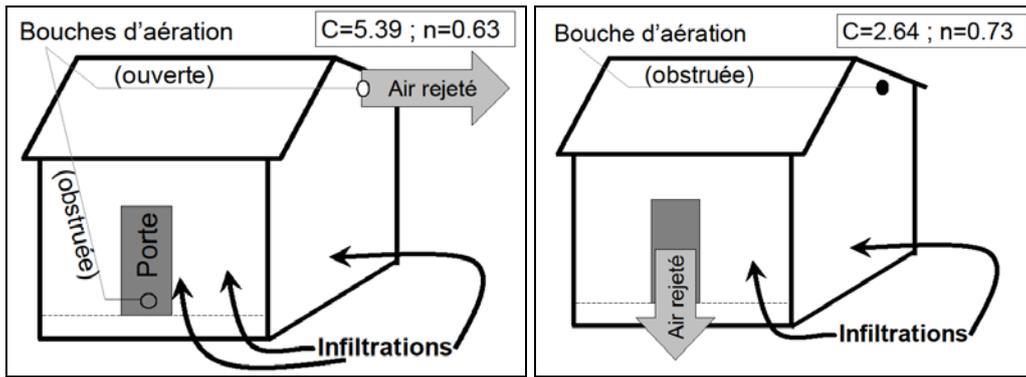


Figure 44 : Schéma de principe de la mesure réalisée avec le Perméscope® (gauche) et avec la Porte Soufflante (droite), laine de verre, pas de pare-vapeur.

Un second type de mesure a été réalisé avec le Perméscope®. L'air est rejeté par une autre ouverture, située dans la porte et habituellement obstruée, et la bouche d'aération située dans le plafond est laissée ouverte (voir Figure 45). Les résultats sont présentés dans le Tableau 19.

Tableau 19: Comparaison des résultats obtenus avec le Perméscope® utilisé avec la bouche d'aération fermée et ouverte

| Type de mesure | Pare-vapeur | C | n | I_4 ($m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$) | n_{50} ($vol \cdot h^{-1}$) |
|------------------|-------------|-------|------|---|---------------------------------|
| Aération fermée | Oui | 2,92 | 0,73 | 0,18 | 1,0 |
| Aération ouverte | Oui | 13,03 | 0,60 | 0,67 | 2,7 |

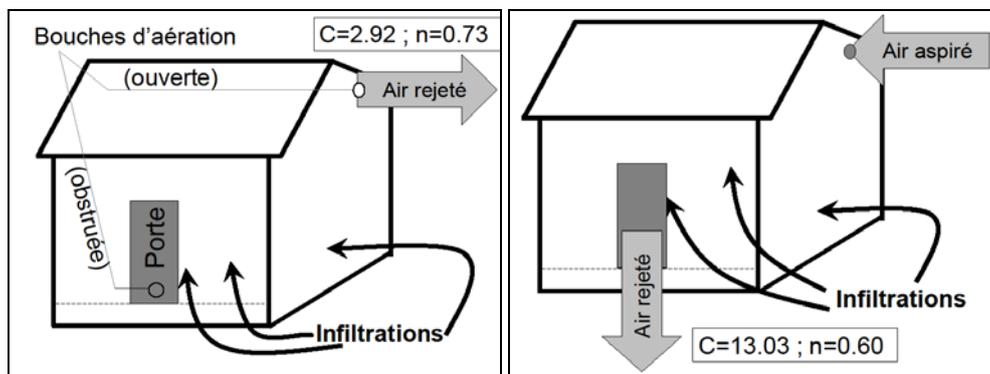


Figure 45 : Schéma de principe des deux mesures réalisées avec le Perméscope® (configuration de paroi : ouate de cellulose, pare-vapeur).

La relation débit-pression au niveau de la bouche d'aération peut être exprimée par soustraction à partir de ces deux mesures comme le présente Eq. 49.

$$Eq. 49 \quad q_{V,BA} = 13.03 \cdot \Delta p_{BA}^{0.60} - 2.92 \cdot \Delta p_{BA}^{0.73}$$

B.3 Estimation des pressions motrices en conditions naturelles

Pour estimer les débits d'infiltration en conditions naturelles, il est également nécessaire de déterminer la différence de pression de part et d'autre de chaque orifice Δp_i . Elle résulte de la

combinaison de deux phénomènes physiques : le tirage thermique et l'impact du vent sur les parois de la cellule comme le montre Eq. 50.

$$\begin{aligned} \text{Eq. 50} \quad \Delta p_i &= p_{Int} - p_{Ext,i} \\ &= p_{Int} - (\Delta p_{Th,i} + p_{Dyn,i}) \end{aligned}$$

Le tirage thermique est en fait la différence de pression hydrostatique entre les ambiances intérieures et extérieures et se calcule au niveau d'un orifice dans la paroi. Une approche plus complète de ce phénomène est présentée par (Koffi 09) et permet d'aboutir à l'équation générale Eq. 51. $z_{Th,i}$ représente la hauteur du tirage thermique, c'est-à-dire la différence d'altitude entre l'orifice et le point de référence pour les pressions intérieures et extérieures.

$$\text{Eq. 51} \quad \Delta p_{Th,i} = -g \cdot z_{Th,i} \cdot (\rho_{Ext} - \rho_{Int})$$

Formellement, la masse volumique de l'air humide dépend de la température, de l'humidité absolue et de la pression atmosphérique comme le montre Eq. 52.

$$\text{Eq. 52} \quad \rho = \frac{p_{atm}(1+w)}{(w \cdot r_{vap} + r_{As}) \cdot T}$$

Pour un orifice dont la hauteur z_{Th} peut être identifiée, il est donc relativement simple de déterminer la différence de pression due au tirage thermique à partir des mesures effectuées à la station météo et sur l'air intérieur de la cellule.

Le second moteur des transferts d'air est la surpression (ou dépression) provoquée par le vent sur les parois du bâtiment. La pression dynamique exercée sur un élément est donnée par :

$$\text{Eq. 53} \quad p_{Dyn,i} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Ext} \cdot C_p(\theta) \cdot v_Z^2$$

Le coefficient de pression C_p représente l'impact de l'incidence du vent θ sur la pression exercée par le vent. Ces valeurs peuvent varier fortement selon la géométrie du bâtiment et la position des orifices. Toutefois, il n'existe pas de méthode générale qui permette de déterminer simplement les valeurs des coefficients C_p pour un cas réel comme ici. Une simplification courante consiste à utiliser des valeurs issues de la littérature. Cette hypothèse sera discutée à la fin de ce chapitre (D.3). Ici, les observations expérimentales présentées dans (Swami et Chandra 88) et reprises dans (Sharag-Eldin 07) ont été utilisées. Les valeurs présentées dans le Tableau 20 ont été implémentées dans le logiciel de simulation HAM-Tools et correspondent au cas d'une paroi verticale exposée directement au vent (elle n'est protégée par aucun obstacle).

Tableau 20 : Valeurs des coefficients C_p utilisés dans HAM-Tools en fonction de l'incidence du vent sur la paroi d'après (Sharag-Eldin 07)

| θ (°) | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | 135 | 150 | 165 | 180 |
|--------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C_p (-) | 0,77 | 0,69 | 0,54 | 0,35 | 0,08 | -0,23 | -0,61 | -0,88 | -0,92 | -0,77 | -0,58 | -0,50 | -0,42 |

Les mesures de vitesse et de direction du vent sont effectuées à proximité de la cellule. Toutefois, la mesure étant réalisée à une altitude de 10 m, elle n'est pas directement applicable à Eq. 53 : il faut en effet appliquer des coefficients correcteurs qui permettent de rendre compte de la différence de vitesse de l'air en fonction de l'altitude et de la rugosité du terrain. Plusieurs formulations ont été proposées à ce jour et d'après (Koffi 09), l'une d'entre elles (Eq. 54) est commune à plusieurs ouvrages (Allard 98, Hagentoft 01, Awbi 03) et a été adoptée par la British Standard Institution [BS5925, 1991].

Eq. 54
$$v_z = v_{10} \cdot k_T \cdot z^{a_T}$$

Les coefficients $\{k_T ; a_T\}$ associés sont présentées dans le Tableau 21. Une illustration de l'évolution de la vitesse du vent en fonction de l'altitude est proposée dans la Figure 46 pour ces différents coefficients.

Tableau 21 : Valeurs des coefficients $\{k_T ; a_T\}$ communes à (Allard 98), (Hagentoft 01 ch I.4.1.1) et (Awbi 03)

| Type de terrain | k_T | a_T |
|-----------------------------------|-------|-------|
| Ouvert (rase campagne) | 0,68 | 0,17 |
| Parsemé d'obstacles distants | 0,52 | 0,20 |
| Urbain – densité faible à moyenne | 0,35 | 0,25 |
| Centre ville | 0,21 | 0,33 |

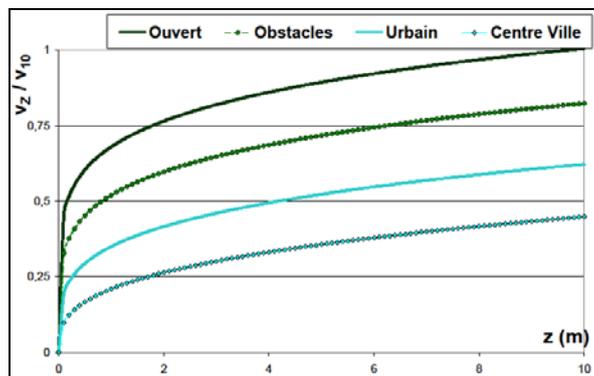


Figure 46 : Evolution du ratio v_z / v_{10} en fonction de l'altitude z pour les différents coefficients de terrain présentés dans le Tableau 21.

Finalement, la cellule peut être vue comme un volume d'air qui échange avec l'extérieur via un nombre n d'orifices. Dans HAM-Tools, la pression extérieure est calculée au niveau de chacun des i orifices à partir des conditions extérieures. Puis, la différence avec la pression intérieure Δp_i permet de calculer les débits d'air $q_{v,i}$ (voir Eq. 47, Eq. 48 et Eq. 49). Le renouvellement d'air (RA) est la somme de ces n débits et est utilisé pour réaliser des bilans de chaleur et d'humidité sur l'air intérieur. Enfin, un bilan de masse permet de déterminer la valeur de la pression intérieure qui sera utilisée au pas de temps suivant. Le principe de cette démarche est présenté dans le schéma de la Figure 47.

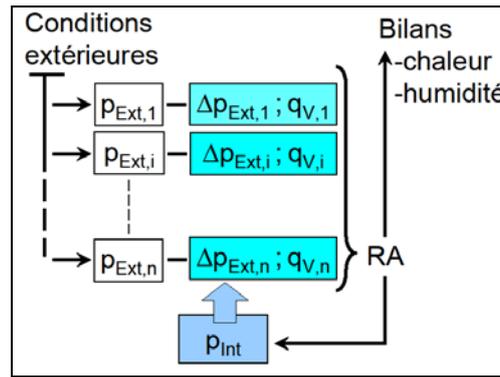


Figure 47 : Schéma de principe du calcul du renouvellement d'air dans HAM-Tools

B.4 Paramètres à identifier

Six orifices ont été identifiés (4 parois verticales, porte, bouche d'aération dans le plafond débouchant sur la face Ouest). Pour chacun d'entre eux et en conditions naturelles, le transfert d'air résulte de deux phénomènes distincts qu'il est possible de quantifier moyennant l'identification de deux paramètres :

- La hauteur de tirage thermique de l'orifice z_{Th} ;
- Les coefficients de terrain $\{a_T ; k_T\}$.

Il est facile de définir la hauteur de tirage thermique pour le cas de la bouche d'aération ($z_{Th,BA}$) car la position de cet orifice est connue et ponctuelle. Cependant, les cinq autres orifices ne sont pas ponctuels mais étendus, ce qui ne permet pas de définir une unique valeur de la hauteur de tirage thermique. Ce constat a été renforcé par l'observation des parois intérieures à l'aide d'une caméra infrarouge lors des mesures de perméabilité : aucun effet lié aux transferts d'air n'a été détecté. En ce qui concerne la porte par contre, des infiltrations d'air ont été repérées tout autour du cadre, et plus particulièrement au niveau des extrémités verticales et de la poignée. Dans un cas comme dans l'autre, il est donc difficile de définir une hauteur z_{Th} . La solution retenue ici consiste à définir une hauteur équivalente qui représente l'effet moyen du tirage thermique au niveau des parois verticales ($z_{Th,Mur}$) et de la porte ($z_{Th,Porte}$).

D'autre part, il est difficile de déterminer quels sont les coefficients de terrain les plus adaptés à la situation. En effet, l'environnement n'est pas homogène tout autour de la cellule test (terrain cultivé, autres cellules tests, zone d'activité). De plus, il est important de rappeler que le choix des coefficients C_p , représentant l'effet de l'incidence du vent sur l'ensemble d'une paroi verticale ($> 10 \text{ m}^2$), influe également. Or la surface de la bouche d'aération est réduite ($0,01 \text{ m}^2$) et constitue un point particulièrement sensible aux variations de pression (voir Eq. 49). Au final, il a été décidé d'utiliser les valeurs de C_p issues de la littérature en première approximation et d'ajuster les effets du vent via l'identification du couple de coefficient de terrain $\{k_T ; a_T\}$.

Les difficultés rencontrées pour définir les effets du vent et du tirage thermique sont illustrées schématiquement dans la Figure 48. L'identification des paramètres portera donc sur les hauteurs équivalentes de tirage thermique $Z_{Th,Mur}$ et $Z_{Th,Porte}$ et sur les coefficients de terrain $\{k_T ; a_T\}$.

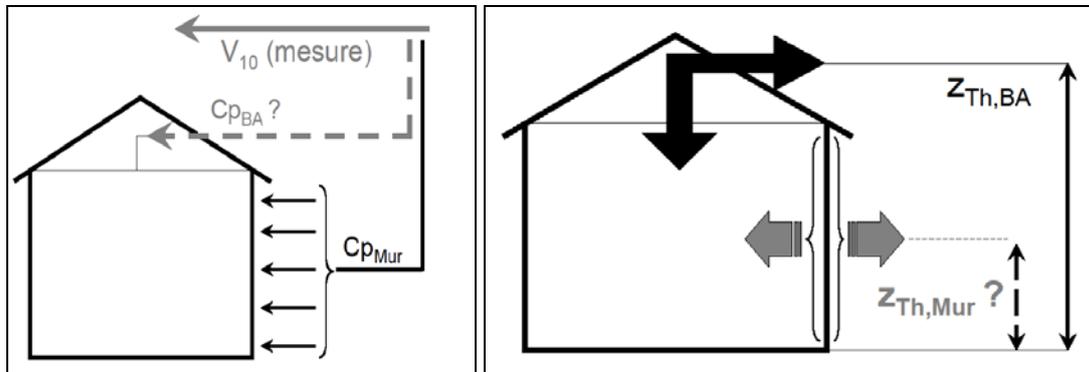


Figure 48 : Schémas présentant les difficultés rencontrées pour définir les effets du vent à une position particulière (gauche) et le tirage thermique pour une surface (droite)

C Mesures du renouvellement d'air

Les mesures de perméabilité et les données de la littérature ne suffisent donc pas pour déterminer le renouvellement d'air de la cellule en conditions naturelles. Les mesures en soufflerie permettent de déterminer précisément quels sont les effets du vent sur un bâtiment (Koinakis 05) mais sont relativement coûteuses. L'utilisation d'outils numériques tels que les simulations CFD permettent d'obtenir des résultats satisfaisants pour un coût moindre (Van Hoof et Blocken 10). Toutefois, la qualité des résultats est liée à la précision et à la pertinence des simulations. Une alternative intéressante est d'avoir recours à la technique de mesure dite des Gaz Traceurs, applicable en conditions naturelles, et complémentaires aux mesures de perméabilité (Sfakianaki *et al.* 08). Cette méthode trouve d'autres applications lorsqu'il s'agit de valider la qualité de l'air (Melikov *et al.* 02), vérifier l'efficacité d'un système de ventilation (Tanner *et al.* 00) ou l'étanchéité de volumes confinés (Baker 04) et comprendre les transferts d'air dans un bâtiment multizones (Karlsson et Moshfegh 07). Ici, la connaissance du renouvellement d'air effectif de la cellule permettra l'identification des coefficients de terrain $\{k_T ; a_T\}$ et des hauteurs de tirage thermique.

C.1 Choix du gaz traceur et de la méthode de mesure

D'une manière générale, le principe d'une mesure par gaz traceurs consiste à introduire un gaz spécifique (i.e. un gaz traceur) dans le volume d'air dont on veut étudier le comportement. Plusieurs techniques et gaz peuvent être recensés dans la littérature et leur fiabilité dépend du contexte de la mesure. Aussi, il est nécessaire de choisir la nature du gaz et le type d'injection avec soin. En ce qui concerne le gaz en lui-même, (Cheong 01) propose la série de critères suivante :

- Ne poser aucun problème de sécurité pour les personnes ou pour l'environnement ;

- Etre très faiblement réactif avec les autres éléments de l'expérience ;
- Etre d'une masse volumique voisine de celle de fluide en présence dominante (ici, de l'air) ;
- Etre absent de l'atmosphère, ou alors en faible quantité et de manière stable ;
- Pouvoir être mis en œuvre pour un coût raisonnable.

Bien entendu, un tel gaz n'existe pas. Aussi, il est nécessaire d'effectuer des compromis selon le type d'expérience réalisée. Les gaz les plus couramment rencontrés sont présentés ci-dessous et comparés dans le Tableau 22.

- Hexafluorure de soufre (SF₆) : ce gaz était le plus utilisé jusqu'à récemment (Chao *et al.* 04, Behrentz *et al.* 04) car détectable à de très petites concentrations et permettant d'obtenir de bons résultats (Laporthé *et al.* 01). Il présente cependant un Potentiel de Réchauffement Planétaire très élevé (22 200 fois celui du CO₂) et est visé par le protocole de Kyoto et par la réglementation européenne. Il y est stipulé que tous les moyens techniques doivent être mis en œuvre pour confiner, récupérer et recycler les émissions de ce gaz. Ce seul point suffit à écarter ce choix dans le cadre de cette étude ;
- Protoxyde d'azote (N₂O) : ce gaz est souvent utilisé en remplacement du SF₆ (Koinakis 05, Karlsson et Moshfegh 07). Le principal inconvénient de ce choix est le coût lié à l'instrumentation ;
- Dioxyde de carbone (CO₂) : son principal inconvénient est d'être déjà présent dans l'atmosphère en quantité variable (de 350 à 600 ppm en ville). Cependant, cette solution est de plus en plus utilisée (Tanner *et al.* 00, Amin *et al.* 09, Muhic et Butala 06), en raison des faibles coûts que sa mise en œuvre nécessite, y compris pour des expériences ayant lieu en conditions non contrôlées (Santamouris *et al.* 08, Blondel et Plaisance 11). Par ailleurs, (Baker *et al.* 04) ont montré lors d'une expérience en laboratoire, que les mesures avec ce gaz pouvaient être aussi précises que celles effectuées avec du N₂O.

Tableau 22 : Comparaison des différents gaz à partir des critères définis par (Cheong 01)

| Critère | SF ₆ | N ₂ O | CO ₂ |
|---|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Risque (personnes, environnement) | Effet de serre | Aucun ⁽¹⁾ < 300 ppm | Aucun ⁽²⁾ < 30000 ppm |
| Faible réactivité chimique | ✓ | ✓ | ✓ |
| Densité voisine de 1,2 kg.m ⁻³ | 6,16 | 1,9 | 1,87 |
| Absent de l'atmosphère | ✓ | ✓ | Non (~ 500 ppm) |
| Coût de la mise en œuvre | N.C. | ≥ 6000 € | 3500 € |

⁽¹⁾ Fiche toxicologie FT267 protoxyde d'azote, INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité)

⁽²⁾ Fiche toxicologie FT238, dioxyde de carbone, INRS

Hormis le fait que le dioxyde de carbone soit présent dans l'atmosphère, ce gaz correspond aux besoins de l'étude. Cet inconvénient pouvant être contourné en effectuant une mesure en intérieur et en extérieur simultanément, le CO₂ a été retenu en raison du faible coût de mise en œuvre. Enfin, les risques pour les personnes restent tolérables pour des concentrations élevées (30000 ppm) par rapport au niveau atmosphérique moyen (500 ppm).

Concernant le mode d'injection du gaz, (Cheong 01) recense 4 méthodes :

- Débit d'injection constant : le débit d'injection est connu avec précision et maintenu pendant toute la durée de l'expérience. Les débits d'infiltrations sont déterminés en effectuant un bilan du système. Cette méthode est adaptée pour des mesures sur de longues durées, et donc pour des phénomènes variables dans le temps (Afonso et Oliveira 00). Elle présente l'inconvénient de nécessiter une excellente maîtrise du débit d'injection et consomme une grande quantité de gaz ;
- Maintient d'une concentration constante : un système de régulation maintient une concentration de gaz constante pendant toute la durée de l'expérience (Chao *et al.* 04, Karlsson et Moshfegh 07). Le débit de gaz émis à chaque instant est alors proportionnel aux débits d'infiltrations. Cette méthode consomme beaucoup moins de gaz que la précédente mais nécessite un excellent réglage de la régulation du système qui pilote l'émission du gaz ;
- Injection périodique : cette méthode consiste à injecter une petite quantité de gaz et à mesurer le temps qu'elle met à atteindre les différents points du système (Tanner *et al.* 00) : elle est donc peu adaptée à cette étude ;
- Evolution libre depuis un palier en concentration : une grande quantité de gaz est mélangée au volume d'air puis sa décroissance au cours du temps est observée. Cette méthode est simple à mettre en œuvre et répandue (Muhic et Butala 06, Sfakianaki *et al.* 08, Blondel et Plaisance 11) mais ne permet pas de contrôler la durée de l'expérience.

La méthode d'évolution libre depuis un palier a été sélectionnée en raison de la simplicité de sa mise en œuvre et de sa robustesse. De plus, (Chao *et al.* 04) ont comparé cette méthode avec celle du maintien d'une concentration constante et obtiennent des résultats similaires. La durée limitée de l'expérience peut présenter un inconvénient, compensé ici par la bonne étanchéité à l'air du bâtiment. En effet, il est possible de réaliser des mesures sur plusieurs heures pour peu que la quantité injectée initialement soit suffisante.

L'équation de conservation de la masse du gaz traceur est présentée dans Eq. 55 ci-dessous.

$$\text{Eq. 55} \quad \frac{dc_{Int}}{dt} = \frac{q_V}{V} \cdot (c_{Ext} - c_{Int})$$

En première approximation, la concentration extérieure et le renouvellement d'air peuvent être considérés constants. Ainsi, l'équation différentielle Eq. 55 peut être résolue simplement, ce qui permet de calculer la durée de l'expérience (ou temps de la décroissance t_{Decr}) en fonction des seuils de début et de fin d'expérience ($c_{Int,0}$ et $c_{Int,Fin}$ respectivement) comme le montre l'équation Eq. 56 ci-dessous.

$$\text{Eq. 56} \quad t_{Decr} = \frac{V}{q_V} \cdot \ln \left(\frac{c_{Int,0} - c_{Ext}}{c_{Int,Fin} - c_{Ext}} \right)$$

Plus le seuil de fin d'expérience est bas, plus l'expérience dure longtemps ce qui devrait permettre de mieux apprécier l'influence des conditions extérieures. Cependant, une valeur trop basse de ce seuil diminue la précision de la mesure. Pour le seuil de début d'expérience, il est intéressant

d'atteindre le taux de saturation de l'appareil afin de profiter de la totalité de l'échelle de mesure. De plus, un opérateur devant pénétrer (puis sortir) de la cellule pour émettre le gaz, dépasser la saturation de l'appareil permet de limiter l'influence de l'opérateur sur la mesure. Il apparaît donc que le choix de l'appareil de mesure conditionne celui des seuils de début et de fin d'expérience, et donc la précision de la mesure.

C.2 Instrumentation et protocole expérimental

La quantité de dioxyde de carbone présente dans l'air est mesurée par des analyseurs à absorption infrarouge. L'instrument est constitué d'une source d'énergie infrarouge, ici un filament chauffé, et d'un filtre optique qui sélectionne la partie du spectre correspondant à la raie d'absorption du dioxyde de carbone ($\sim 4 \mu\text{m}$). Le rayonnement reçu est enfin comparé à une référence.

Un premier analyseur a été installé en extérieur (marque CIMA), au niveau de la station météo, et mesure la concentration de CO_2 par diffusion. Un second (marque ADC), installé en intérieur, est plus complet et comporte une pompe prélevant l'air de la cellule avec un débit de $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ainsi qu'un circuit secondaire permettant la tare du système. Quelques précisions sur ces appareils sont données dans le Tableau 23 ci-dessous.

Tableau 23 : Propriétés techniques des deux analyseurs infrarouges

| Marque | Emplacement | Mesure | Echelle | Précision | Sortie |
|--------|-------------|-----------------|---------------|---------------|-----------|
| CIMA | Extérieur | Par diffusion | 0 - 3000 ppm | ± 30 ppm | 4 - 20 mA |
| ADC | Intérieur | Par prélèvement | 0 - 10000 ppm | ± 100 ppm | 4 - 20 mA |

Un bon compromis entre la durée de l'expérience et les capacités de l'analyseur ADC est de limiter la mesure à l'intervalle [9500 ; 2000] ppm. En supposant la concentration extérieure constante et égale à 500 ppm et un renouvellement d'air constant de $6 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, l'expérience devrait durer 15h, ce qui semble suffisant. La précision de la mesure du temps de décroissance, déterminée par un calcul d'incertitude, est de l'ordre de 4 % (soit 0h35 pour le cas présenté ici, équivalent à $0,23 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$).

Pour réaliser une mesure de qualité, l'échantillon de gaz analysé doit être représentatif du volume d'air de la cellule. La qualité du brassage de l'air et la multiplication des points de mesure apparaissent alors comme des paramètres essentiels (Van Buggenhout *et al.* 09). Pour cela, quatre ventilateurs sont installés dans la cellule et brassent l'air à faible vitesse. Un circuit pneumatique (voir Figure 49) est raccordé à l'analyseur afin de fournir quatre points d'échantillonnage. Les tubes sont tous de même longueur afin que les pertes de charge du système soient équilibrées et leurs orifices sont positionnés de la façon suivante :

- Un premier est posé sur le sol, à proximité de la paroi Est ;
- Un second est suspendu à 1 m du sol, à proximité du ventilateur de la paroi Sud ;
- Un troisième est collé contre la paroi Nord, à 1,5 m du sol, à 1 m de la porte ;
- Le dernier est fixé à plus de 2 m de hauteur, sur le mât mobile, à proximité de la paroi Ouest.

Enfin, le gaz est injecté directement depuis une bouteille située dans la cellule. L'analyseur est relié à l'une des centrales d'acquisition, déjà installée dans la cellule, et les données sont enregistrées avec une fréquence d'une minute. Toutes les expériences se sont déroulées en suivant le protocole suivant :

- Entrée de l'opérateur dans la cellule ;
- Réalisation d'une tare sur l'analyseur intérieur ;
- Emission de dioxyde de carbone jusqu'à saturation de l'analyseur (taux $\text{CO}_2 > 10000$ ppm) ;
- Sortie de l'opérateur et suivi de l'évolution de la concentration depuis un poste délocalisé ;
- Fin de l'expérience lorsque la concentration intérieure est inférieure à 2000 ppm.

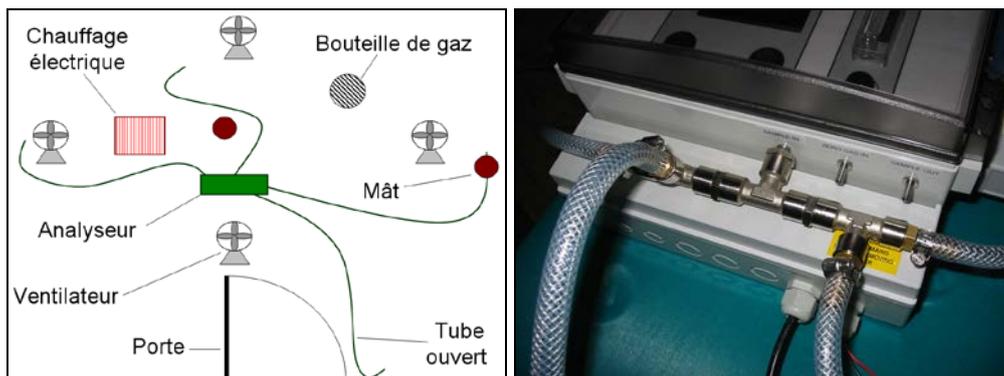


Figure 49 : Schéma des différents composants du dispositif expérimental (gauche), photo de l'analyseur et du raccordement aux tubes prélevant l'air dans la cellule (droite)

Par ailleurs, plusieurs expériences préliminaires ont été menées afin de tester la validité de la méthode de mesure et sont présentées dans l'Annexe 8.

C.3 Analyse globale des mesures

Douze mesures du renouvellement d'air de la cellule ont été réalisées entre le mois d'Octobre 2010 et de Janvier 2011 et sont présentées ici d'une manière globale afin de donner une analyse préliminaire. Le renouvellement d'air a varié fortement d'une expérience à l'autre : le temps de décroissance varie de 5h (expérience N°10) à plus de 30h (expérience N°2), ce qui correspond à des débits moyens compris entre 18 et $3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ respectivement. Par conséquent, il n'est pas possible de considérer que le renouvellement d'air soit constant. Ces valeurs sont assez faibles par rapport aux débits rencontrés classiquement dans les habitations : l'arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements impose en effet un débit minimal de $35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour un logement d'une pièce comportant une cuisine. Les débits mis en jeu ici sont bien plus faibles et le débit moyen sur l'ensemble des expériences ($5,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) ne représente que 16 % de la valeur de l'arrêté. Toutefois, les variations autour du débit moyen sont de l'ordre de ± 50 %, ce qui n'est pas négligeable.

Pour comparer les différentes mesures d'un point de vue global, il est intéressant de considérer les conditions moyennes de vent et de température des expériences. En ce sens, plusieurs points sont analysés et comparés dans le Tableau 24 :

- Le temps de décroissance mesuré (t_{Decr}) ;
- Le débit moyen q_v , obtenu d'après l'équation Eq. 56 ;
- La vitesse moyenne du vent v_{10} , estimée à partir des mesures météo, représentative de la pression dynamique provoquée par le vent (voir Eq. 53) ;
- L'écart de température moyen entre les ambiances extérieures et intérieures ($T_{\text{Int}} - T_{\text{Ext}}$), représentatif de l'effet de tirage thermique (voir Eq. 51).

Tableau 24 : Mesures par gaz traceur et conditions extérieures moyennes

| N° | Date | t_{Decr} (h) | q_v ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | v_{10} ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | $(T_{\text{Int}} - T_{\text{Ext}})$ (K) |
|------------------|------------|-----------------------|--|---|---|
| 1 | 04/10/2010 | 27h19 | 3,3 | 1,8 ⁽¹⁾ | 6,2 |
| 2 | 06/10/2010 | 30h22 | 3,0 | 1,0 | 7,5 |
| 3 | 08/10/2010 | 26h39 | 3,4 | 1,3 | 10,5 |
| 4 | 11/10/2010 | 26h25 | 3,4 | 1,2 | 10,8 |
| 5 | 12/10/2010 | 17h52 | 5,0 | 1,3 | 18,3 |
| 6 | 15/10/2010 | 17h13 | 5,2 | 1,5 | 21,2 |
| 7 | 03/01/2011 | 14h59 | 6,0 | 2,2 | 28,2 |
| 8 | 04/01/2011 | 15h54 | 5,6 | 1,7 | 26,4 |
| 9 ⁽²⁾ | 06/01/2011 | 13h52 | 4,6 | 2,9 | 19,8 |
| 10 | 07/01/2011 | 4h58 | 18,0 | 5,1 | 10,5 |
| 11 | 10/01/2011 | 19h14 | 4,7 | 1,6 | 21,5 |
| 12 | 25/01/2011 | 13h39 | 6,6 | 1,8 | 27,4 |

⁽¹⁾ Vitesse mesurée comprise entre 6 et 13 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ sur les 3 premières heures de l'expérience

⁽²⁾ Cette expérience a dû être arrêtée à 3000 ppm

L'influence des conditions extérieures est mise en évidence : en ce qui concerne les effets du tirage thermique par exemple, ils sont visibles en comparant les expériences pour lesquelles la vitesse moyenne du vent était faible ($v_{10} < 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, soit les expériences N°2, 3, 4, 5, 6, 8, 11 et 12). Les écarts moyens de température étant variés (de 6°C pour l'expérience N°1 à 28°C pour l'expérience N°7), la comparaison avec les débits mesurés permet de faire apparaître une tendance très nette (voir Figure 50, graphique de gauche) : le renouvellement d'air a augmenté de 3 à 6 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour un écart de température augmentant de 7 à 28°C respectivement.

Comme l'évolution de la concentration intérieure est régie par une équation différentielle de degré 1, les résultats sont présentés avec une échelle semi-logarithmique. Ainsi, une représentation linéaire de la décroissance est la conséquence d'un débit constant. Le graphique de droite de la Figure 50 montre qu'au sein d'une même expérience, le débit d'air peut varier assez fortement (expérience N°2). En effet, les expériences se déroulant sur plus de 24h, la température extérieure, et donc la grandeur $(T_{\text{Int}} - T_{\text{Ext}})$, peut varier significativement (de 2 à 12°C lors de l'expérience N°2).

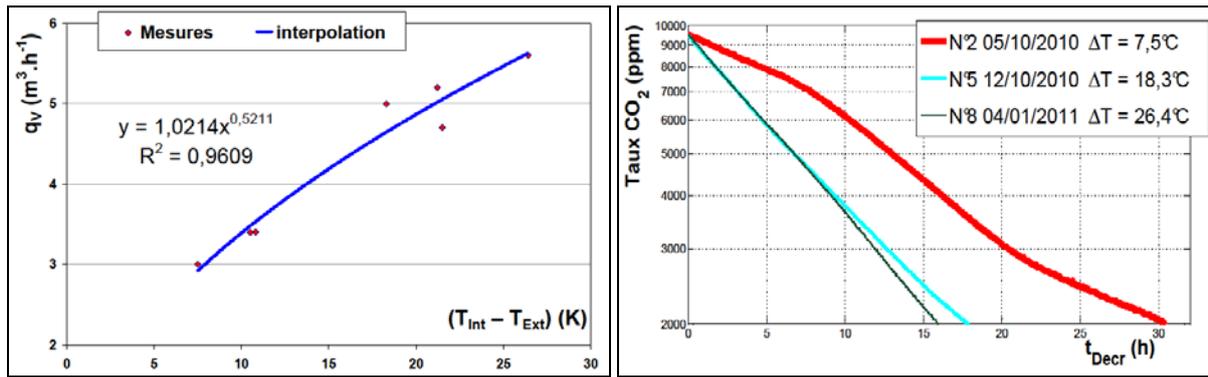


Figure 50 : Comparaison du débit moyen mesuré avec l'écart de température (gauche) et évolution de la concentration intérieure (droite) pour des expériences avec de faibles vitesses de vent.

L'analyse peut également être étendue aux expériences pour lesquelles le vent était plus important. Le cas de l'expérience N°10 (débit le plus important) correspond à celui pour lequel la vitesse de vent était la plus importante ($v_{10} = 5,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Cela permet de vérifier les effets de la pression dynamique sur le renouvellement d'air (Eq. 53). Le cas particulier de l'expérience N°1 est intéressant car elle a eu lieu avec une vitesse de vent comprise entre 6 et 13 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en début d'expérience (voir Tableau 24). Puis au bout de 3 heures, la vitesse du vent a brusquement diminué à 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui s'est traduit par une rupture dans la pente de la décroissance comme le présentent les graphiques de la Figure 51.

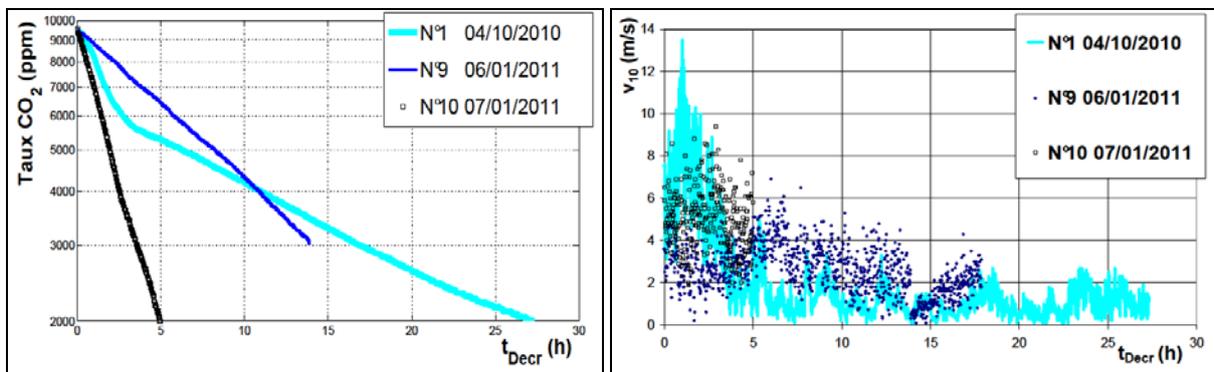


Figure 51 : Evolution de la concentration intérieure (gauche) et vitesse du vent mesurée à la station météorologique (droite) pour trois expériences

En conditions naturelles, il apparaît donc que le renouvellement d'air peut varier très rapidement. Considérer les conditions moyennes de l'expérience permet d'en déduire des résultats généraux, mais il est nécessaire d'utiliser les valeurs instantanées pour estimer le renouvellement d'air avec une meilleure précision. Une analyse plus détaillée de quelques séquences expérimentales est développée dans la partie suivante, en parallèle avec la discussion des résultats de la modélisation des transferts d'air.

D Modélisation des transferts d'air

Le renouvellement d'air des douze séquences expérimentales a été simulé en intégrant les équations du Chapitre IIIB dans HAM-Tools. La température et l'humidité de l'air intérieur sont imposées pour cette partie de l'étude afin de pouvoir se concentrer sur la validation de la partie aéraulique d'HAM-Tools.

D.1 Identification des paramètres du modèle

La modélisation des transferts d'air comporte plusieurs paramètres qui restent à identifier (voir Chapitre IIIB.4). Cela concerne les effets du tirage thermique (hauteurs équivalentes $z_{Th,Mur}$ et $z_{Th,porte}$) et ceux du vent (coefficients de terrain $\{a_T ; k_T\}$). Pour cela, la simulation du renouvellement d'air de la cellule observé lors des expériences a été répétée en faisant varier ces paramètres, de manière à tester une large gamme de combinaisons possibles (par exemple, faibles hauteurs de tirage thermique et forte réduction de la vitesse du vent, puis faible réduction de la vitesse du vent, etc.). Au total, 64 combinaisons ont été testées et sont présentées dans l'Annexe 9 plus en détails.

Devant le grand nombre de résultats à analyser, il est apparu nécessaire de définir des indicateurs facilitant l'identification des paramètres. Pour cela, les écarts entre les résultats de la simulation et les mesures ont été estimés de deux façons différentes :

- Sur l'ensemble d'une séquence expérimentale à l'aide de l'écart relatif sur le temps de décroissance t_{Decr} ;
- Sur le renouvellement d'air instantané avec l'écart sur le débit horaire $q_{V,H}$. Pour cela, la mesure instantanée du débit de renouvellement d'air de la cellule est intégrée sur une heure et comparée avec les résultats de la simulation.

D'une certaine façon, l'écart sur t_{Decr} représente la précision du modèle aéraulique appliqué à une expérience avec génération de vapeur lors de la phase de décroissance (voir Chapitre IIIA.2) : un écart sur le renouvellement d'air à un instant donné se répercute sur l'allure générale de la décroissance même si le débit est correctement estimé par la suite. Cet effet n'apparaît pas sur le calcul du débit horaire, qui n'est pas influencé par les valeurs précédentes. L'écart sur $q_{V,H}$ permet donc de donner un autre point de vue sur les performances du modèle.

D.2 Performances du modèle

L'analyse des résultats (voir Annexe 9) a montré que le modèle est très sensible à la hauteur $z_{Th,porte}$, moyennement sensible à la hauteur $z_{Th,Mur}$ et réagit différemment selon les coefficients de terrain utilisés. Ce constat pourrait s'expliquer par le fait que l'interaction entre les effets du tirage thermique et du vent peut être relativement complexe, même pour une géométrie simple comme ici

comme le montrent (Li *et al.* 2001). En considérant l'écart sur le temps de décroissance et sur le débit horaire, il est apparu que les meilleurs résultats étaient obtenus pour des coefficients de terrain de type « obstacles », $z_{Th,porte} = 2$ m et $z_{Th,Mur} = 0,75$ m. Le détail des résultats est présenté dans le Tableau 25 (une valeur négative de l'écart sur le temps de décroissance signifie que le modèle surestime le renouvellement d'air).

Tableau 25 : Ecart relatif sur le temps de décroissance et sur le débit horaire pour chacune des 12 expériences.

| N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| Débit moyen q_v ($m^3 \cdot h^{-1}$) | 3,3 | 3,0 | 3,4 | 3,4 | 5,0 | 5,2 | 6,0 | 5,6 | 4,6 | 18,0 | 4,7 | 6,6 |
| Ecart relatif t_{Decr} | -86 % | -14 % | -7 % | -18 % | -7 % | 1 % | 2 % | 8 % | -31 % | 3 % | 5 % | 1 % |
| Ecart relatif $q_{v,H}$ | 47 % | 24 % | 11 % | 24 % | 14 % | 12 % | 25 % | 19 % | 47 % | 15 % | 20 % | 18 % |

La moyenne de l'écart sur le temps de décroissance est de 15 %, 23 % sur le débit horaire. Cependant, les performances du modèle ne sont pas homogènes ; elles varient fortement selon l'expérience considérée. Par exemple, l'écart sur le débit dépasse 45 % pour les expériences N°1 et 9. Par contre, il est inférieur à 15 % pour les expériences N°3 et 6.

Pour analyser ces résultats plus en détail, il peut être utile de comparer les deux types d'écarts. Pour les expériences N°6, 7 et 12 par exemple, l'écart sur la décroissance est presque nul alors que le débit horaire est estimé avec une précision moyenne de 12 à 25 %. Cela signifie que les débits sont successivement surestimés puis sous estimés sur ces séquences, mais que les écarts se compensent. Ainsi, le modèle est capable de reproduire le comportement aérodynamique moyen de la cellule.

L'expérience N°1 présente un autre cas de figure comme l'illustre la Figure 52. Le débit est fortement surestimé au début de l'expérience : plus de $10 m^3 \cdot h^{-1}$, c'est-à-dire le double de la valeur mesurée. Cela se traduit par un décalage permanent sur la décroissance (graphique de gauche), bien que le débit soit correctement estimé par la suite (graphique de droite). Il avait déjà été relevé que cette expérience avait eu lieu alors que la vitesse du vent était particulièrement importante, ce qui laisse donc supposer que les effets du vent puissent être mal pris en compte. En effet, dès que la vitesse du vent a diminué, soit un peu plus de trois heures après le début de l'expérience, le modèle permet à nouveau d'estimer le renouvellement d'air correctement.

Dans certaines conditions particulières, le modèle peut donc donner une estimation erronée du renouvellement d'air. Toutefois, il semblerait que ces erreurs soient ponctuelles dans le temps et que le comportement moyen soit correctement estimé, comme le montre l'exemple de l'expérience N°2 dans la Figure 52.

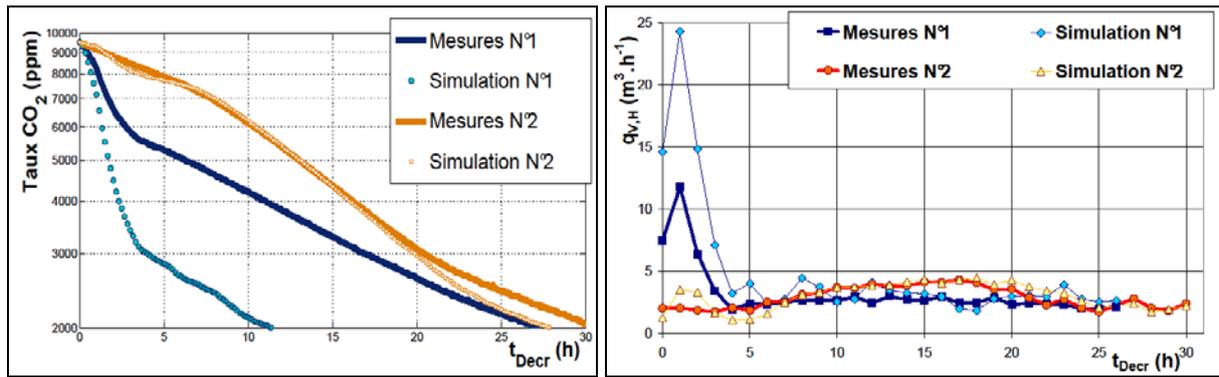


Figure 52 : Comparaison des décroissances mesurées et simulées (gauche) et des débits horaires (droite) pour les expériences N°1 et 2

D.3 Discussion sur la prise en compte des effets du vent

Pour agir sur les effets du vent, il est possible de remplacer les coefficients de terrain $\{a_T ; k_T\}$ de type « obstacles » par ceux de type « urbain » (voir Tableau 21), ce qui revient d'une certaine manière à considérer une vitesse du vent moins importante au niveau des parois. Cela permet d'obtenir des meilleurs résultats au niveau de l'expérience N°1. Par contre, les résultats sont nettement moins bons pour l'expérience N°10 comme le montrent les valeurs présentées dans le Tableau 26. Ces deux expériences se sont pourtant déroulées avec un vent important (voir Tableau 24). Il ne semble donc pas possible de pouvoir améliorer la précision du modèle en agissant uniquement sur les coefficients de terrain et sur les hauteurs de tirage thermique.

Tableau 26 : Influence des coefficients de terrain pour les expériences pour lesquelles la vitesse moyenne du vent était supérieure à $> 5 \text{ m.s}^{-1}$

| N° | Débit moyen ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) | $\{a_T ; k_T\}$ | Ecart t_{Decr} | Ecart $q_{V,H}$ |
|----|--|-----------------|-------------------------|-----------------|
| 1 | 3,3 | Obstacles | - 86 % | 47 % |
| | | Centre Ville | - 56 % | 26 % |
| 10 | 18,0 | Obstacles | 3 % | 15 % |
| | | Centre Ville | 45 % | 40 % |

Une autre piste d'amélioration concerne les coefficients de pression C_p , qui dépendent de la direction du vent et ont un impact sur la pression dynamique du vent (voir Eq. 53). Les valeurs utilisées ici proviennent de la littérature (voir Tableau 20) et sont appliquées de la même façon quel que soit l'orifice considéré. En particulier, le cas de la bouche d'aération n'est pas distingué de celui des parois verticales. Or (Uematsu et Isyumov 99) ont recensé un grand nombre de mesures et ont montré que les valeurs de C_p pouvaient varier très fortement au niveau de la toiture. (Van Moeseke *et al.* 05) ont montré que ces coefficients variaient selon la position horizontale (c'est-à-dire pour une même hauteur) ce qui influence significativement le renouvellement d'air. De même, (Costola *et al.* 10, Costola *et al.* 09) ont étudié l'influence de l'utilisation des valeurs locales du coefficient C_p en remplacement de valeurs moyennes : les écarts sur l'estimation du renouvellement d'air peuvent atteindre un facteur 5 dans leur configuration (ici, l'écart atteint un facteur 2 sur l'expérience N°1).

La bouche d'aération est l'orifice principal de la cellule, et donc particulièrement sensible aux valeurs des coefficients C_p . De plus, elle est localisée à proximité de la toiture comme le montre les photos de la Figure 53. Il est donc probable que les effets du vent à cet endroit là ne soient pas correctement représentés par les valeurs actuelles des coefficients C_p , établies pour représenter les effets moyens du vent sur la paroi toute entière.



Figure 53 : Photo de la face Ouest de la cellule (gauche) et zoom sur la position de la bouche d'aération (droite)

Compte tenu de la complexité des phénomènes (Costola *et al.* 10) préconisent d'avoir recours à des études détaillées pour déterminer les valeurs des coefficients C_p lorsque l'étude porte sur un cas réel. De nombreux auteurs ont recours aux mesures en souffleries, ce qui constitue à ce jour le moyen le plus fiable d'obtenir des mesures précises. Une autre piste concerne les simulations CFD qui permettent d'obtenir des résultats complets pour des bâtiments et des environnements complexes (Van Hooff et Blocken 10). Les récentes avancées dans le domaine du calcul numérique (Obrecht *et al.* 11) permettent d'envisager cette méthode en complément ou en remplacement des mesures en soufflerie.

Ces caractérisations nécessitent cependant un temps de mise en œuvre et des moyens trop importants dans un cas comme celui-ci, où la problématique ne porte pas sur le renouvellement d'air uniquement. Il existe plusieurs corrélations paramétriques qui permettent d'estimer les valeurs de C_p , en tenant compte de l'environnement proche (Sharag-Eldin 07) ou de calculer le renouvellement d'air à travers une ouverture donnée (Larsen et Heiselberg 08). Toutefois, il est difficile d'établir des relations générales à tous les bâtiments comme le soulignent (Uematsu et Isyumov 99), ce qui rend l'utilisation de ces corrélations incertaine. Voilà pourquoi l'utilisation de valeurs générales issues de la littérature reste une pratique répandue et permet d'obtenir des ordres de grandeur généralement satisfaisants (Costola *et al.* 10).

Dans le cadre de ce travail, seules les valeurs des coefficients C_p issues de la littérature ont donc été utilisées. Pour illustrer leur influence, les simulations ont été relancées en utilisant d'autres valeurs présentées dans (Hagentoft 01). Une comparaison avec les valeurs utilisées jusqu'à présent (issues de Sharag-Eldin 07, voir Tableau 20) est présentée dans le graphique de la Figure 54 et montre que les changements des valeurs de C_p se situent essentiellement au niveau des incidences comprises entre 75° et 165° , c'est-à-dire pour une paroi sous le vent. Enfin, les résultats des

simulations sont comparés dans le Tableau 27 pour les mêmes hauteurs de tirage thermique et les mêmes coefficients de terrain.

L'impact sur les performances du modèle est très mitigé : que ce soit sur le temps de décroissance ou sur le débit horaire, modifier les valeurs de Cp peut améliorer la précision du modèle (expériences N°1 et 2 par exemple) ou non (expériences N°9 et 10). Au final, la précision moyenne sur les douze séquences est de 18 % sur la décroissance et 28 % sur les débits horaires en utilisant les valeurs issues de (Hagentoft 01). Ces résultats sont légèrement moins bons que ceux obtenus avec les valeurs de référence (15 % et 23 %).

Tableau 27 : Ecart relatif sur le temps de décroissance et sur le débit horaire en utilisant les valeurs de Cp proposées dans (Sharag-Eldin 07) et (Hagentoft 01)

| N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|
| Débit moyen (m ³ .h ⁻¹) | 3,3 | 3,0 | 3,4 | 3,4 | 5,0 | 5,2 | 6,0 | 5,6 | 4,6 | 18,0 | 4,7 | 6,6 |
| Ecart t _{Decr} (Sharag E. 07) | -86 % | -14 % | -7 % | -18 % | -7 % | 1 % | 2 % | 8 % | -31 % | 3 % | 5 % | 1 % |
| Ecart t _{Decr} (Hagentoft 01) | -58 % | -8 % | -20 % | -23 % | -14 % | 0 % | -9 % | -1 % | -48 % | 26 % | -3 % | 2 % |
| Ecart q _{V,H} (Sharag E. 07) | 47 % | 24 % | 11 % | 24 % | 14 % | 12 % | 25 % | 19 % | 47 % | 15 % | 20 % | 18 % |
| Ecart q _{V,H} (Hagentoft 01) | 41 % | 19 % | 32 % | 26 % | 19 % | 6 % | 26 % | 16 % | 99 % | 25 % | 15 % | 16 % |

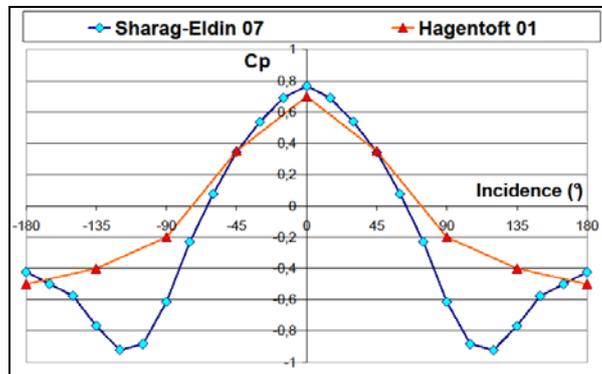


Figure 54 : Comparaison des valeurs des coefficients Cp proposées dans (Sharag-Eldin 07) (voir Tableau 20) et (Hagentoft 01)

Cet exemple permet d'illustrer la sensibilité du modèle aux coefficients Cp, mais aucune tendance nette n'apparaît. Il a donc été décidé de conserver les valeurs les valeurs issues de (Sharag-Eldin 07) dans HAM-Tools.

E Synthèse

Le rôle des infiltrations d'air a été identifié à partir des séquences expérimentales avec génération de vapeur d'eau (Labat *et al.* 10b). Il est apparu que le renouvellement d'air de la cellule en conditions naturelles ne pouvait être considéré comme constant mais devait être déterminé en fonction des conditions extérieures.

Une première étape a consisté à déterminer la perméabilité à l'air de la cellule à l'aide d'un Perméoscope[®] et pour différentes compositions des parois verticales. En particulier, il est apparu que le pare-vapeur joue également le rôle de pare-air et diminue la perméabilité à l'air de la cellule de moitié (Labat *et al.* 2010a). La bouche d'aération a également été identifiée comme étant le principal orifice de l'enveloppe et constitue en ce sens un point privilégié pour les transferts d'air.

Afin de permettre une prise en compte réaliste des effets du vent et du tirage thermique, une seconde méthode de mesure a été mise en place pour permettre de mesurer le renouvellement d'air de la cellule en conditions naturelles. Le dioxyde de carbone a été utilisé comme Gaz Traceur pour des conditions de température et de vent variées, entre septembre 2010 et janvier 2011. Ainsi, douze expériences ont été réalisées et ont permis de mesurer des débits compris entre 3 et 18 m³.h⁻¹ (Labat *et al.* 11a).

Ces mesures ont permis d'identifier les paramètres nécessaires à la modélisation des transferts d'air dans HAM-Tools. Cette démarche a permis de retrouver les débits mesurés avec une précision moyenne de 23 % sur les débits et permet de rendre compte de l'importante disparité des débits mesurés.

L'analyse détaillée des écarts (Labat *et al.* 12b) a montré que la précision du modèle n'est pas homogène et peut être nettement moins bonne pour des journées avec un vent important ($> 5 \text{ m.s}^{-1}$) : le débit est surestimé d'un facteur 2 pour un cas particulier. L'influence des coefficients de pression C_p , permettant de représenter les effets de l'incidence du vent sur les parois, a été mise en évidence. Ce constat est partagé par plusieurs références de la littérature scientifique, mais la complexité des effets du vent et la grande sensibilité à la géométrie du bâtiment et à l'environnement n'ont pas permis d'améliorer ce point particulier. Enfin, bien que le renouvellement d'air dépende du bâtiment et de son environnement, la démarche présentée ici est suffisamment générale pour être appliquée à d'autres études. Un développement du travail de modélisation serait à fournir pour des bâtiments multizones toutefois, et pourrait s'appuyer sur les travaux de (Koffi 09).

Chapitre IV

Simulation des transferts couplés à l'échelle du bâtiment

Le développement et la validation de l'outil de modélisation ont été effectués en suivant trois axes différents. Pour chacun d'entre eux, le travail de modélisation s'est appuyé sur des conditions limites définies par la mesure afin de faciliter la démarche :

- La validation de la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse dans les parois a été réalisée en utilisant les mesures de température du pare-pluie et de l'air intérieur, ainsi que la mesure d'humidité de l'air intérieur comme conditions limites.
- La modélisation des transferts dans la lame d'air ventilée a été réalisée en imposant les mesures de température et d'humidité de l'air intérieur comme conditions limites.
- Le calcul du renouvellement d'air s'est également appuyé sur les mesures de température et d'humidité de l'air intérieur (les transferts dans les parois n'ont pas été modélisés).

Il apparaît que pour toutes les simulations présentées jusqu'ici, les transferts avec l'air intérieur ont été pris en compte mais ses propriétés (température et humidité) ont été imposées en conditions limites. Pour étendre le domaine de validité de l'outil de modélisation, il est donc nécessaire de réaliser une simulation qui prenne en compte tous les transferts avec l'air intérieur et qui puisse être validée par l'expérience.

Cette dernière étape permet également d'assembler les différentes parties du modèle (parois, lame d'air ventilée, renouvellement d'air) et de réaliser une simulation à l'échelle du bâtiment. Cette démarche n'avait pas été entreprise dans les travaux de (Piot 09) et constitue donc une avancée en termes de modélisation. Ici, les quatre parois verticales de la cellule ont été simulées séparément ; la décomposition en tranches d'une paroi (Chapitre II) a été appliquée à chacune d'entre elles afin de prendre en compte les transferts dans chaque lame d'air ventilée. Le comportement des parois horizontales a été simulé de manière simplifiée en ne prenant en compte que les transferts de vapeur d'eau entre le parement intérieur et l'air intérieur. La température de l'air intérieur est contrôlée en

simulant une source de chaleur et le débit du générateur de vapeur d'eau a été simulé à partir de la mesure de l'évolution de sa masse. Enfin, le renouvellement d'air de la cellule est calculé en conditions naturelles, comme présenté dans le Chapitre III. L'ensemble des coefficients de transferts utilisés jusqu'ici ont été appliqués à cette simulation.

La séquence expérimentale sélectionnée pour valider le modèle est présentée dans la première partie de ce chapitre. Puis une confrontation entre les résultats de la simulation et les mesures sera proposée. Elle portera sur les mesures locales de température et d'humidité ainsi que sur les bilans globaux appliqués à l'échelle du bâtiment.

A Présentation de la séquence expérimentale

Cette expérience s'est déroulée du 1 au 14 février 2012 pour des conditions extérieures hivernales marquées : la température de l'air extérieur est restée négative pendant la totalité de l'expérience comme le montre le graphique de gauche de la Figure 55. Toutefois, certaines journées ont été ensoleillées, et les puissances solaires reçues par les faces Est et Sud ont dépassé $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ à plusieurs reprises comme le montre le graphique de droite de la Figure 55.

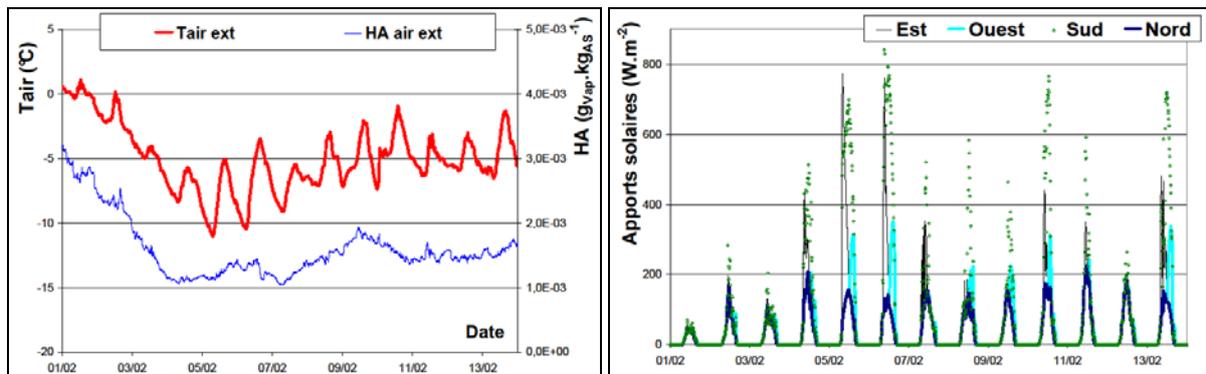


Figure 55 : Température et humidité relative de l'air extérieur (gauche) et apports solaires calculés pour chacune des différentes faces verticales (droite)

Les mesures de vent sont présentées sous la forme d'une rose des vents dans le graphique de la Figure 56. Il est intéressant de remarquer que la vitesse moyenne du vent ($3,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) est nettement plus importante que celles observées lors des mesures de renouvellement d'air par gaz traceur (plus généralement autour de $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, de Septembre 2010 à Janvier 2011). Cet écart pourrait être dû à une perturbation du capteur, mais aucune correction n'a pu être apportée.

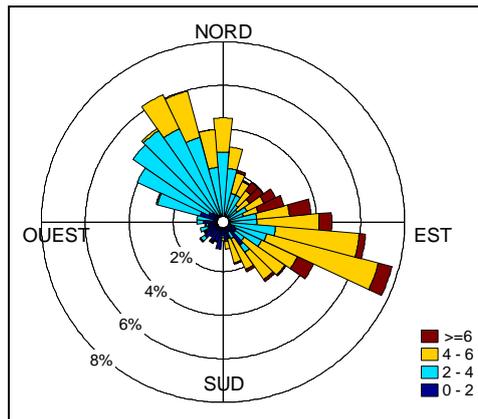


Figure 56 : Rose des vents obtenue à partir des mesures faites lors de la séquence expérimentale

Durant cette séquence expérimentale, l'air intérieur a été maintenu à une température de 20°C (graphique de gauche de la Figure 57). De la vapeur d'eau a été générée avec un débit constant de 200 g.h⁻¹ pendant un peu plus de 28h (soit une quantité de 5,73 kg d'eau générée) : cela peut être vérifié à partir des mesures de pesée du générateur (graphique de droite de la Figure 57). Il est apparu que la génération de vapeur ne s'est pas tout à fait arrêtée au bout de 28h mais s'est poursuivie pendant environ 80h avec un débit de 3,73 g.h⁻¹ (295 g de vapeur générée durant cette période, soit un total de près de 6 kg).

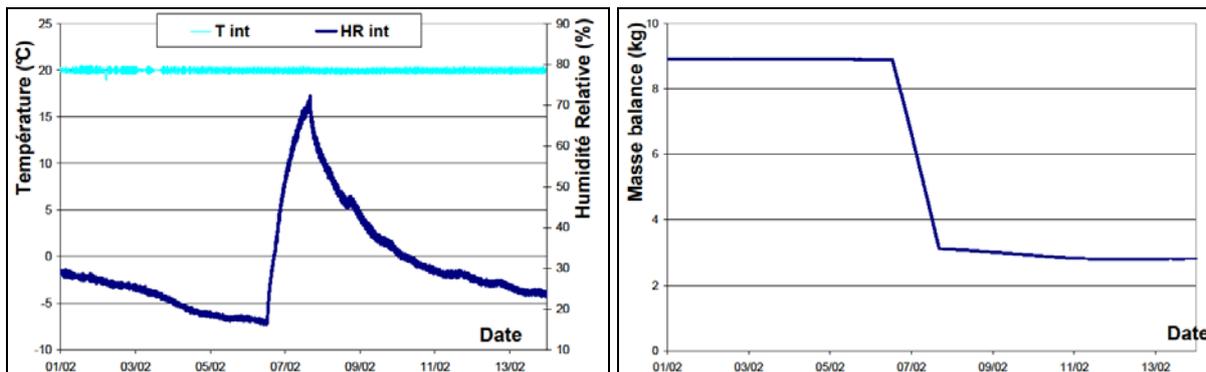


Figure 57 : Evolution de la température et de l'humidité relative de l'air intérieur (gauche) et de la masse d'eau contenue dans le générateur de vapeur (droite)

La configuration des parois verticales lors de cette séquence correspond à la configuration de paroi n°6, c'est-à-dire (de l'intérieur vers l'extérieur) :

- Parements intérieurs non jointés en plaques de plâtre (0,012 m) ;
- Pare-vapeur de résistance à la vapeur équivalente à celle d'une couche d'air de 18 m ;
- Ouate de cellulose (0,16 m) ;
- Panneaux de particules (0,01 m) jointés avec du mastic ;
- Film pare-pluie « Ubbink multivap », étanche à l'air et à l'eau liquide, perméable à la vapeur ;
- Lambe d'air (0,027 m) ;
- Bardage à clairevoie en mélèze (0,02 m).

Les mesures de température et d'humidité absolue réalisées dans les quatre parois verticales de la cellule sont présentées dans les graphiques de la Figure 58, de la Figure 59 et de la Figure 60 (les échelles sont identiques sur chacune des trois figures).

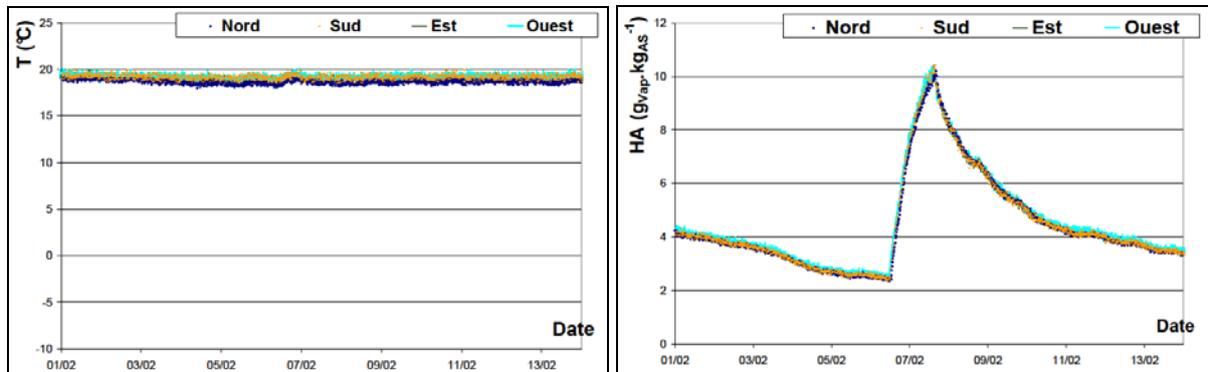


Figure 58 : Mesure de température (gauche) et d'humidité absolue (droite) à l'interface parement intérieur / air intérieur pour chaque paroi verticale

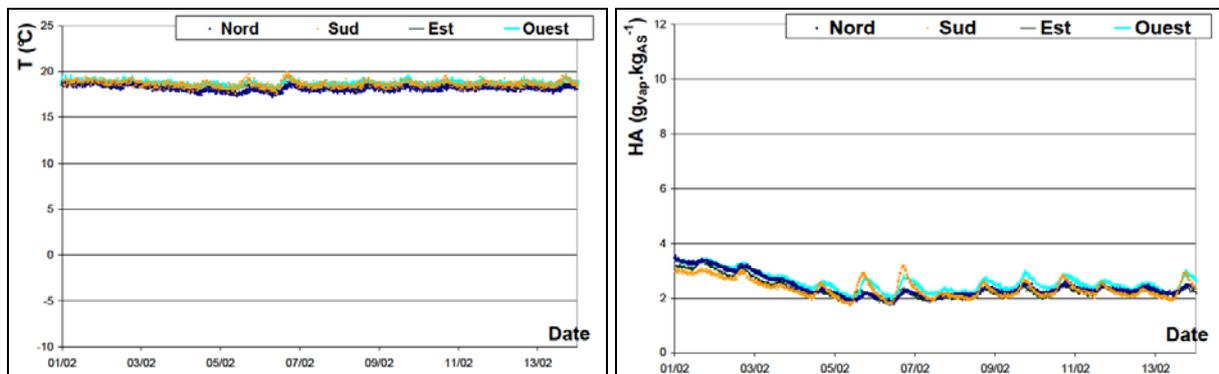


Figure 59 : Mesure de température (gauche) et d'humidité absolue (droite) à l'interface pare-vapeur / isolant pour chaque paroi verticale

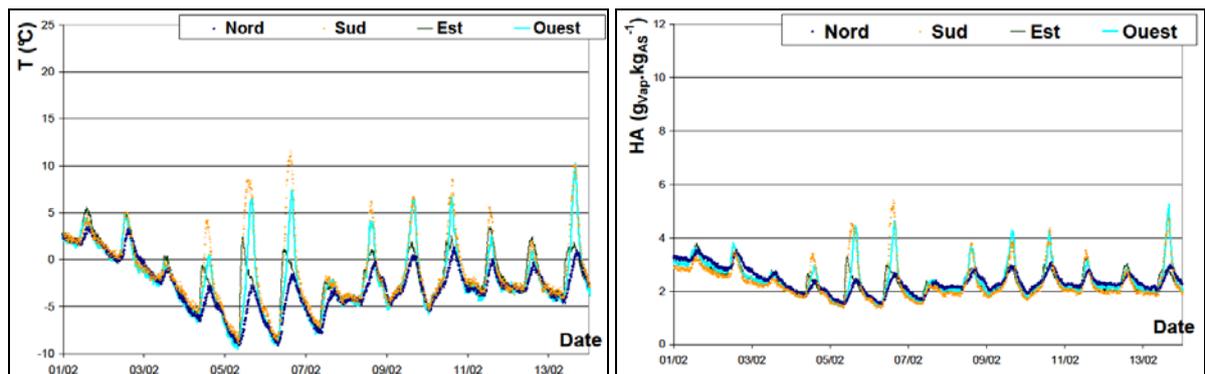


Figure 60 : Mesure de température (gauche) et d'humidité absolue (droite) à l'interface isolant / parement extérieur pour chaque paroi verticale

Sur le parement intérieur (Figure 58) et derrière le pare-vapeur (Figure 59), il apparaît que la température des parois est homogène quelle que soit la paroi observée. Des différences plus marquées apparaissent au niveau de l'interface entre le parement extérieur et l'isolant (Figure 60). Les écarts en température proviennent des différences au niveau des apports solaires : par exemple, la température en paroi Nord est systématiquement la plus faible en journée, ce qui correspond à la

paroi recevant les apports solaires les plus faibles. Sur la face Sud au contraire, des variations de température de 16 et 17°C sont enregistrées le 05/02 et le 06/02 respectivement alors que les apports solaires sur cette paroi dépassent 600 W.m⁻².

En ce qui concerne l'humidité absolue, l'allure globale est la même pour l'ensemble des parois, bien que des variations rapides puissent apparaître lorsque la température du parement extérieur varie. Enfin, il existe une légère différence au niveau des taux d'humidité initiaux des parements extérieurs : la paroi Nord a l'humidité absolue la plus élevée (3,2 g_{Vap.}.kg_{AS}⁻¹) tandis que la paroi Sud a le niveau le plus faible (2,8 g_{Vap.}.kg_{AS}⁻¹) bien que les températures soient identiques (2,5°C). Cet écart se maintient tout au long de la séquence expérimentale.

Les mesures des flux thermiques réalisées sur chacune des six parois de la cellule sont présentées dans le graphique de la Figure 61. Sur le graphique de droite, les flux sont intégrés sur une journée entière pour chaque paroi et les ratios par rapport au flux total sont calculés. Les flux pour les parois horizontales sont regroupés sous l'étiquette « Horizontaux ».

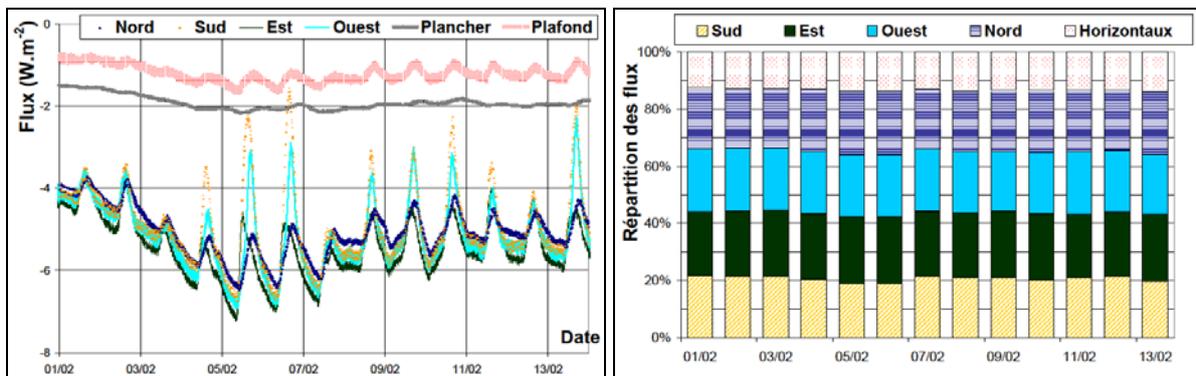


Figure 61 : Mesure du flux de chaleur traversant les différentes parois de la cellule (gauche) et répartition du flux journalier moyen (droite)

Tout d'abord, il apparaît que le flux thermique n'est pas nul au niveau des parois horizontales mais représente environ 13 % du flux déperditif total. En considérant les valeurs instantanées sur les parois verticales, il apparaît de fortes variations en journée qui diffèrent selon l'orientation. Ces variations coïncident avec les apports solaires et peuvent être significatives : le flux sur la face Sud a diminué de plus de 75 % sur la face Sud le 06/02 à 14h00. Cependant, il apparaît que les ratios sont similaires d'une journée à l'autre ($\pm 2\%$), y compris pour des journées ensoleillées : cela provient de l'intégration des résultats sur 24h alors que la période de jour n'est que de 10h à cette période de l'année.

Par ailleurs, il apparaît de légères différences entre les flux des parois verticales, même lorsque les conditions extérieures sont stables (journée du 08/02 par exemple) : cela aurait dû se traduire par des flux égaux sur les différentes faces. Le flux mesuré sur la paroi Nord est alors moins important que sur les autres faces. A l'inverse, le flux sur la paroi Est est légèrement plus important. Il est probable que ces écarts proviennent de la mauvaise homogénéité de l'isolant (ici de la ouate de cellulose). Une autre hypothèse serait que les instruments de mesure aient dérivé depuis leur mise en

service ou que le contact entre le capteur et la paroi soit de moins bonne qualité sur certaines faces. Il est cependant difficile de conclure sur ce point uniquement à partir des mesures réalisées ici.

B Confrontation des résultats de la simulation avec les mesures

Cette partie propose de comparer les résultats de la simulation avec les mesures présentées précédemment. Cette confrontation s'effectue à deux échelles différentes : locale dans un premier temps, en analysant l'évolution des températures simulées à différentes profondeurs des parois verticales ; globale dans un second temps, à partir du calcul des flux de chaleur journaliers. En dernier lieu, un bilan de chaleur à l'échelle de la cellule toute entière sera proposé. La même démarche sera ensuite adoptée pour la confrontation du modèle avec les mesures d'humidité et permettra de proposer un bilan de vapeur d'eau plus détaillé que celui présenté dans le Chapitre III.

B.1 Température dans les parois verticales de l'enveloppe

La comparaison des températures mesurées à différentes profondeurs de la paroi est présentée dans les graphiques de la Figure 62 et de la Figure 63 pour chaque orientation. La nomenclature reprend celle utilisée jusqu'ici (voir Figure 9) :

- Le point 1 correspond à l'interface entre le parement intérieur et l'air intérieur ;
- Le point 2 correspond à l'interface entre le pare-vapeur et l'isolant ;
- Le point 4 correspond à l'interface entre l'isolant et le parement extérieur.

Quelle que soit l'orientation considérée, l'évolution de la température aux points 1 et 2 est correctement représentée : l'écart moyen est de 0,3°C et 0,2°C respectivement, ce qui est inférieur à la précision des capteurs ($\pm 0,8^\circ\text{C}$). Un écart un peu plus important apparaît au niveau du point 1 pour la face Nord (+0,4°C par rapport aux mesures) et au niveau du point 2 pour la face Ouest (-0,5°C par rapport aux mesures). Les températures simulées étant très proches les unes des autres en l'absence de rayonnement solaire ($< 0,05^\circ\text{C}$), ces écarts proviennent plus des disparités au niveau des mesures, ce qui peut être dû à l'incertitude de mesure comme aux propriétés et à l'homogénéité de la ouate de cellulose mise en œuvre.

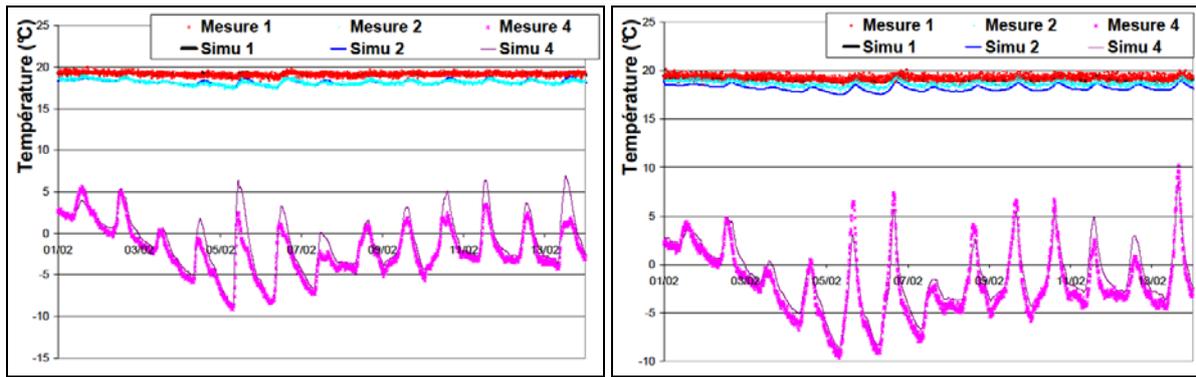


Figure 62 : Comparaison des mesures de températures avec les résultats de la simulation pour la paroi Est (gauche) et Ouest (droite)

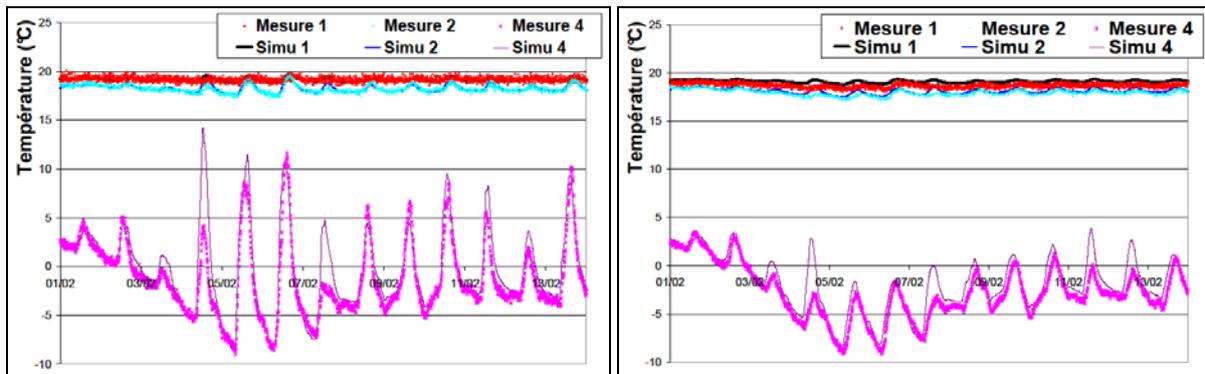


Figure 63 : Comparaison des mesures de températures avec les résultats de la simulation pour la paroi Sud (gauche) et Nord (droite)

Des écarts nettement plus importants peuvent apparaître au niveau du point 4, en particulier lors des pics de température provoqués par les apports solaires. Cependant, les résultats ne sont pas homogènes selon les journées et les parois considérées : par exemple les écarts sur les pics sont plus modérés sur les faces Est et Ouest le 04/02 (respectivement 1,9°C et -0,5°C) que sur la face Sud et Nord (respectivement 9,0°C et 5,6°C). Cet exemple est celui pour lequel les écarts sont les plus importants, mais des écarts de plus de 3°C ont été observés sur plusieurs autres journées (05/02, 08/02, 11/02, 13/02). Plusieurs hypothèses pourraient expliquer ces écarts :

- La modélisation des transferts de chaleur autour du bardage s'est appuyée sur des mesures faites sur la paroi Est. Le comportement des parois Nord et Sud peut être différent de par l'avancée de la toiture (plus de 0,6 m contre moins de 0,1 m pour les faces Est et Ouest), qui modifie la géométrie de sortie de la lame d'air. De plus, la hauteur de la lame d'air est moins importante (2,8 m contre 3,8 m pour les faces Est et Ouest) ;
- La faible température de l'air extérieur peut avoir provoqué la solidification de l'eau liquide contenue dans le bardage, ce qui n'est pas pris en compte dans le modèle. La chaleur latente de changement de phase pourrait avoir un impact conséquent sur la dynamique du comportement thermique du bardage, et donc sur celle des transferts dans la lame d'air. Plus généralement, seul le transfert de vapeur est pris en compte dans le bardage, alors que des phénomènes plus complexes peuvent intervenir, y compris l'absorption d'eau liquide (pluie battante, fonte de la neige, etc.) ;

- Les apports solaires sont calculés à partir de mesures de rayonnement global et diffus faites sur des plans horizontaux. Cette méthode de calcul est particulièrement sensible à la précision de la mesure du rayonnement diffus. Une mesure directe des apports solaires reçus par chacune des parois verticales permettrait de donner une estimation plus précise, ce qui pourrait limiter les écarts en température compte tenu des puissances mises en jeu.
- La modélisation de l'écoulement dans la lame d'air ne prend pas en compte les effets du vent. Or sur cette séquence expérimentale, il est apparu que la vitesse du vent était supérieure à celle observée lors des autres séquences, notamment celles qui ont servi de support à la modélisation des transferts. Il est donc possible que les écarts observés soient liés aux effets du vent.

Toutefois, l'écart moyen est de $1,1^{\circ}\text{C}$ au point 4 sur l'ensemble de la séquence expérimentale et les variations à l'échelle de la journée sont globalement bien représentées (les forts écarts constatés le 04/02 ne sont pas reproduits systématiquement). Le comportement moyen en température est donc correctement représenté.

Ces résultats sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus lors de la validation sur une unique paroi en hiver (Chapitre IIE.2). Il est donc probable que les écarts proviennent de la modélisation des transferts dans la lame d'air et ne résultent pas de la combinaison des transferts à l'échelle du bâtiment. Ainsi, pour améliorer les performances du modèle sur ce point, il semble plus pertinent de chercher à affiner la modélisation des transferts dans la lame d'air.

B.2 Transfert d'énergie à travers les parois verticales

Pour estimer la quantité d'énergie qui traverse les parois verticales, et donc le comportement énergétique global de la paroi, le flux de chaleur est calculé au niveau de la position des fluxmètres (interface entre le parement intérieur et le pare-vapeur) puis intégré sur une journée. Une représentation graphique est donnée dans la Figure 64. Enfin, l'énergie totale cédée par les parois au cours de cette séquence est calculée et comparée aux mesures dans le Tableau 28.

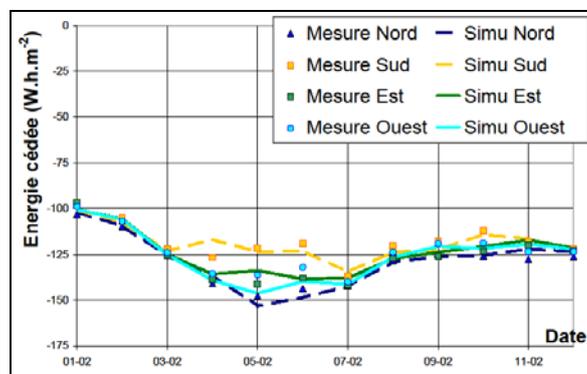


Figure 64 : Comparaison de l'énergie cédée par chaque paroi verticale pour chaque journée de la séquence expérimentale.

Tableau 28: Comparaison de l'énergie cédée par les parois verticales sur l'ensemble de la séquence expérimentale ($W.h.m^{-2}$) pour chaque orientation

| | Nord | Sud | Est | Ouest |
|--------------------------------|--------|-------|--------|-------|
| Mesure | -1548 | -1420 | -1507 | -1482 |
| Simulation | -1544 | -1429 | -1487 | -1509 |
| Ecart relatif | -0,3 % | 0,6 % | -1,3 % | 1,8 % |
| Ecart relatif journalier moyen | 1,7 % | 2,6 % | 1,9 % | 2,6 % |

Le modèle est capable de déterminer la quantité d'énergie qui traverse une paroi avec une précision de moins de 3 % sur l'ensemble de la séquence expérimentale, et ce quelque soit la paroi considérée. Ponctuellement l'écart peut être plus important (8 % le 05/02 sur la face Ouest). Ces résultats ont été obtenus suite à une étude de sensibilité présentée dans l'Annexe 10. Il est apparu que le calcul de l'énergie qui traverse la paroi est particulièrement sensible à la valeur de la conductivité thermique de la ouate de cellulose. Les résultats les plus proches des mesures (présentés dans ce chapitre) ont été obtenus en diminuant la conductivité thermique de la ouate de 5% (soit de 0,042 à 0,040 $W.m^{-1}.K^{-1}$). Compte tenu du fait que la ouate de cellulose est un matériau très peu homogène, cette variation semble raisonnable. Les autres paramètres n'ont pas été modifiés et correspondent à ceux utilisés dans le Chapitre II.

B.3 Bilan de chaleur à l'échelle de la cellule

Précédemment, les simulations ont été utilisées pour réaliser un bilan de vapeur à l'échelle de la cellule (voir Chapitre IIIA.2). Ici, cette démarche est transposée aux transferts thermiques afin d'effectuer un bilan en chaleur. L'objectif de ce calcul est de donner une première estimation de l'influence relative des différents composants de l'enveloppe.

Actuellement, seuls les transferts thermiques qui se développent dans la partie courante des parois verticales et ceux qui sont provoqués par le renouvellement d'air ont été étudiés et validés. Pour autant, d'autres transferts participent au bilan à l'échelle de la cellule : les parois horizontales, les montants de l'ossature dans les parois verticales, la porte, les jonctions des parois horizontales et verticales participent aux transferts de chaleur. Ces transferts ne sont pas complètement inconnus et il est envisageable de les intégrer rapidement à l'outil de modélisation. Par exemple, les parois horizontales, la porte et les montants de l'ossature pourraient être modélisés en suivant la même méthodologie que pour la partie courante des parois verticales. La modélisation des transferts au niveau des jonctions pourraient s'appuyer sur les calculs de référence des ponts thermiques présentés dans la réglementation thermique.

Toutefois, les mesures actuelles ne permettent pas de proposer une validation adéquate de la modélisation de ces parties de l'enveloppe. D'une part, simuler les transferts au niveau des parois horizontales nécessiterait de valider le choix des coefficients d'échange convectif et le calcul de la température des combles. D'autre part, les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les montants de l'ossature n'ont pas été étudiés ici. Or les transferts d'eau dans le bois, matériau très

fortement hygroscopique, sont susceptibles d’être plus complexes que ceux qui se développent dans la partie courante des parois. Pour ces raisons, il n’est pas possible de proposer une validation de ces parties de l’enveloppe, qu’il est important de bien distinguer des celles qui ont été validés.

Le bilan énergétique est donc décomposé en six termes : la chaleur évacuée par les infiltrations d’air ($\Phi_{Infiltr}$), la partie courante des parois verticales (Φ_{Par_V}), les montants de l’ossature et la porte (Φ_{Mont_V}), les parois horizontales (Φ_{Par_H}), les sources de chaleur à l’intérieur de la cellule (Φ_{So} , le radiateur et l’équipement électrique), et un dernier terme appelé « résidus » (Φ_{RES}) qui est défini de la façon suivante :

$$Eq. 57 \quad \phi_{RES} = -(\phi_{Infiltr} + \phi_{Par_V} + \phi_{Mont_V} + \phi_{Par_H} + \phi_{So})$$

Les transferts de chaleur à travers la partie courante de la paroi et par infiltrations sont validés et estimés avec une précision de 6 % et 23 % respectivement. Les transferts à travers les montants de l’ossature peuvent être estimés à partir de calculs simplifiés : en supposant que les transferts soient unidimensionnels et que la température des parements intérieurs et extérieurs soit égale à celle calculée au niveau de la paroi courante, la connaissance des propriétés thermiques des matériaux permet de déterminer le flux de chaleur qui les traverse. Au niveau des parois horizontales, une démarche similaire est appliquée, en utilisant la mesure de la température de l’air dans les combles et de l’air extérieur comme conditions limites. Le terme « source » enfin correspond à la mesure de la consommation électrique instantanée de l’équipement de la cellule (précision des capteurs : 1,5 %). Un récapitulatif des résistances thermiques sèches et des surfaces mises en jeu est donné dans le Tableau 29. Les résultats sont intégrés sur une journée entière et présentés dans le graphique de la Figure 65.

Tableau 29 : Comparaison de la résistance thermique des différents constituants de l’enveloppe, calculée à partir des propriétés des matériaux secs.

| | Parois verticales | Parois horizontales | Montants | Porte |
|-------------------------|-------------------|---------------------|----------|-------|
| $R_{Th} (m^2.K.W^{-1})$ | 4,0 | 13,0 | 2,0 | 4,5 |
| $S (m^2)$ | 37,5 | 41,4 | 5,9 | 1,8 |

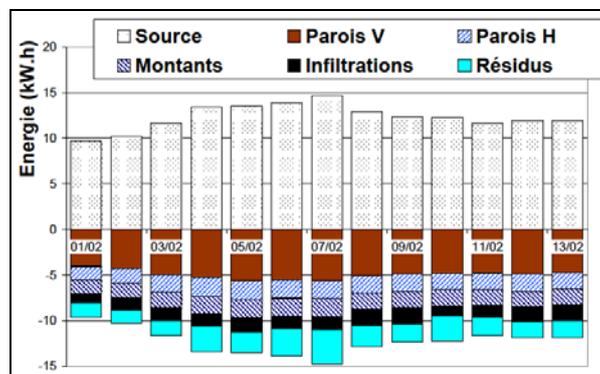


Figure 65 : Comparaison des termes du bilan de chaleur (Eq. 45) appliqué à la séquence expérimentale de février 2012

Pour maintenir la température de l'air intérieur à 20°C lors de cette séquence expérimentale, la consommation journalière moyenne a été de 12 kW.h. Les proportions des différents termes du bilan évoluent relativement peu d'un jour à l'autre (de l'ordre de ± 3 %), ce qui permet d'effectuer le constat général suivant :

- Un peu plus de la moitié des transferts de chaleur ont été validés dans ce travail (41 % des transferts par les parties courantes des parois verticales, 12 % par les infiltrations d'air) ;
- Les transferts à travers les parois horizontales représentent 15 % des déperditions totales. Le travail de validation à fournir porte sur la définition des transferts avec l'air extérieur et la modélisation des transferts dans les combles. C'est un objectif qui semble réalisable à moyen terme ;
- Les transferts à travers les montants de l'ossature représentent une proportion équivalente aux transferts à travers les parois horizontales (14 %). Le travail présenté dans cette étude devrait permettre de définir les conditions aux limites pour ces deux éléments de paroi, en supposant que les parements intérieurs et extérieurs soient homogènes et les transferts unidimensionnels. Par contre, les transferts à l'intérieur des montants eux-mêmes ne peuvent être validés à partir de l'étude actuelle. En effet, il s'agit de matériaux très fortement hygroscopiques dont le comportement hygrothermique peut être bidimensionnel voire tridimensionnel. Un travail plus important serait donc à fournir, tant en terme de modélisation que de validation ;
- Le terme « résidus » enfin représente un sixième des pertes énergétiques. Ce terme comprend les effets multidimensionnels des transferts (les pertes au niveau des jonctions des parois verticales et horizontales et des poutres situées dans les parois horizontales) auxquels s'ajoutent les incertitudes sur l'estimation des autres transferts (y compris au niveau du terme source). Une recherche bibliographique, par exemple dans la réglementation thermique actuelle (règles « Th-Bât-ThU5/5 Ponts thermiques », règles « Th-U fascicule 4 : Parois opaques. 3.9.3. Ponts thermiques intégrés courants présents dans les parois légères à ossature bois »), permettrait de proposer des fonctions de transfert prenant en compte ces déperditions de manière simplifiée.

Ce bilan permet donc d'identifier les points à approfondir dans le futur. En effet, la validation actuelle du modèle permet de donner une estimation précise de la moitié des transferts qui se développent à l'échelle de la cellule toute entière : l'autre moitié des transferts doivent donc être étudiés pour permettre de valider un bilan énergétique complet. Néanmoins, il est envisageable de progresser rapidement sur ce point en s'intéressant aux parties horizontales de l'enveloppe qui n'ont pas encore été validées. Pour d'autres éléments, notamment les montants de l'ossature, cela demande a priori des recherches plus approfondies.

B.4 Humidité dans les parois verticales de l'enveloppe

Les mesures d'humidité absolue réalisées dans les parois verticales sont comparées aux résultats de la modélisation pour les mêmes positions que pour les mesures de température. Les résultats sont présentés dans les graphiques de la Figure 66 et de la Figure 67. Les positions des capteurs correspondent à celle présentées dans la Figure 62 et Figure 63.

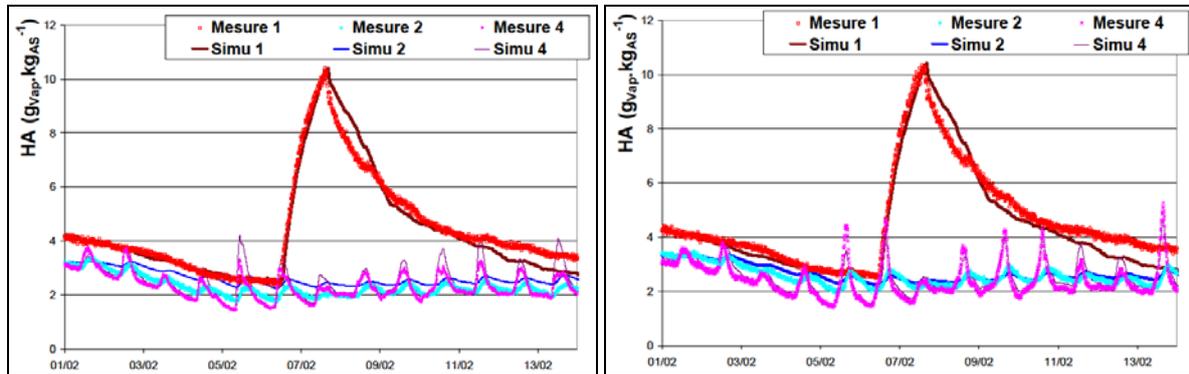


Figure 66 : Comparaison des mesures d'humidité absolue avec les résultats de la simulation pour la paroi Est (gauche) et Ouest (droite)

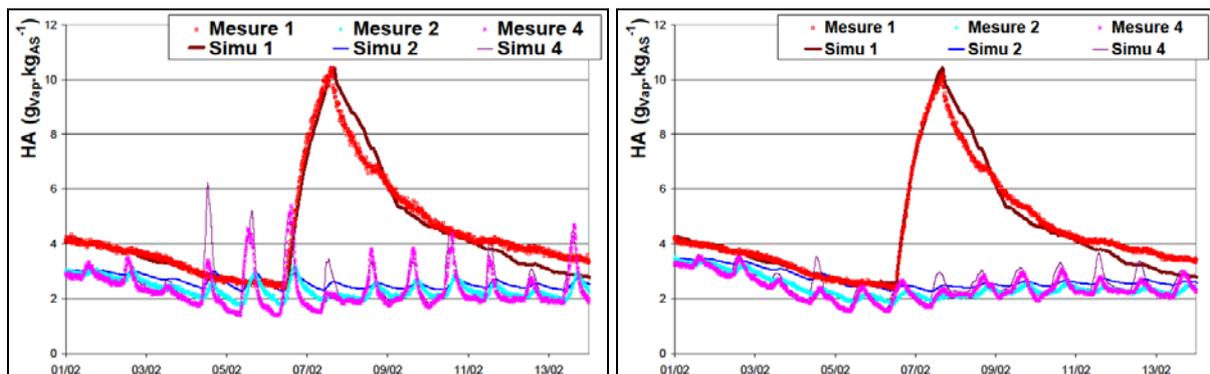


Figure 67 : Comparaison des mesures d'humidité absolue avec les résultats de la simulation pour la paroi Sud (gauche) et Nord (droite)

Le modèle suit globalement les mesures au point 4 : des écarts plus importants (entre 0,4 et 1 $\text{g}_{\text{vap}}\cdot\text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$) peuvent apparaître ponctuellement mais sont à relier aux écarts en température entre le modèle et les mesures (Piot *et al.* 11). Hormis ces pics, l'écart avec les mesures reste inférieur à 0,2 $\text{g}_{\text{vap}}\cdot\text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$ (pour rappel, la précision des capteurs est estimée à 0,35 $\text{g}_{\text{vap}}\cdot\text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$).

Au niveau du point 2, le modèle permet de suivre l'allure globale des mesures, bien qu'un décalage compris entre 0,2 et 0,4 $\text{g}_{\text{vap}}\cdot\text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$ apparaisse sur chaque face au bout de quelques jours et se maintienne sur l'ensemble de la séquence. Ce décalage est très probablement dû au choix des conditions initiales en humidité du parement extérieur : comme ce matériau est très hygroscopique une petite erreur sur ses propriétés initiales se traduit par un écart plus important dans l'isolant. Ce comportement a déjà été identifié par (Piot 09). Par contre, cela ne se retrouve pas sur le parement intérieur : en effet, ce parement est constitué d'un matériau moyennement hygroscopique (plaque de plâtre) et l'impact du parement extérieur est quasi-nul de par la présence du pare-vapeur. Une

solution simple pour limiter l'influence des conditions initiales consiste à débiter la simulation avant la période étudiée (Chapitre ID.2). Cependant, les données météorologiques ont été accidentellement effacées sur plus de 20 jours avant le début de cette séquence expérimentale, ce qui rend ce travail impossible ici.

Enfin, l'évolution de l'humidité au niveau du point 1 suit les mesures jusqu'à la fin de la génération de vapeur, puis des écarts plus importants apparaissent. Pour les comprendre, il faut alors considérer l'évolution de l'air intérieur, le point 1 étant situé juste à l'interface entre l'air et le parement intérieur.

B.5 Humidité de l'air intérieur et renouvellement d'air

L'évolution de l'humidité de l'air intérieur résulte des transferts avec les 6 parements intérieurs, de la production de vapeur et enfin des transferts provoqués par le renouvellement d'air de la cellule. Les résultats de la simulation sont comparés aux mesures dans le graphique de gauche de la Figure 68. Le graphique de droite présente le renouvellement d'air calculé sur cette même période.

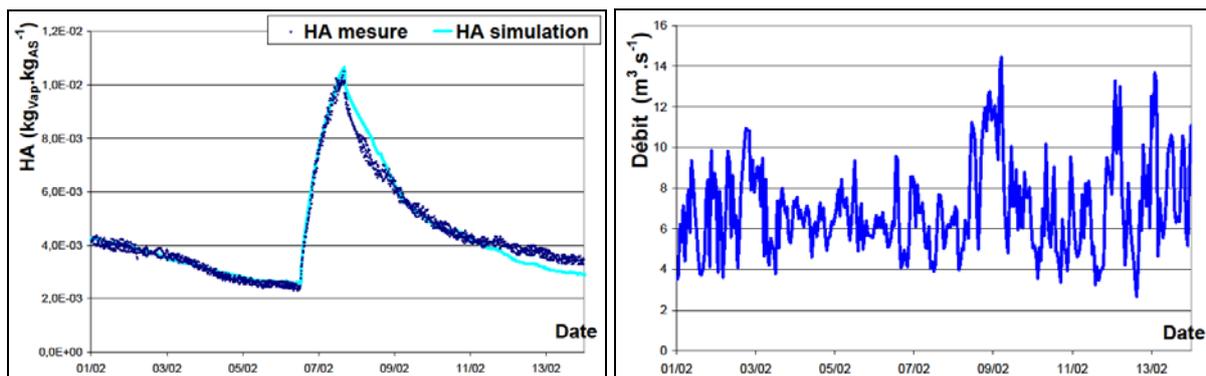


Figure 68 : Comparaison des mesures d'humidité de l'air intérieur avec les résultats de la simulation (gauche) et calcul du renouvellement d'air de la cellule (droite)

Le modèle permet d'estimer un renouvellement d'air moyen de $6,9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (soit $0,14 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$) pour cette séquence expérimentale. Cet ordre de grandeur est plus élevé que ceux mesurés par gaz traceur pour des écarts de température similaires (aux alentours de $5,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, expérience N°8 dans le Tableau 24, Chapitre IIIC.3). Cependant, la vitesse moyenne du vent est ici plus importante ($3,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) que pour l'expérience par gaz traceur ($1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

L'évolution de l'humidité de l'air intérieur est correctement reproduite ; cela constitue une avancée majeure par rapport aux résultats obtenus précédemment (Piot 09). Avant de commenter ce résultat, il peut être utile de rappeler le contexte dans lequel il a été obtenu :

- Les conditions extérieures sont connues mais non-contrôlées ;
- La sollicitation hygrique est connue, la température de l'air intérieur est maintenue constante, et la température de l'interface entre les parements horizontaux et l'isolant est connue ;

- Les transferts couplés dans les parois sont modélisés d'un point de vue 1D. Toutes les parois sont équipées d'une pare-vapeur qui a été posé avec soin, de sorte que les parements intérieurs n'échangent pas de vapeur avec les montants de l'ossature et l'isolant.
- L'humidité relative mesurée de part et d'autre des parements intérieurs est resté comprise entre 25 et 75 %, de sorte que seul le comportement hygroscopique des matériaux a été étudié.

Quelques écarts apparaissent ponctuellement (02/02 15h, 07/02 17h30, 08/02 16h) mais sont compensés par la suite. À la fin de la simulation par contre, le modèle sous-estime l'humidité de l'air intérieur de $0,5 \text{ g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$. Ces écarts pourraient être la conséquence de deux effets principalement : la prise en compte des transferts de vapeur d'eau dans les parois et l'estimation du renouvellement d'air, dont la précision est de 23 %. En effet, il a été observé que cette précision a tendance à diminuer lorsque la vitesse du vent dépasse $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui est le cas ici.

Cependant, ces écarts sont inférieurs à l'incertitude de mesure sur l'air intérieur ($\pm 0,8 \text{ g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$ à 20°C et 50 % HR). Cela signifie donc que la prise en compte des propriétés des matériaux est suffisamment précise dans le cas présenté ici. En particulier, cela justifie le fait que l'hystérésis de sorption n'est pas été prise en compte. Cela rejoint les conclusions de (Carmeliet *et al.* 05), qui précisait que pour des conditions similaires, l'effet tampon des matériaux dépendait davantage de leur perméabilité à la vapeur que de l'effet d'hystérésis. En conséquence, il est probable que le gain en précision sur l'évolution de l'humidité de l'air intérieur par rapport aux travaux de (Piot 09) provienne de la meilleure estimation des infiltrations d'air.

De ce fait, il est possible de réaliser un bilan en vapeur d'eau avec davantage de précision que celui présenté dans le Chapitre IIIA.2, et donc de proposer une analyse plus fine des transferts de vapeur d'eau.

B.6 Bilan en humidité

Le bilan comporte quatre termes distincts comme le montre Eq. 58 : la production de vapeur G_{So} , la capacité hygrique de l'air intérieur G_{Int} , les transferts avec les parois G_{Par} et les transferts provoqués par le renouvellement d'air G_{Infiltr} .

$$\text{Eq. 58} \quad G_{\text{So}} + G_{\text{Int}} + G_{\text{Par}} + G_{\text{Infiltr}} = 0$$

Le graphique de gauche de la Figure 69 présente la comparaison des différents termes du bilan de vapeur. Dans le graphique de droite, le terme « Parois » est décomposé à partir des résultats de la simulation afin de distinguer les transferts de vapeur avec le plafond, les parois verticales, et le plancher.

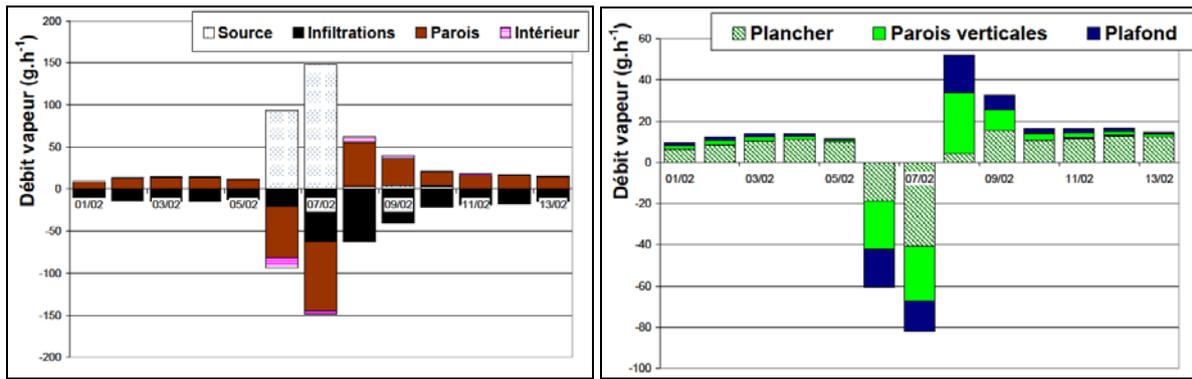


Figure 69 : Comparaison des termes du bilan de vapeur (Eq. 58) appliqué à la séquence expérimentale de février 2012 (gauche) et décomposition des débits de vapeur en fonction des différents parois étudiées (droite)

Avant la phase de production de vapeur, les infiltrations d'air provoquent une diminution de l'humidité de l'air intérieur, compensée majoritairement par les transferts avec les parois. De ce fait, l'humidité de l'air intérieur évolue relativement peu. Lors de la phase de production de vapeur, les parois absorbent plus de 60 % de la vapeur produite, 32 % est évacuée par les infiltrations d'air, et un peu moins de 8 % participe à l'augmentation de l'humidité de l'air intérieur. Dès la fin de la génération de vapeur, les infiltrations d'air pilotent la décroissance de l'humidité de l'air intérieur, compensée à nouveau par les transferts de vapeur d'eau aux parois. L'air extérieur étant beaucoup plus sec que l'air intérieur ($< 2 \text{ g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$ à partir du 03/02), l'effet des infiltrations d'air est d'autant plus important que l'humidité de l'air intérieur est élevée, c'est-à-dire lors de la phase de production de vapeur et au début de la décroissance.

Le second graphique renseigne sur le rôle des différents parements. Deux comportements différents peuvent être identifiés : celui des parements en plâtre (parois verticales et plafond), et celui du plancher en OSB. Avant la génération de vapeur, les transferts de vapeur avec le plancher représentent entre 60 et 80 % des transferts de vapeur d'eau. Lors de la génération de vapeur, ils ne représentent plus qu'entre 30 et 50 %, le rôle des parements en plâtre n'étant plus négligeable. Tout de suite après l'arrêt de la génération de vapeur, l'humidité totale du plancher évolue très peu : les transferts de vapeur avec les parements en plâtre représentent alors 90 % des transferts avec les parois. Enfin, à partir du 10/02, les transferts sont à nouveau dominés par le plancher dans des proportions allant de 60 à 80 %.

Cette différence de comportement s'explique par les différences au niveau des propriétés hygroscopiques des matériaux, notamment leur propriété de sorption. Le plâtre est un matériau moyennement hygroscopique, et réagit de ce fait rapidement aux sollicitations hygriques. A l'inverse, l'OSB possède une inertie hygrique importante, ce qui lui permet de jouer un rôle de tampon hygroscopique nettement plus important. La perméabilité à la vapeur des deux matériaux est également différente, celle du plâtre étant de 12 à 16 fois plus importante que celle de l'OSB. De ce fait, les transferts à l'intérieur de l'OSB sont beaucoup plus lents que pour le plâtre, ce qui se traduit par une réponse moins rapide aux sollicitations. Pour illustrer cela, l'évolution de l'humidité relative des deux côtés des parements (côté intérieur et côté pare-vapeur) a été tracée dans le graphique de

la Figure 70. L'évolution de l'humidité est quasi-identique entre les deux faces du parement en plâtre tandis que l'humidité n'évolue presque pas derrière le parement en OSB.

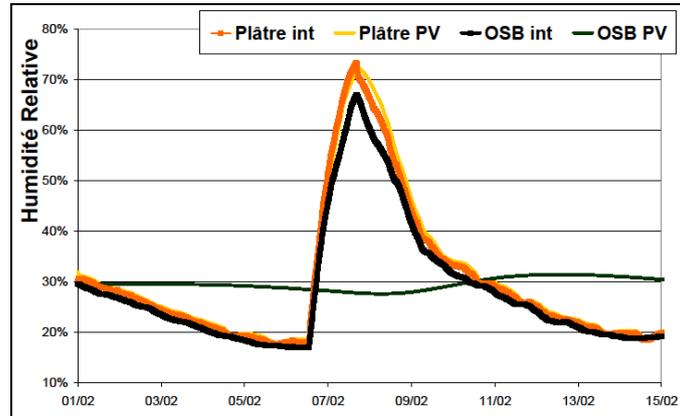


Figure 70 : Evolution simulée de l'humidité relative des deux côtés des parements verticaux en plâtre et du plancher en OSB

Ce dernier point illustre également l'influence des conditions initiales sur le comportement d'un matériau tel que l'OSB. Ici, le matériau a été considéré comme étant à l'équilibre hygrique au début de l'expérience. Ce choix de modélisation a été fait par défaut, aucun thermo-hygromètre n'étant installé entre les parements intérieurs et le pare-vapeur au niveau des parois horizontales. Cependant, il est impossible en pratique d'obtenir cet d'équilibre dans un bâtiment exposé à des conditions climatiques réelles au vu des temps caractéristiques des matériaux hygroscopiques (plusieurs semaines à plusieurs mois). Toutefois, cette hypothèse simplificatrice semble suffisante dans le cadre de la simulation de cette séquence expérimentale.

C Discussion générale et ouverture

Le bilan en vapeur d'eau souligne que l'évolution de l'humidité de l'air intérieur est fortement influencée par l'effet de tampon hygroscopique des parements intérieurs. Ce résultat est intéressant et peut être mis en relation avec les travaux de (Wolkoff et Kjaerggard 07), qui portent sur le lien entre qualité de l'air intérieur et humidité relative (ainsi que d'autres paramètres). Les auteurs proposent de cibler une plage comprise entre 40 et 50 %, émettent des réserves sur la qualité d'un air plus sec, et excluent l'utilisation prolongée d'un air humide (> 60 %). Il pourrait être intéressant de cibler cette gamme d'humidité relative en composant avec l'effet tampon des parois.

L'effet tampon dépend de la capacité de sorption des matériaux ainsi que de leur perméabilité à la vapeur. Ainsi, les parements intérieurs en OSB atténuent les variations d'humidité de l'air intérieur tout en agissant fortement sur la migration de la vapeur vers l'isolant. Du point de vue des transferts de vapeur et sur les échelles de temps considérées ici, ils jouent un rôle proche de celui du pare-vapeur. Ce rapprochement n'est plus pertinent dans le cadre de l'utilisation de plaques de plâtre, car c'est un matériau plus perméable à la vapeur et moins hygroscopique. Néanmoins, quel que soit le

matériau considéré, la quantité de matière absorbée est limitée, et à termes, doit être déstockée : soit par renouvellement d'air (ventilation naturelle, mécanique, régulée, etc.), soit par transport vers l'extérieur à travers la partie isolée des parois.

La migration de la vapeur dans l'isolant n'est généralement pas recherchée, ce que traduit l'emploi fréquent des pare-vapeurs. Cependant, ce phénomène se développe presque inévitablement, et ce quel que soit la configuration de paroi. D'une part, des transferts se développent à travers les imperfections de la mise en œuvre d'un pare-vapeur. D'autre part, l'expérience a permis de mettre en évidence le fait que le parement extérieur (panneau de particules) influait sur l'humidité contenue dans l'isolant. Dans les deux cas, l'humidité a un impact sur les performances thermiques (variation de la conductivité thermique, effet de la chaleur latente) et sur la durabilité de la solution qu'il serait souhaitable de pouvoir décrire.

La durabilité est un concept général qui pourrait être défini comme la capacité d'une solution à maintenir son niveau de performance sous l'effet des mécanismes de dégradation. Pour le cas de l'humidité contenue dans les matériaux, plusieurs mécanismes sont concernés dont l'apparition et le développement de moisissures (les contraintes mécaniques et les effets du gel pourraient également être étudiés). Parmi les travaux les plus récents, (Isaksson *et al.* 10) proposent un modèle simple qui permet d'évaluer le risque de développement de moisissures. Ainsi, les auteurs établissent ce risque pour de l'épicéa exposé à des mesures climatiques (température et humidité relative) effectuées en Suède sur plus de 40 ans. Cependant, cette approche nécessite de connaître les caractéristiques de germination des moisissures, qui dépendent du matériau considéré. Ce type de caractéristiques peut être déterminé en laboratoire, dont les travaux de (Johansson *et al.* 12) constituent un exemple. Dans cette dernière étude, différents matériaux de construction (à base de bois, plâtre, ciment, etc.) ont été placés dans des ambiances contrôlées et observés au microscope pendant plus de 12 semaines. Cependant, les auteurs soulignent la forte sensibilité des résultats au choix des matériaux et à la méthodologie mise en œuvre, ce qui rend difficile toute généralisation. Une caractérisation plus poussée et décrite dans (Buckle *et al.* 11) et repose sur l'utilisation de la tomographie aux rayons X. A partir d'essais menés sur des échantillons exposés à des conditions climatiques réelles, les auteurs soulignent également l'existence de fortes disparités entre des matériaux similaires (cette étude se focalisait sur des échantillons de contreplaqué). Néanmoins, (Isaksson *et al.* 10) et (Buckle *et al.* 11) précisent que la notion de durabilité peut être correctement approchée à l'aide de différents indicateurs (*dose – response*, basé sur la température et l'humidité d'exposition, *time of wetness*, basé sur une limite de teneur massique en eau). Ce genre d'indicateurs pourrait être estimé à partir des résultats de simulation, et il serait donc envisageable de donner une comparaison entre différentes configurations de parois. Toutefois, la définition de critères pertinents risque d'être délicate et nécessite un travail supplémentaire.

Ces critères de durabilité pourraient être associés à ceux de la consommation énergétique dans une démarche de recherche d'une enveloppe optimale. Par exemple, les isolants hygroscopiques utilisés dans cette étude ont une conductivité thermique sèche supérieure de 14 et 20

% à celle de la laine de verre (fibre de bois et ouate de cellulose respectivement), mais leur capacité hygrique pourrait être un avantage en termes de durabilité. Une réflexion similaire pourrait être menée sur l'utilisation d'un pare-vapeur, dont les performances dépendent pour beaucoup de la qualité de la mise en œuvre. Ainsi, il serait intéressant d'estimer si l'utilisation de parements et / ou d'isolants hygroscopiques pourrait permettre d'obtenir des performances et une durabilité voisines d'une paroi comportant des matériaux moins hygroscopiques associés à un pare-vapeur.

Tel qu'il a été conçu, étudié et validé, l'outil de simulation permet d'apporter des éléments de réponse à ces questions. Néanmoins, une réflexion supplémentaire est nécessaire afin de définir les paramètres d'entrées de la simulation :

- Un scénario d'occupation réaliste (consigne de chauffage, production de vapeur d'eau) devrait être défini : en particulier, les productions de vapeur réalisées durant ces travaux ne sont pas représentatives d'une activité humaine « classique ». Dans le cadre de l'annexe 55 de l'AIE, (Johansson *et al.* 10) proposent une méthode stochastique permettant de simuler la production de vapeur d'eau due à l'occupation d'un bâtiment d'habitation. Ce genre d'approche pourrait être repris ici ;
- Bien que le renouvellement d'air de la cellule soit désormais caractérisé en conditions naturelles, il pourrait être intéressant de simuler un renouvellement d'air contrôlé. Plus particulièrement, il serait intéressant de voir si le dimensionnement d'un système hygro-réglable pourrait être combiné avec l'effet tampon des parois afin d'optimiser les performances générales du bâtiment (consommation énergétique, durabilité, qualité de l'air, etc. voir (Woloszyn *et al.* 09)). Il peut être important de rappeler ici que l'effet tampon peut être sensiblement différent dans le cas d'un bâtiment réel et occupé : la perméabilité à la vapeur est en effet fortement influencée par l'utilisation d'un enduit ou d'un revêtement appliqué sur les parements intérieurs (De Meijer 01, Ramos *et al.* 10). De plus, le mobilier peut participer de manière significative au phénomène de tampon hygroscopique (Padfield et Jensen 11) ;
- Le choix des conditions initiales peut également influencer les résultats, en particulier en ce qui concerne le taux d'humidité des matériaux, voire la période de l'année à laquelle le bâtiment est mis en service ;
- Afin d'apprécier la durabilité d'une solution, la disponibilité des données climatiques devraient permettre d'effectuer des simulations sur des durées supérieures à au moins un an. En effet, (Isaksson *et al.* 10) présentent un cas sensible, pour lequel l'interprétation des résultats n'est pas immédiate du fait des fortes variations climatiques sur plus de 40 ans.

Sur ce dernier point, il est utile de préciser que le modèle n'a pas été développé dans un souci d'optimisation du temps de calcul : en moyenne, simuler les transferts à l'échelle du bâtiment sur une journée nécessite 50 minutes de calcul (soit 13 jours pour simuler 1 an). Néanmoins, il devrait être possible de progresser sur ce point de manière significative. Toutefois, un effort considérable devrait être fourni pour que les temps de calcul permettent d'envisager une approche stochastique, telle que celle présentée dans (Johansson *et al.* 10).

D Synthèse

Une séquence expérimentale avec génération de vapeur d'eau a été réalisée durant le mois de février 2012. L'outil de modélisation HAM-Tools a été utilisé pour simuler le comportement du bâtiment durant cette séquence sans imposer de conditions limites sur l'air intérieur et sur les parements verticaux. Cette démarche permet de combiner les développements du modèle exposés dans les trois chapitres précédents et de conclure sur les performances globales de l'outil.

La confrontation des résultats de la simulation a porté dans un premier temps sur les mesures ponctuelles de température. Le modèle permet de reproduire l'évolution en température pour chacune des parois verticales avec une précision inférieure à celle des capteurs au niveau des parements intérieurs. Côté extérieur, des écarts plus importants ($> 3^{\circ}\text{C}$) peuvent apparaître sur des valeurs en pics : ces écarts varient selon les conditions extérieures et l'orientation des parois, mais aucune tendance particulière n'est apparue. Plus généralement, ces écarts semblent provenir de la modélisation des transferts dans la lame d'air qui ont été pris en compte de manière simplifiée. Toutefois, le modèle permet de calculer le flux qui traverse la paroi avec une précision moyenne de l'ordre de 3 % sur une journée comme sur l'ensemble de la séquence expérimentale.

Une démarche similaire a été appliquée aux mesures d'humidité et a permis d'obtenir des résultats d'une précision suffisante en ce qui concerne l'évolution globale en humidité. Au niveau de l'air intérieur en particulier, l'évolution de l'humidité est correctement représentée tout au long de la séquence expérimentale, ce qui constitue un progrès significatif par rapport aux résultats obtenus par (Piot 09). Plus localement, des écarts ponctuels apparaissent lorsque les pics de température sur le parement extérieur sont mal estimés. De même, un léger décalage apparaît à l'interface entre le parement-vapeur et l'isolant en début de simulation, probablement dû au choix des conditions initiales en humidité du parement extérieur. Des comportements similaires ont déjà été constatés par (Piot 09) mais ne provoquent pas de dérive sur la durée de la séquence expérimentale.

Les performances moyennes du modèle en température et en humidité étant satisfaisantes, un bilan de chaleur et de vapeur a été appliqué à la cellule toute entière. Cette dernière étape a permis de souligner le rôle non négligeable des composants du bâtiment qui n'ont pas fait l'objet d'une étude approfondie (parois horizontales, montants de l'ossature, etc.). Concernant le bilan de vapeur, le modèle permet de décomposer l'influence des différents parements et d'apprécier l'influence des infiltrations d'air et des différents matériaux, notamment selon leurs propriétés hygroscopiques. La validation du modèle ne suffit cependant pas à comparer les différentes configurations de parois : pour cela, il est nécessaire de définir des paramètres d'entrée réalistes, ce qui demande une réflexion et un travail supplémentaire.

Conclusion générale et perspectives

Dans le cadre de ce travail, des mesures réalisées sur une cellule expérimentale à ossature bois exposée à des conditions climatiques réelles ont été utilisées pour valider un modèle de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à l'échelle du bâtiment. Une démarche progressive a été adoptée de manière à étudier des phénomènes localisés, ce qui a permis de réaliser des expérimentations ciblant des transferts particuliers identifiés lors d'une étude antérieure et d'en affiner la modélisation. Ces études ont porté sur :

- La prise en compte des transferts couplés de chaleur et de masse dans les parois verticales ;
- La modélisation des transferts dans la lame d'air ventilée ;
- La caractérisation du renouvellement d'air de la cellule.

La première étude s'est appuyée sur les mesures de température et d'humidité faites dans les parois verticales du bâtiment. Ces mesures ont été effectuées sur une durée de plus de quatre ans et pour six configurations de parois différentes. Le cas particulier des parois comportant un isolant hygroscopique a été traité plus particulièrement, ce qui a permis de mettre en évidence expérimentalement le couplage des transferts de chaleur et de masse dans l'isolant. Du point de vue numérique, le modèle est capable de reproduire correctement l'évolution en température et en humidité sur une période de six mois et pour des sollicitations modérées. Sous l'effet du rayonnement solaire cependant, la température du parement extérieur, très hygroscopique (OSB), évolue rapidement (20°C en 4h) et le comportement en humidité de la paroi est moins bien représenté. Bien que cela constitue une limite du modèle, la dérive observée est limitée sur la période considérée ($0,2 \text{ g}_{\text{vap}} \cdot \text{kg}_{\text{AS}}^{-1}$) et le modèle permet de représenter correctement les évolutions mesurées par la suite.

Dans la continuité des conclusions de la thèse d'Amandine Piot (09), la seconde partie de l'étude a été consacrée à la modélisation des transferts qui se développent dans la lame d'air ventilée du bardage extérieur. Plusieurs investigations expérimentales et numériques ont permis d'établir que la lame d'air et les entrées d'air régulièrement disposées sur sa hauteur provoquent des effets fortement bidimensionnels qui ne pouvaient être pris en compte jusqu'à présent. Une corrélation a été définie afin de représenter l'évolution du débit de la lame d'air avec la hauteur et a été intégrée à l'outil de modélisation. La description des transferts de chaleur dans la lame d'air a été complétée à partir de résultats issus de la littérature. Cette démarche, basée sur une description des phénomènes physiques adaptée à l'échelle globale du bâtiment, a permis de retrouver les températures mesurées sur le pare-pluie des faces Est et Ouest. La précision de la méthode est estimée à 8 % en termes de flux de chaleur transmis à la paroi et pour des conditions de fort ensoleillement.

La troisième et dernière étude spécifique a été consacrée au renouvellement d'air de la cellule, dont l'impact sur l'humidité de l'air intérieur a été démontré. Plusieurs mesures ont été menées

afin de déterminer la perméabilité à l'air du bâtiment pour différentes configurations de parois. De plus, des mesures par la méthode des gaz traceurs ont permis d'estimer que le renouvellement d'air de la cellule en conditions naturelles pouvait varier entre 3 et 18 m³.h⁻¹. Ce renouvellement d'air est désormais estimé à l'aide d'un modèle en pression dont les paramètres ont été identifiés par la mesure. La précision moyenne sur le débit de renouvellement d'air est de 23 %. Cette précision s'explique en partie par la forte sensibilité du modèle au calcul de la pression en un point particulier du système, ici la bouche d'aération de la cellule.

Ces différentes études se sont déroulées en s'appuyant sur des conditions aux limites simplifiées, de manière à faciliter l'analyse des résultats et le développement du modèle. Pour estimer la précision globale du modèle, c'est-à-dire à l'échelle du bâtiment et pour des transferts couplés, une séquence expérimentale a été simulée en prenant en compte l'ensemble des transferts simultanément. L'évolution moyenne en température et en humidité dans les parois de l'enveloppe est correctement reproduite. De plus, l'évolution de l'humidité de l'air intérieur est correctement représentée tout au long de la séquence expérimentale, ce qui permet de vérifier que le bilan en vapeur d'eau est correct à l'échelle de la cellule. Des écarts un peu plus importants en température sont apparus pour les journées les plus ensoleillées, et de légers décalages en humidité sont également apparus en début et fin de simulation. Ces écarts correspondent aux limites observées lors des études spécifiques, et ne proviennent donc pas du couplage des transferts à l'échelle du bâtiment.

De manière plus générale, la bonne concordance entre mesures et résultats de simulation permet de conclure sur la validité et la généralité de la démarche mise en œuvre ici. La décomposition de la problématique a permis d'améliorer la modélisation des transferts pris séparément, mais également leur couplage à l'échelle de la cellule expérimentale. D'une certaine façon, ce constat permet également de valider les hypothèses de simulation (transferts unidimensionnels dans les parois, prise en compte des propriétés des matériaux, influence des conditions extérieures, etc.).

Une éventuelle amélioration des performances de l'outil de simulation se traduirait alors par une prise en compte plus fine des phénomènes liés aux spécificités du support expérimental (géométrie de la lame d'air, effets du vent sur la bouche d'aération, etc.). Une autre piste intéressante, plus générale, porterait sur l'étude en conditions contrôlées des éléments de paroi. Cela pourrait cibler plus particulièrement l'effet de la chaleur latente dans un isolant hygroscopique et la réaction d'un matériau hygroscopique à des variations rapides en température. Enfin, les temps caractéristiques des matériaux fortement hygroscopiques peuvent atteindre plusieurs mois alors que la simulation à l'échelle du bâtiment a été menée sur une période d'une douzaine de jours. Il pourrait être intéressant de confronter le modèle avec un cas de référence défini sur plusieurs mois afin de mieux estimer les performances du modèle en humidité et l'impact des décalages observés lors de la simulation.

Par ailleurs, les performances moyennes du modèle étant satisfaisantes, il serait envisageable de l'utiliser pour simuler le comportement d'un bâtiment fictif. Le modèle ayant été développé essentiellement sur l'étude des transferts dans la partie courante des parois verticales et au niveau de

l'air intérieur, il serait intéressant d'estimer l'impact des constituants des parois en termes de durabilité, de performances énergétiques et de confort de l'occupant. Ces résultats pourraient être utilisés en complément des connaissances actuelles pour permettre de qualifier, voire d'orienter, les habitudes constructives. Dans cette optique et à plus long terme, une démarche statistique pourrait être envisagée.

Bibliographie

- Afonso C., Oliveira A., 2000. Solar chimneys: simulation and experiment. *Energy and Buildings* 32, p.71–79
- Allard F., 1998. *Natural ventilation in buildings*, James & James, London.
- Almeida G., Rémond R., Perré P., 2011. Sorption behaviour of various lignocellulosic building materials, 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland, vol.2, p.631-637
- Amin M., Dabiri D., Navaz H.K., 2009. Tracer gas technique: A new approach for steady state infiltration rate measurement of open refrigerated display cases. *Journal of Food Engineering* 92, p.172–181
- Avramidis, S.T., Siau, J.F., 1987. An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. *Wood science and technology* 21, p.249–256.
- Awbi H.B., 2003. *Ventilation of buildings – Second Edition*. SponPress.
- Balocco C., 2002. A simple model to study ventilated facades energy performance, *Energy and Buildings* 34, p.469–475.
- Baker J. T., Kim S. H., Gitz D. C., Reddy V. R., 2004. A method for estimating carbon dioxide leakage rates in controlled-environment chambers using nitrous oxide, *Environmental and experimental botany* 51, p.103–110
- Becker S., Lienhart H., Durst F., 2002. Flow around three-dimensional obstacles in boundary layers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, p.265–279.
- Belleghem, M.V., Steeman, M., Willockx, A., Janssens, A., De Paepe, M., 2011. Benchmark experiments for moisture transfer modelling in air and porous materials. *Building and Environment* 46, p.884–898.
- Blondel A., Plaisance H., 2011. Screening of formaldehyde indoor sources and quantification of their emission using a passive sampler, *Building and Environment* 46, p.1284–1291
- Brun A., 2011, Amélioration du confort d'été dans des bâtiments à ossature par ventilation de l'enveloppe et stockage thermique, Thèse, Laboratoire d'Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement, Chambéry, France
- Bouhaya L., 2010. Optimisation structurelle des Gridshells, Thèse, Université Paris-Est, France.
- Buchlin J.M., 2002, Convective heat transfer in a channel with perforated ribs. *International Journal of Thermal Sciences* 41, p.332–340.
- Van den Bulcke J., De Windt I., Defoirdt N., Van Acker J., 2011. Moisture dynamics and fungal susceptibility of plywood, *International Biodeterioration & Biodegradation* 65, p.708–716.
- Van Buggenhout S., Van Brecht A., Eren Ozcan S., Vranken E., Van Malcot W., Berckmans D., 2009. Influence of sampling positions on accuracy of tracer gas measurements in ventilated spaces, *Biosystems Engineering* 104, p.216–223
- Carmeliet J., Derome D., 2012a. Temperature driven inward vapour diffusion under constant and cyclic loading in small-scale wall assemblies: Part 1 experimental investigation, *Building and Environment*, 48, p.48-56.

Bibliographie

- Carmeliet J., Derome D., 2012b. Temperature driven inward vapour diffusion under constant and cyclic loading in small-scale wall assemblies: Part 2 heat-moisture transport simulations, *Building and Environment*, 47, p.161-169.
- Carmeliet J., de Wit M., Janssen H., 2005. Hysteresis and moisture buffering of wood. 7th Nordic Symposium on Building Physics, Reykjavik 12-15 of June.
- CETE de Lyon, Perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments, Généralités et sensibilisation, Octobre 2006
- Chang T.S., 2007, Effects of a finite section with linearly varying wall temperature on mixed convection in a vertical channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, p.2346–2354.
- Chao C.Y., Wan M.P., Law A.K., 2004. Ventilation performance measurement using constant concentration dosing strategy, *Building and Environment* 39, p.1277 – 1288
- Cheong K.W., 2001. Airflow measurements for balancing of air distribution system — tracer-gas technique as an alternative?, *Building and Environment* 36, p.955–964
- Coasne B., Gubbins K.E., Pellenq R.J.-M., 2005. Domain theory for capillary condensation hysteresis, *Phys.Rev. B*, Vol. 72, 024304 (9)
- Costola D., Blocken B., Hensen J.L.M., 2009. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. *Building and Environment* 44, p.2027–2036
- Costola D., Blocken B., Ohba M., Hensen J.L.M., 2010. Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients. *Energy and Buildings* 42, p.881–888
- Crausse P., Laurent J.P., Perrin B., 1996. Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques des matériaux poreux, *Revue Générale de Thermique* 35, p. 95-106
- Desta T.Z., Langmans J., Roels S., 2011. Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes. *Building and Environment* 46, p.1038–1046
- Derome D., Derluyn H., Zillig W., Carmeliet J., 2008. Model for hysteretic moisture behaviour of wood, 8th Nordic Symposium on Building Physics, Copenhagen, Denmark, vol. 2 p. 959-966
- Derome D., 1999. Moisture occurrence in roof assemblies containing moisture storing insulation and its impact on the durability of building envelope. PhD Thesis, University of Concordia, Québec, Canada.
- Desta, T.Z., Langmans, J., Roels, S., 2011. Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes. *Building and Environment* 46, p.1038–1046.
- Fazio, P., Athienitis, A.K., Marsh, C., Rao, J., 1997. Environmental chamber for investigation of building envelope performance. *Journal of architectural engineering* 3, p.97–102.
- Fedorov A.G., Viskanta R., Mohamad A. A., 1997. Turbulent heat and mass transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel-plate channel, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 18, p.307–315.
- Fossa M., Menezo C., Leonardi E., 2008. Experimental natural convection on vertical surfaces for building integrated photovoltaic (BIPV) applications. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32, p.980–990.
- Gan G., 2009a. Effect of air gap on the performance of building-integrated photovoltaics. *Energy* 34, p.913–921.
- Gan G., 2009b. Numerical determination of adequate air gaps for building-integrated photovoltaics. *Solar Energy* 83, p.1253–1273.
- Gavan V., 2009. Full-scale experimental evaluation and modelling of a double-skin facade. Optimal control of thermal and visual comfort, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France

Bibliographie

- Geving S., 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.
- Geving, S., Karagiozis, A., Salonvaara, M., 1997. Measurements and Two-Dimensional Computer Simulations of the Hygrothermal Performance of a Wood Frame Wall. *Journal of Building Physics* 20, p.301–319.
- Gudum C., 2003. Moisture Transport and Convection in Building Envelopes Ventilation in Light Weight Outer Walls. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark.
- Habib M.A., Said S.A.M., Ahmed S.A., Asghar A., 2002. Velocity characteristics of turbulent natural convection in symmetrically and asymmetrically heated vertical channels. *Experimental Thermal and Fluid Science* 26, p.77–87.
- Hagentoft C.E., Introduction to building physics, Studentlitteratur AB, Lund, Sweden.
- Hägerstedt O., Hardeerup L.E., 2011. Comparison of measured and calculated temperature and relative humidity with varied and constant air flow in the façade air gap, 9th Nordic Symposium on Building Physics. Tampere, Finland, p. 139–146.
- Hameury S., 2006. The hygrothermal inertia of massive timber constructions, Thèse de doctorat Stockholm, Suède
- Hedlin, C.P., 1988. Heat Transfer in a Wet Porous Thermal Insulation in a Flat Roof. *Journal of Building Physics* 11, p.165–188.
- Hens H., 2007. Building Physics – Heat, air and moisture, Ernst & Sohn, Berlin, Germany
- Hensen J., Bartak M., Drkal F., 2002. Modelling and Simulation of a Double-Skin Façade System, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 108(2), p.1251–1259.
- Holm H., Künzle H.M., 2006. Experimental investigation of the hygric buffering capacity of wood based interior panelling, *Research in Building Physics and Building Engineering*, Montreal, Canada, p. 3-9.
- Holm A., Lengsfeld K. 2007. Moisture-buffering effect - experimental investigations and validation, In: Proceedings buildings X conference, thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings. Clearwater Bach, FL, USA.
- Van Hooff T., Blocken B., 2010. On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semi-enclosed stadium, *Computers & Fluids* 39, p.1146–1155
- Isaksson T., Thelandersson S., Ekstrand-Tobin A., Johansson P., 2010. Critical conditions for onset of mould growth under varying climate conditions. *Building and Environment* 45, p.1712–1721.
- Johansson P., Ekstrand-Tobin A., Svensson T., Bok G., 2012. Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials, *International Biodeterioration & Biodegradation* 73, p.23–32.
- Johansson P., Pallin S., Shahriari M., 2010. Risk assessment model applied on building physics: statistical data acquisition and stochastic modelling of indoor moisture supply in Swedish multi-family dwellings. IAE Annex 55 RAP-RETRO, Copenhagen meeting October 25-57.
- Käkelä P., Vinha J., 2002. Outdoor field test of timber-framed external wall element structure, 6th Symposium on building physics in the nordic countries, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norvège, p. 843-849.
- Kalagasidis A.S., Weitzmann P., Nielsen T. R., Peuhkuri R., Hagentoft C. E., Rode C., 2007. The international building physics toolbox in Simulink. *Energy and Buildings* 39, p.665–674

Bibliographie

- Kalagasidis A.S., 2004, HAM-Tools, An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analyses in Building Physics, These, Department of Building Technology, Building Physics division, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suede.
- 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 (www.ibpt.org)
- Kalamees T., Vinha J., 2003. Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures, *Building and Environment* 38, p.689-697
- Karlsson J. F., Moshfegh B., 2007. A comprehensive investigation of a low-energy building in Sweden, *Renewable energy* 32, p.1830–1841
- Koffi J., 2009, Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France
- Koinakis C.J., 2005. The effect of the use of openings on interzonal air flows in buildings: an experimental and simulation approach, *Energy and Buildings* 37, p.813–823
- 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, Belgium.
- Kumaran K., Lackey J., Normandin N., Tariku F., 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.
- Kuznik F., Catalina T., Gauzere L., Woloszyn M., Roux J.J., 2011. Numerical modelling of combined heat transfers in a double skin façade. Full-scale laboratory experiment validation. *Applied Thermal Engineering* 31, p.3043–3054.
- Kuznik F., 2005. Etude expérimentale des jets axisymétriques anisothermes horizontaux se développant près d'une paroi. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- Kwiatkowski J., Woloszyn M., Roux J.J., 2009. Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials. *Building and Environment* 44, p.633–642.
- Labat M., Woloszyn M., Garnier G., Rusaouen G., Roux J.J., 2012a. Impact of direct solar irradiance on heat transfers behind an open-jointed ventilated cladding: experimental and numerical investigations, *Solar Energy* 86, p.2549-2560
- Labat M., Woloszyn M., Garnier G., Roux J.J., 2012b. Assessment of the air change rate of airtight buildings under natural conditions using the tracer gas technique. Comparison with numerical modelling, *Building and Environment* (2012), doi: 10.1016/j.buildenv.2012.10.010.
- Labat M., Noel M., Woloszyn M., Piot A., Garnier G., Roux J.J., 2012c. Comparison of moisture and temperature measurements for six envelope types with different moisture transfer properties, 5th International Building Physics Conference, Kyoto, Japan
- Labat M., Woloszyn M., Garnier G., Roux J.J., 2012d. Modélisation des transferts de chaleur à travers un bardage ventilé en conditions climatiques réelles, IBPSA France, Chambéry
- Labat M., Garnier G., Woloszyn M., Roux J.J., 2011a. Air change rate measurements under natural pressure gradients using tracer gas method, 12th International Conference on Air Distribution in Rooms, Trondheim, Norway
- Labat M., Garnier G., Woloszyn M., Roux J.J., 2011b. Infrared measurements on a ventilated cladding for assessing its surface temperature and heat transfer calculation through the insulated part of the envelope using a simulation tool , 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland

Bibliographie

- Labat M., Piot A., Garnier G., Woloszyn M., Roux J.J., 2010a. Measurements of the air leakage rate in a wooden frame experimental house, 5th International Symposium on Building and Ductwork Air-tightness, Lyngby, Denmark
- Labat M., Woloszyn M., Roux J.J., Piot A., Garnier G., 2010b. Bilan hygrique sur une maison à ossature bois : rôle des débits d'air non contrôlés et des transferts aux parois, IBPSA France, Moret sur Loing
- Langmans, J., Klein, R., De Paepe, M., Roels, S., 2010. Potential of wind barriers to assure airtightness of wood-frame low energy constructions. *Energy and Buildings* 42, p.2376–2385.
- Laporthe S., Virgone J., Castanet S., 2001. A comparative study of two tracer gases: SF6 and N2O, *Building and Environment* 36, p.313–320
- Larsen T.S., Heiselberg P., 2008. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference, *Energy and Buildings* 40, p.1031–1040
- Lau G.E., Yeoh G.H., Timchenko V., Reizes J.A., 2012. Numerical investigation of passive cooling in open vertical channels. *Applied Thermal Engineering* 39, p.121–131.
- Letan R., Dubovsky V., Ziskind G., 2003. Passive ventilation and heating by natural convection in a multi-storey building. *Building and Environment* 38, p.197 – 208.
- Li Y., Fazio P., Rao J., 2012. An investigation of moisture buffering performance of wood panelling at room level and its buffering effect on a test room, *Building and Environment*, 47, p.205-216.
- Li Y., Delsante A., 2001. Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces, *Building and Environment* 36, p.59–71
- Li Y., Delsante A., Chen Z., Sandberg M., Andersen A., Bjerre M., Heiselberg P., 2001. Some examples of solution multiplicity in natural ventilation, *Building and Environment* 36, p.851–858
- Lindberg R., Binamu A., Teikari M., 2004, Five-year data of measured weather, energy consumption, and time-dependent temperature variations within different exterior wall structures, *Energy and Buildings*, 36, p.495-501.
- Maref W., Lacasse M., Booth D., 2003. Assessing the hygrothermal response of wood sheathing and combined membrane-sheathin assemblies to steady-state environmental conditions, 2nd International conference on building physics, Antwerpen, Belgium, p.427-436.
- Maref W., Lacasse M., Booth D., 2004. Large-scale laboratory measurements and benchmarking of an advanced hygrothermal model, Rapport NRCC-46784
- Maref W., Ouazia, B., Reardon J., Rousseau M., 2007. Ventilation and wall research house, Performance of exterior envelope of whole buildings X conference, Clearwater, U.S.A.
- Marinosci C., Strachan P.A., Semprini G., Morini G.L., 2011. Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen facade building. *Energy and Buildings* 43, p.853–863.
- De Meijer M., 2001. Review on the durability of exterior wood coatings with reduced VOC-content, *Progress in organic coatings* 43, p.217–225.
- Meissner J.W., Mendes N., Mendonça K.C., Moura L.M., 2010. A full-scale experimental set-up for evaluating the moisture buffer effects of porous material, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, p.1197–1202.
- Melikov A. K., Cermak R., Majer M., 2002. Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices, *Energy and Buildings* 34, p.829–836

Bibliographie

- 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.
- Van Moeseke G., Gratia E., Reiter S., De Herde A., 2005. Wind pressure distribution influence on natural ventilation for different incidences and environment densities, *Energy and buildings*, p.878–889
- Mualem Y., 1974. A conceptual model of hysteresis, *Water Resources research*, vol. 10 no. 3
- Muhic S., Butala V., 2006. Effectiveness of personal ventilation system using relative decrease of tracer gas in the first minute parameter, *Energy and Buildings* 38, p.534–542
- Nore K., 2009. Hygrothermal performance of ventilated wooden cladding. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology.
- Nore K., Blocken B., Thue J.V., 2010. On CFD simulation of wind-induced airflow in narrow ventilated facade cavities: Coupled and decoupled simulations and modelling limitations. *Building and Environment* 45, p.1834–1846.
- Obrecht C., Kuznik F., Tourancheau B., Roux J.J., 2011. Towards urban-scale flow simulations using the Lattice Boltzmann method, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. Sydney, p. 933–940
- Osanyintola O. F., Simonson C. J., 2006. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact, *Energy and Buildings* 38, p.1270–1282.
- Padfield T., Jensen L.A., 2011. Humidity buffering of building interiors by absorbent materials, 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland, p. 475–482.
- Palyvos, J., 2008. A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modelling. *Applied Thermal Engineering*, 28, p.801–808
- Pasztory, Z., Peralta, P.N., Molnar, S., Peszlen, I., 2012. Modeling the hygrothermal performance of selected North American and comparable European wood-frame house walls. *Energy and Buildings* 49, 142–147.
- Patania F., Gagliano A., Nocera F., Ferlito A., Galesi A., 2010. Thermofluid-dynamic analysis of ventilated facades, *Energy and Buildings* 42, p.1148–1155.
- Pedersen C., 1990. Combined heat and moisture transfer in building construction, PhD thesis, Thermal Insulation Laboratory, Technical university of Denmark, Denmark.
- Peralta, P. N., 1995. Modelling wood moisture sorption hysteresis using the independent-domain theory. *Wood and Fibre Science* 27, No. 3, p. 250-257.
- Peuhkuri, R., Rode, C., Hansen, K.K., 2008. Non-isothermal moisture transport through insulation materials. *Building and Environment* 43, p.811–822.
- Piot A., Woloszyn M, Brau J, Abele C, 2011. Experimental wooden frame house for the validation of whole building heat and moisture transfer numerical models, *Energy and Buildings*, 43, p.1322-1328
- Piot A., 2009. Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France
- Punyasompun S., Hirunlabh J., Khedari J., Zeghamati B., 2009. Investigation on the application of solar chimney for multi-storey buildings, *Renewable Energy* 34, p.2545–2561.
- Ramos N.M.M., Delgado J.M.P.Q., de Freitas V.P., 2010. Influence of finishing coatings on hygroscopic moisture buffering in building elements, *Construction and Building Materials* 24, p.2590–2597.

Bibliographie

- Rodrigues A.M., Canha da Piedade A., Lahellec A., Grandpeix J.Y., 2000. Modelling natural convection in a heated vertical channel for room ventilation, *Building and Environment* 35, p.455–469.
- Rouchier S., Janssen H., Rode C., Woloszyn M., Foray G., Roux JJ., 2012. Characterization of fracture patterns and hygric properties for moisture flow modelling in cracked concrete, *Construction and Building Materials* 34, p.54–62.
- Saber H., Maref W., Swinton M.C., St-Onge C., 2011. Thermal analysis of above-grade wall assembly with low emissivity materials and furred airspace, *Building and Environment*, 46, p.1403–1414
- Saltelli A., Tarantola F., Campolongo F., Ratto M., 2004. Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models, John Wiley & Sons Ltd.
- Sanjuan C., José Suárez M., Blanco E., del Rosario Heras M., 2011. Development and experimental validation of a simulation model for open joint ventilated facades, *Energy and Buildings* 43, p.3446–3456.
- Sanjuan C., José Suárez M., Gonzalez M., Pistono J., Blanco E., 2011. Energy performance of an open-joint ventilated facade compared with a conventional sealed cavity façade, *Solar Energy* 85, p.1851–1863.
- Sanjuan C., Nuria Sánchez M., del Rosario Heras M., Blanco E., 2011. Experimental analysis of natural convection in open joint ventilated façades with 2D PIV. *Building and Environment* 46, p.2314–2325.
- Sankar M. , Do Y., 2010. Numerical simulation of free convection heat transfer in a vertical annular cavity with discrete heating, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, p.600–606.
- Santamouris M., Synnefa A., Assimakopoulos M., Livada I., Pavlou K., Papaglastra M., Gaitani N., Kolokots D., Assimakopoulos V., 2008. Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation, *Energy and Buildings* 40, p.1833–1843
- Sfakianaki A., Pavlou K., Santamouris M., Livada I., Assimakopoulos M.N., Mantas P., Christakopoulos A., 2008. Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece, *Building and Environment* 43, p.398–405
- Sharag-Eldin A., 2007. A parametric model for predicting wind-induced pressures on low-rise vertical surfaces in shielded environments, *Solar energy* 81, p.52–61
- Simonson, C., 2005. Energy consumption and ventilation performance of a naturally ventilated ecological house in a cold climate. *Energy and buildings* 37, p.23–35.
- Spitz C., Mora L., Wurtz E., Jay A., 2012. Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house, *Energy and Buildings*, article in press.
- Steehan M., Van Belleghem M., De Paepe M., Janssens A., 2010. Experimental validation and sensitivity analysis of a coupled BES–HAM model, *Building and Environment* 45, p.2202–2217
- Straube J., Onysko D., Schumacher C., 2002. Methodology and Design of Field Experiments for Monitoring the Hygrothermal Performance of Wood Frame Enclosures. *Journal of Building Physics* 26, p.123–151.
- Svennberg, K., Lengsfeld, K., Harderup, L.-E., Holm, A., 2007. Previous Experimental Studies and Field Measurements on Moisture Buffering by Indoor Surface Materials. *Journal of Building Physics* 30, p.261–274.
- Swami M.V., Chandra S., 1988. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural ventilation airflows. *ASHRAE transactions* 94 (Pt 1), p. 243–266
- Talukdar, P., Olutmayin, S.O., Osanyintola, O.F., Simonson, C.J., 2007. An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. Part I: Experimental facility and material property data. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, p.4527–4539.

Bibliographie

- Tanner D.J., Cleland A.C., Robertson T., Opara L.U., 2000. Use of Carbon Dioxide as a Tracer Gas for Determining In-package Airflow Distribution, *J. agric. Engng Res* 77, p.409–417
- Tariku F., Kumaran K., Fazio P., 2010. Integrated analysis of whole building heat, air and moisture transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, p. 3111-3120
- Traoré I., D. Lacroix, L. Trovalet, Jeandel G., 2011. Heat and moisture transport in wooden multi-composite panels, Dynamic study of the air layer impact on the building envelope energetic behaviour. *International Journal of Thermal Sciences* 50, p.2290–2303
- Tremblay, C., Cloutier, A., Fortin, Y., 2000. Determination of the effective water conductivity of red pine sapwood. *Wood Science and Technology* 34, p.109–124.
- Uematsu Y., Isyumov N., 1999. Wind pressures acting on low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 82, p.1–25
- Vera S., Fazio P., Rao J., 2008. Experimental set-up and initial results of moisture transport through horizontal openings, 8th Symposium on building physics in the Nordic countries, Copenhagen, Denmark, p.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, Thesis, Tampere University of technology, Tampere, Finland
- Yang X., Fazio P., Ge H., Rao J., 2012. Evaluation of moisture buffering capacity of interior surface materials and furniture in a full-scale experimental investigation, *Building and Environment*, 47, p.188-196
- Yang, X., Vera, S., Rao, J., Ge, H., Fazio, P., 2007. Full-scale experimental investigation of moisture buffering effect and indoor moisture distribution, in: *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings (Building X Conference)*.
- Yilmaz T., Fraser S.M., 2007. Turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, p.2612–2623.
- Yoshino H., Mitamura T., 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, p.1418-1425
- Walker I.S., Wilson D.J., Sherman M.H., 1998. A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations, *Energy and Buildings* 27, p.293–299
- Wolkoff P., Kjærgaard S. K., 2007. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality, *Environment international* 33, p.850–857.
- Woloszyn M., Kalamees T., Abadie M.O., Steeman M., Kalagasidis A.S., 2009. The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings, *Building and Environment* 44, p.515–524
- Woloszyn M., 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, Belgium, ISBN 978-90-334-7057-8
- Woloszyn M., Rode C., 2008b. Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings, *Building Simulation: an international journal*, 1, p.5-24.
- Zarr, R.R., Burch, D.M., Fanney, A.H., 1995. Heat and moisture transfer in wood-based wall construction: measured versus predicted. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
- Ziskind G., Dubovsky V., Letan R., 2002. Ventilation by natural convection of a one-storey building, *Energy and Buildings* 34, p.91–102.

Annexe 1 : Rapport d'essai, test d'un thermo-hygromètre en étuve

Un des thermo-hygromètres utilisés pour effectuer des mesures sur l'air intérieur a été prélevé afin de tester ses performances en laboratoire. Ce test a été mené au CETHIL durant le mois de mai 2011 par C.Vinet, stagiaire technicien. Le matériel utilisé était alors :

- Une enceinte climatique CTS (Modèle : CR-40/350) ;
- Une carte d'acquisition (PCI 6221) ;
- Un capteur de référence : thermo-hygromètre capacitif SHT75 neuf (Sensirion) ;
- Le capteur testé : thermo-hygromètre capacitif VAISALA usagé (4 ans) et équipé d'un capot de protection (Modèle HUMICHIP 17204HM).

Les deux capteurs ont été plongés dans l'étuve pendant 20h et les conditions dynamiques suivantes ont été appliquées à l'étuve :

- Rampes en température (comprises entre 20 et 60°C sur 3h) ;
- Cycles de paliers de 10 à 20 minutes en humidité relative (25 ; 50 ; 97 ; 70 % HR, 4 cycles) ;
- Rampes en température (comprises entre 5 à 60°C en 2h) ;
- Cycles de paliers en humidité relative (25, 50, 97, 70, 30 % HR).

Les résultats sont présentés dans la Figure 71 et montrent que le capteur utilisé dans la cellule suit correctement les mesures effectuées par le capteur de référence. Un léger déphasage apparaît lors des rampes de température (≤ 5 min), ce qui pourrait être la conséquence de l'inertie du capot de protection du capteur testé (le capteur de référence n'en possède pas). Des écarts un peu plus importants apparaissent pour les fortes humidités relatives (> 80 % HR) et peuvent atteindre 3 %, ce qui reste de l'ordre de la précision annoncée par le constructeur (± 5 % HR). De plus, la précision du capteur de référence est moins bonne dans cette gamme d'humidités relatives.

La précision des capteurs utilisés dans la cellule est donc voisine de celle du capteur de référence : en ce qui concerne cette technique de mesure, il semble difficile d'obtenir des résultats plus précis avec les produits disponibles actuellement sur le marché. Compte tenu de la sévérité du test (variations rapides et de forte amplitude), il a été conclu que ces capteurs devraient permettre de connaître l'évolution de l'humidité relative du milieu dans lequel ils sont plongés avec une précision au moins égale à celle annoncée par le constructeur.

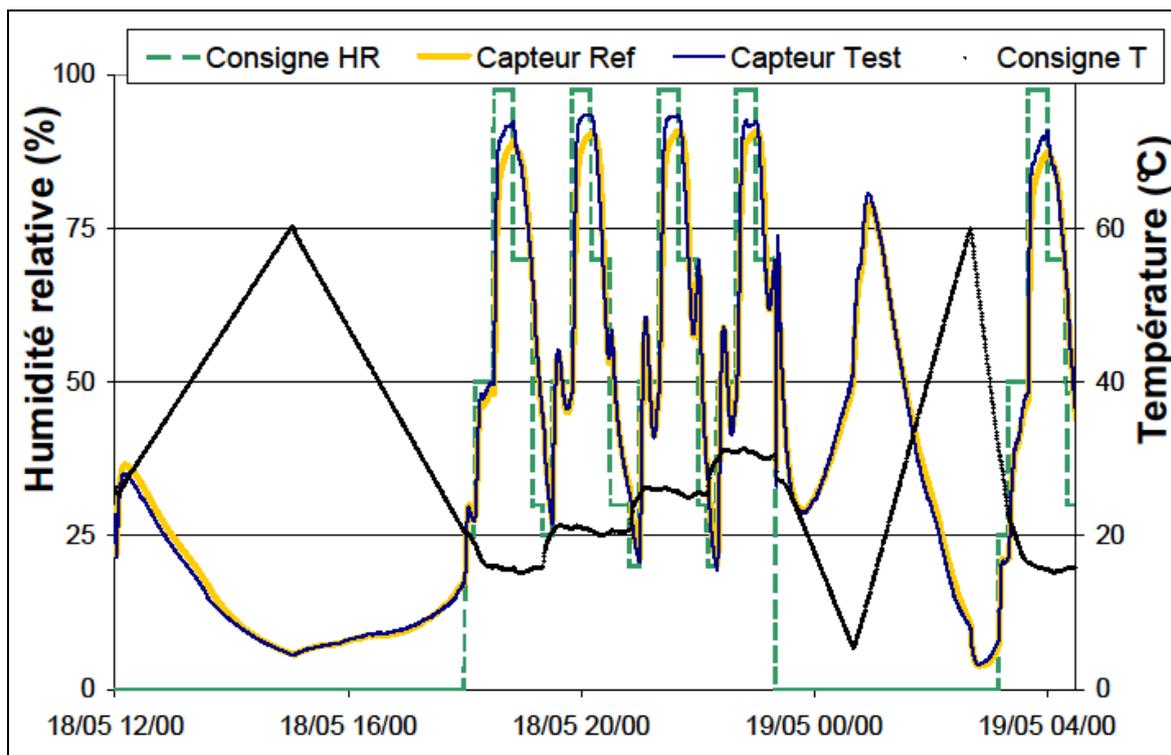


Figure 71 : Comparaison de la mesure d'humidité relative effectuée par le thermo-hygromètre prélevé sur la cellule (Capteur Test) avec une sonde de référence (Capteur Ref) pour différentes consignes en humidité relative et en température.

Annexe 2 : Comparaison des mesures de vent faites aux deux stations météo

La mesure du vent fait partie de la définition des conditions extérieures et intervient dans différentes expériences : calcul des échanges avec les surfaces des bâtiments, calcul des débits de renouvellement d'air par infiltration, etc. Deux systèmes sont actuellement mis en place et mesurent la vitesse et la direction du vent en continu. Le premier, le plus ancien, est installé sur la station météo du CSTB. Le second système est placé sur un mât au dessus de la cellule d'A. Brun.

Le capteur de la station météo du CSTB est composé d'une girouette et d'un anémomètre (marque : Young) montés au dessus du toit du bâtiment de la station météo, à 3,50 m du sol. Le seuil de détection de l'anémomètre est de $1,1 \text{ m.s}^{-1}$ mais la girouette n'est sensible qu'à des vents d'une vitesse supérieure à $1,3 \text{ m.s}^{-1}$. La précision des mesures est de $\pm 0,5 \text{ m.s}^{-1}$ et $\pm 5^\circ$. Le capteur monté sur le mât au dessus de la cellule Brun (voir Brun 11) est d'une technologie différente : il utilise trois émetteurs / récepteurs à ultrasons qui permettent une mesure plus précise de la vitesse et de la direction du vent. En effet, la précision annoncée par le constructeur est de $\pm 0,3 \text{ m.s}^{-1}$ et $\pm 2^\circ$. Par ailleurs, ce capteur est situé à 8 m du sol et dans un environnement plus dégagé que celui de la station météo comme le montre la photo de la Figure 72.

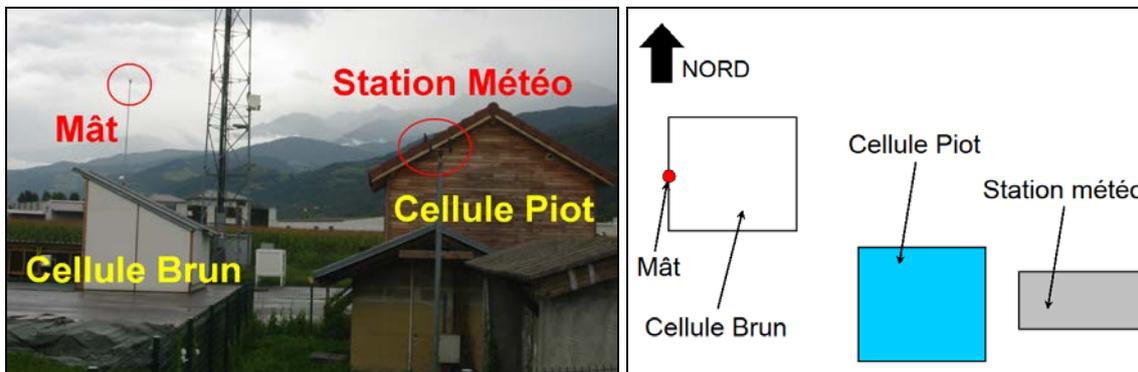


Figure 72 : Vue du site, orientation Est et positionnement des deux capteurs de mesure du vent en rouge (gauche) et schéma de la disposition des cellules (droite)

Les données sont disponibles avec des pas de temps de 10 min (moyenne des mesures réalisées toutes les minutes) pour la station météo et de 1 min pour le mât. Les mesures sont comparées sur deux périodes, une journée et un mois (respectivement Figure 73 et Figure 74).

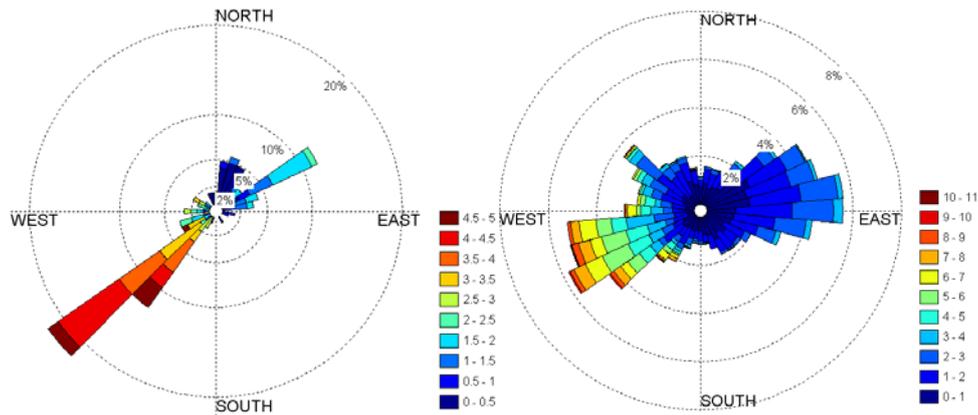


Figure 73 : Mesures du vent du 14/07 au 15/07/2011 à la station météo (gauche, échelle de 0 à 5,5 m.s⁻¹) et sur le mât (droite, échelle de 0 à 11 m.s⁻¹)

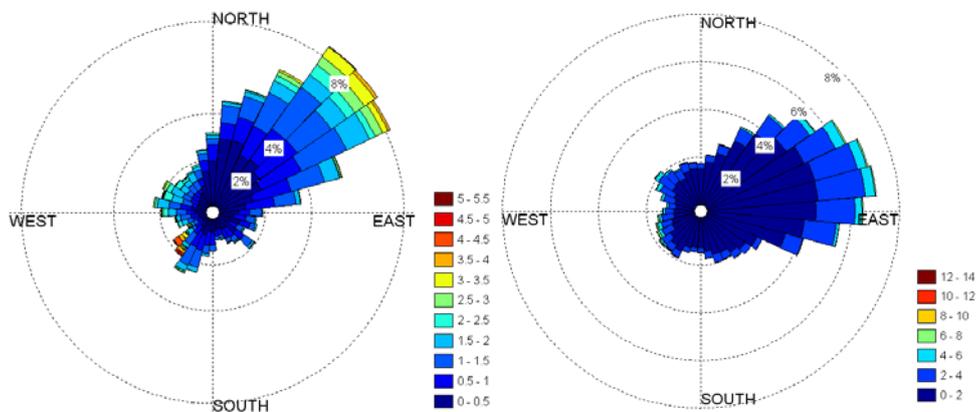


Figure 74 : Mesures du vent du 14/07 au 15/08/2011 à la station météo (gauche, échelle de 0 à 5,5 m.s⁻¹) et sur le mât (droite, échelle de 0 à 14 m.s⁻¹)

La comparaison des roses des vents fait apparaître les points suivants :

- La série de mesure sur une journée illustre l'impact de l'opération de moyenne : la rose des vents de la station météo ne rend pas compte de la disparité des directions sur une journée ;
- A l'échelle du mois, les mesures sur le mât indiquent une direction privilégiée Est / Ouest alors que celles faites à la station indiquent une direction Nord-est / Sud-ouest. Bien que l'opération de moyenne puisse introduire des erreurs, la position de la cellule d'A. Piot, à l'Est de la station météo, semble être dans le sillage de la cellule ce qui perturbe la mesure ;
- Il apparaît également un écart au niveau des vitesses mesurées, celles sur le mât étant généralement plus élevées. Cet écart provient en partie de la différence d'altitude entre les deux points de mesure (évolution de la vitesse en fonction de l'altitude en suivant une loi en puissance). Cependant, l'analyse des mesures n'a pas permis de vérifier une telle loi.

La station météo du CSTB se situe donc dans le sillage de la cellule test, ce qui rend les mesures de vent faites à cette position inutilisables. De fait, seules les mesures réalisées sur le mât seront utilisées par la suite.

Annexe 3 : Simulation des transferts couplés dans les parois verticales, séquence 5

La séquence étudiée ici s'est déroulée du 16/11/10 au 06/12/10 et comporte une phase de production de vapeur qui a duré plus de 96h, entre le 22/11 et le 27/11. La composition des parois verticales correspond à la configuration 5 (ouate de cellulose + plaques de plâtre). Deux générateurs ont été utilisés simultanément et remplis à plusieurs reprises. Il est apparu plusieurs périodes durant lesquelles les réservoirs étaient vides, ce qui signifie que la production de vapeur a été interrompue à plusieurs reprises. Le débit n'est pas constant et la quantité de vapeur produite est estimée à $18 \text{ kg}_{\text{vap}}$. Les évolutions en température et en humidité absolue sont présentées dans les graphiques de la Figure 75 et de la Figure 76 respectivement.

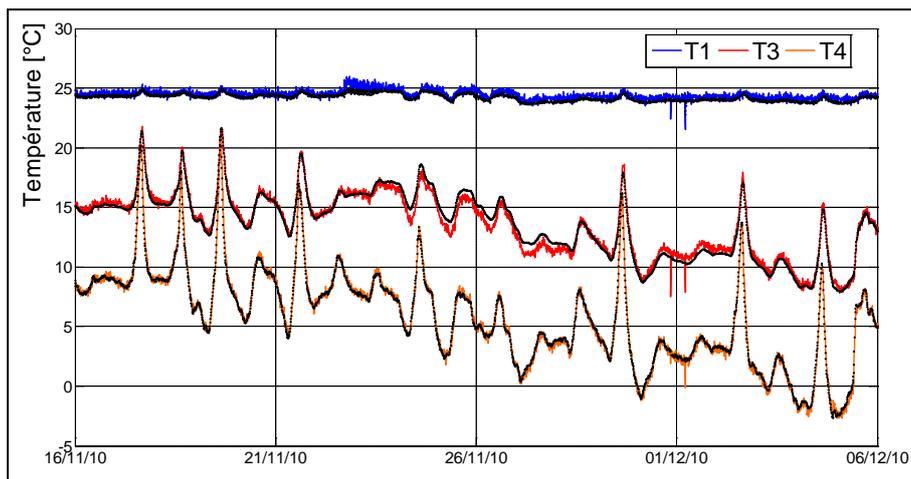


Figure 75 : Comparaison de la température mesurée (traits pleins colorés) et simulée (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4.

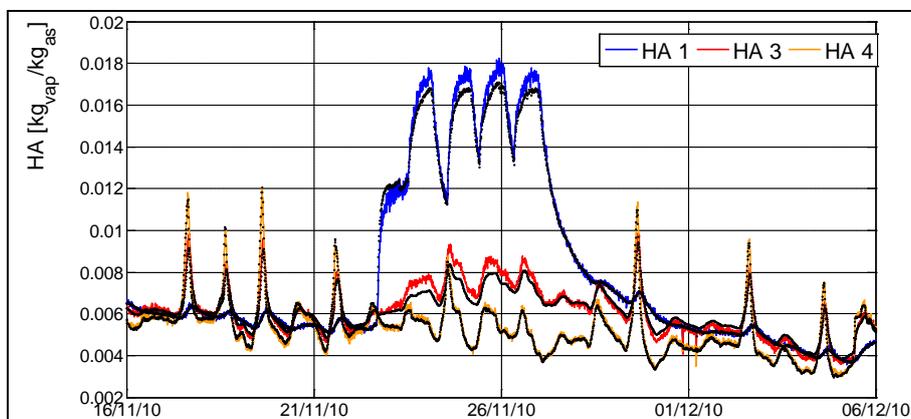


Figure 76 : Comparaison de l'humidité absolue de l'air mesurée (traits pleins colorés) et simulée (points noirs) aux positions des capteurs 1, 3 et 4.

Les écarts sont donnés dans le Tableau 30 et ont été décomposés en trois phases, avant la génération de vapeur (du 20/11 au 22/11) pendant (du 23/11 au 27/11) et plusieurs jours après (du 04/12 au 06/12).

Tableau 30 : Ecart moyen en température et en humidité aux différentes positions des capteurs dans la paroi Ouest pour la séquence avec la ouate de cellulose

| Capteur | Avant génération | | Pendant génération | | Pendant génération | |
|---------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|---|---------------------------------------|---|
| | $ \Delta T _{\text{Moy}} (\text{°C})$ | $ \Delta HA _{\text{Moy}} (\text{g.kg}_{\text{AS}}^{-1})$ | $ \Delta T _{\text{Moy}} (\text{°C})$ | $ \Delta HA _{\text{Moy}} (\text{g.kg}_{\text{AS}}^{-1})$ | $ \Delta T _{\text{Moy}} (\text{°C})$ | $ \Delta HA _{\text{Moy}} (\text{g.kg}_{\text{AS}}^{-1})$ |
| HRT1 | 0,3 | 0,1 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | 0,1 |
| HRT3 | 0,2 | 0,1 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,2 |
| HRT4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,3 | 0,2 |
| HRT5 | 0,0 | 0,3 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,3 |

La mesure du capteur HRT2 est défaillante sur cette séquence

Les performances du modèle en température et en humidité sont similaires et peuvent être résumées à l'aide des points suivants :

- Les écarts avant la génération de vapeur sont inférieurs ou égaux à $0,3\text{°C}$ et à $0,3 \text{ g.kg}_{\text{AS}}^{-1}$, ce qui est voisin des écarts obtenus avec la fibre de bois dans les mêmes conditions ;
- Lors de la phase de production de vapeur, l'humidité absolue au point 1 est sous-estimée de $0,6 \text{ g.kg}_{\text{AS}}^{-1}$ en moyenne. Au milieu de l'isolant (point 3), un écart constant de $0,5 \text{ g.kg}_{\text{AS}}^{-1}$ apparaît sur toute la durée de la simulation. A l'interface entre l'isolant et le parement extérieur (point 4), les écarts restent du même ordre de grandeur qu'avant le début de la production de vapeur. En ce qui concerne les températures, les écarts sont plus importants (jusqu'à $0,6\text{°C}$ au point 3), mais restent inférieurs à la précision des mesures ($0,8\text{°C}$) ;
- Après la phase de génération de vapeur, le modèle permet de retrouver les valeurs mesurées avec une précision similaire à celle obtenue avant la génération de vapeur.

En définitive, les écarts en humidité apparaissent être légèrement plus importants lors de la phase de génération de vapeur, c'est-à-dire lorsque le phénomène de sorption est provoqué. Bien que la génération de vapeur ait duré près de 96 heures, les écarts sont restés stables durant toute cette période et le modèle a permis de retrouver les valeurs mesurées après la génération de vapeur avec une précision identique à celle obtenue avant la génération de vapeur. La modélisation du phénomène de sorption devrait donc pouvoir être améliorée. Cependant, les écarts observés ici restent faibles et le modèle ne dérive pas. Ce comportement est le même que celui observé sur les autres séquences expérimentales et décrit dans la partie principale du manuscrit.

Annexe 4 : Mesures par thermographie IR

La mesure de température porte sur une zone rectangulaire définie pour correspondre à une lame du bardage. La lecture de l'écart type permet de s'assurer que la zone n'inclut pas de points « parasites » tels que ceux correspondant à l'espace entre deux lames. Ainsi, les zones de mesures obtenues comportent environ 128 points de mesure pour un écart type moyen de 0,2°C. Une démarche similaire est appliquée au niveau des feuilles d'aluminium et aboutit à une précision identique.

Afin de vérifier la qualité de l'estimation de l'émissivité avec la méthode de comparaison avec le scotch noir, l'émissivité a été mesurée directement en utilisant un pyromètre. Six mesures ont ainsi été effectuées sur chacune des dix premières lames du bardage de la face Est. Les résultats sont présentés et comparés avec ceux obtenus par la méthode de la comparaison dans le Tableau 31.

Tableau 31 : Mesures d'émissivité des 10 premières lames du bardage par la méthode de la comparaison et par mesure directe

| Méthode Lame | Par comparaison | | Mesure directe | |
|-----------------|---------------------------|----------|---------------------------|----------|
| | ϵ_{Moyen} | σ | ϵ_{Moyen} | σ |
| 1 | 0,87 | 0,01 | 0,87 | |
| 2 | 0,87 | 0,01 | 0,88 | |
| 3 | 0,87 | 0,01 | 0,91 | |
| 4 | 0,86 | 0,02 | 0,87 | |
| 5 | 0,86 | 0,02 | 0,88 | |
| 6 | 0,87 | 0,01 | 0,88 | 0,005 |
| 7 | 0,85 | 0,01 | 0,86 | |
| 8 | 0,88 | 0,03 | 0,89 | |
| 9 | 0,86 | 0,02 | 0,87 | |
| 10 | 0,88 | 0,01 | 0,88 | |

Hormis quelques points particuliers, les résultats obtenus avec les deux méthodes correspondent si l'on tient compte des écarts types. De manière générale, il apparaît que les émissivités ont été légèrement sous estimées. A noter que l'erreur de mesure semble aléatoire : il n'existe pas de lien entre la hauteur des lames et la précision de la mesure (écart maximal pour la lame 3, écart minimal pour la lame 10). Il semble donc correct de considérer que la précision sur la valeur de l'émissivité est de $\pm 0,02$. Pour déterminer l'incertitude sur la mesure de température, l'équation Eq. 27 est réécrite sous la forme de Eq. 59 afin d'exprimer la température T_{SE} en fonction de l'émissivité d'une lame ϵ_{Lame} , de la température de l'environnement T_{Env} et de la température du rayonnement mesuré par la caméra T_{Tot} .

Annexe 4 : Mesures par thermographie IR

Eq. 59

$$T_{SE} = \varepsilon_{Lame}^{-1/4} \cdot \left((1 - \varepsilon_{Lame}) \cdot T_{Env}^4 + T_{Tot}^4 \right)^{1/4}$$

$$T_{Tot}^4 = \frac{\varphi_{R,SE}}{\sigma_0}$$

Le calcul de l'incertitude sur T_{SE} se fait en utilisant l'approche classique décrite dans Eq. 60.

Eq. 60

$$u(T_{SE}) = \sqrt{\sum_i \left(\left(\frac{\partial T_{SE}}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u(x_i)^2 \right)}$$

Le détail des dérivées partielles est donné ci-dessous dans Eq. 61.

Eq. 61

$$\frac{\partial T_{SE}}{\partial T_{Env}} = \varepsilon_{Lame}^{-1/4} \cdot \frac{1}{4} \cdot 4 \cdot (1 - \varepsilon_{Lame}) \cdot T_{Env}^3 \cdot \left((1 - \varepsilon_{Lame}) \cdot T_{Env}^4 + T_{Tot}^4 \right)^{-3/4}$$

$$\frac{\partial T_{SE}}{\partial T_{Tot}} = \varepsilon_{Lame}^{-1/4} \cdot \frac{1}{4} \cdot 4 \cdot T_{Tot}^3 \cdot \left((1 - \varepsilon_{Lame}) \cdot T_{Env}^4 + T_{Tot}^4 \right)^{-3/4}$$

$$\frac{\partial T_{SE}}{\partial \varepsilon_{Lame}} = -\frac{1}{4} \cdot \varepsilon_{Lame}^{-5/4} \cdot \left((1 - \varepsilon_{Lame}) \cdot T_{Env}^4 + T_{Global}^4 \right)^{1/4}$$

$$+ \varepsilon_{Lame}^{-1/4} \cdot \frac{1}{4} \cdot (-T_{Env}^4) \cdot \left((1 - \varepsilon_{Lame}) \cdot T_{Env}^4 + T_{Tot}^4 \right)^{-3/4}$$

Les valeurs des incertitudes sur chacun des paramètres $u(x_i)$ sont prises égales aux écarts types. Les résultats des calculs sont présentés dans le Tableau 32 pour différents cas de figure.

Tableau 32 : Calcul de l'incertitude sur la mesure de température par thermographie IR pour différents cas de figure

| émissivité ε | T_{Env} °C | T_{Tot} °C | $u(T_{SE})$ °C |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------|
| 0,85 | 15 | 15 | 0,49 |
| | | 35 | 0,81 |
| | | 55 | 1,10 |
| | | 25 | 0,50 |
| | 25 | 35 | 0,67 |
| | | 55 | 0,98 |
| | | 35 | 0,52 |
| | | 35 | 0,69 |
| 0,90 | 15 | 15 | 0,32 |
| | | 35 | 0,65 |
| | | 55 | 0,94 |
| | | 25 | 0,33 |
| | 25 | 35 | 0,50 |
| | | 55 | 0,82 |
| | | 35 | 0,34 |
| | | 35 | 0,51 |
| | | 55 | 0,68 |

Annexe 4 : Mesures par thermographie IR

La valeur de l'incertitude varie selon les configurations rencontrées : elle est par exemple plus grande pour des lames de faible émissivité lorsque les températures mesurées sont élevées. De manière générale, il est correct de considérer que la précision des mesures par thermographie infrarouge est de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Deux séquences expérimentales ont été réalisées sur la face Est de la cellule et sont présentées ici. Les expériences se sont déroulées le 07/07/2010 et le 08/07/2010 entre 5h30 et 14h30 (heure légale). Les conditions extérieures sont semblables entre les deux expériences et présentent les caractéristiques suivantes :

- Echauffement progressif de l'air, de 7h à 17h, de 17 à 31°C le 7 juillet et de 19 à 35°C le 8 juillet ;
- Le ciel était clair, ce qui se traduit par un rayonnement diffus assez faible ($< 50 \text{ W.m}^{-2}$) et un rayonnement horizontal global important : jusqu'à 800 W.m^{-2} à 14h00 ;
- Le rayonnement direct sur la paroi Est est très important dès le lever du soleil : le maximum est de 600 W.m^{-2} à 9h30. La paroi n'est plus exposée à partir de 13h40.

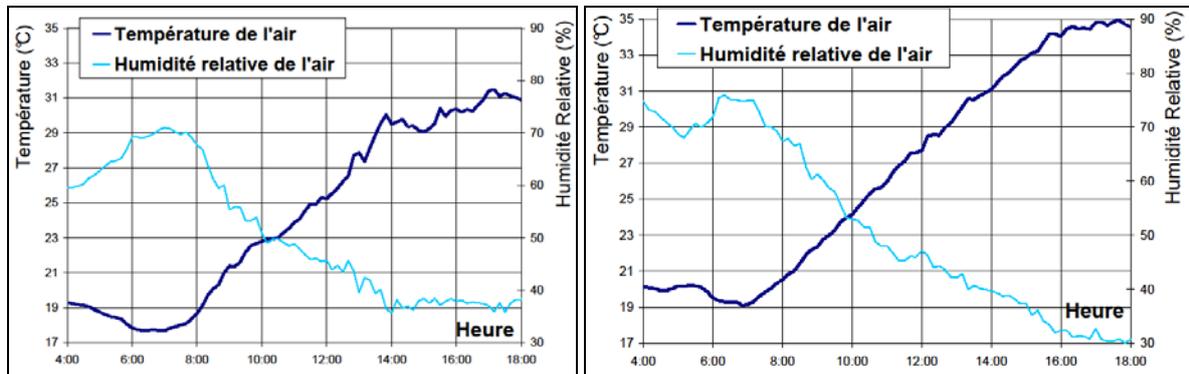


Figure 77 : Evolution de la température (échelle gauche) et de l'humidité relative (échelle droite) au cours des expériences du 07/08 (graphique gauche) et du 08/07 (graphique droite)

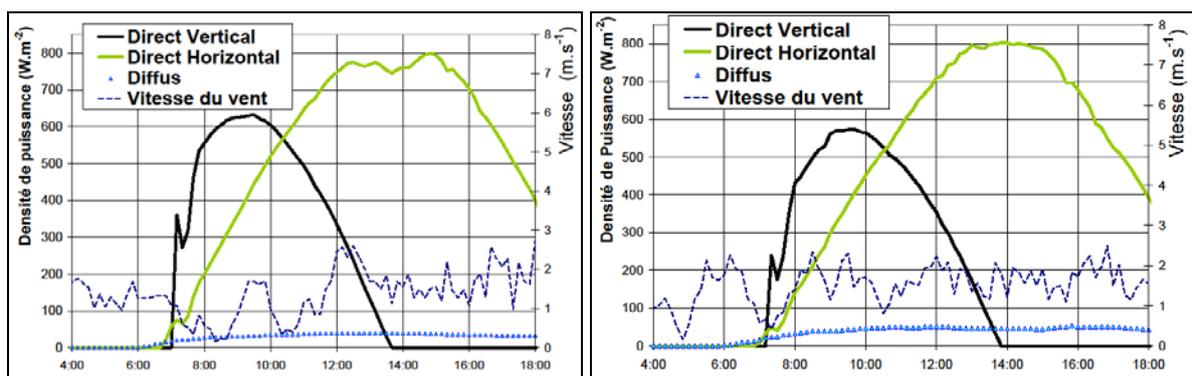


Figure 78 : Evolution des densités de puissance du rayonnement solaire (échelle gauche) et de la vitesse du vent (échelle droite) lors des expériences du 07/07 (graphique gauche) et du 08/07 (graphique droite)

L'évolution de la température de quelques lames et les profils de température à quelques instants sont représentés dans les graphiques de la Figure 79 et de la Figure 80.

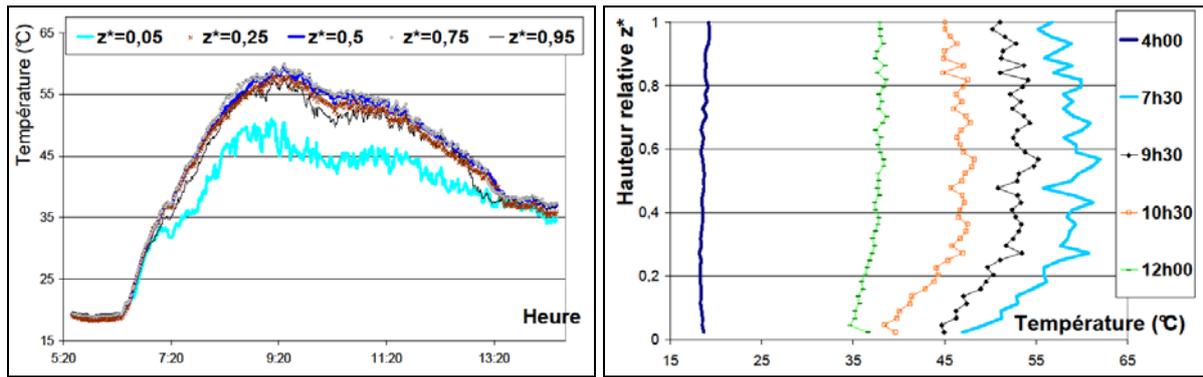


Figure 79 : Mesure de la température de quelques lames du bardage (gauche) et profils de température (droite), expérience du 07/08

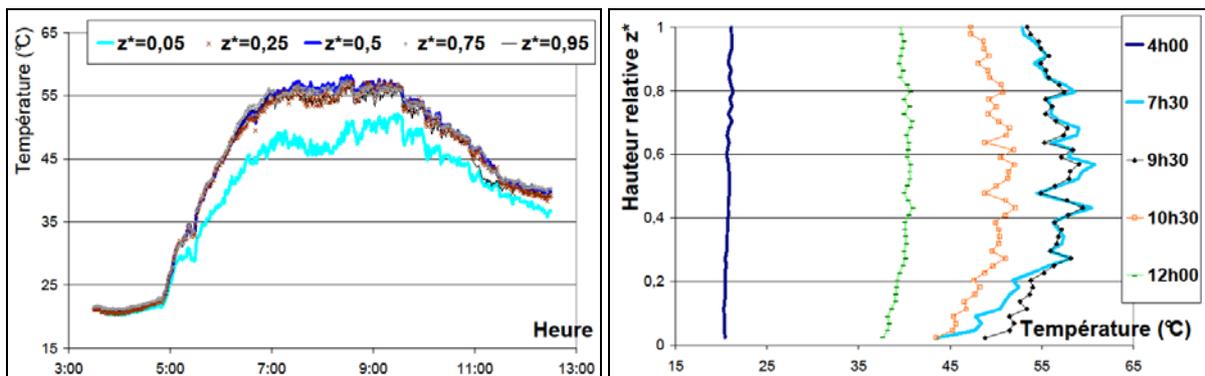


Figure 80 : Mesure de la température de quelques lames du bardage (gauche) et profils de température (droite), expérience du 08/07

Plusieurs remarques peuvent être effectuées sur ces mesures :

- En l'absence de rayonnement solaire direct sur la paroi, la température du bardage est homogène sur toute la hauteur et voisine de celle de l'air ;
- De 6h20 à 9h30, la paroi s'échauffe rapidement et à des températures très au dessus de celle de l'air : + 35°C en moyenne à 9h30 ;
- L'échauffement n'est pas uniforme : la zone la plus chaude se situe entre le milieu et les deux tiers du bardage ;
- Les premières lames sont à une température nettement inférieure de la moyenne, de l'ordre de 15°C. Le haut du bardage par contre est à une température moyenne.
- Lorsque les apports solaires diminuent, les lames refroidissent progressivement et leur température s'homogénéise.

La forme bombée du profil en température pourrait indiquer que la convection naturelle joue un rôle prépondérant mais non homogène. Il est cependant difficile de discerner les effets de la convection naturelle d'une erreur de mesure ou d'une éventuelle dispersion de l'absorptivité solaire des lames.

Annexe 5 : Mesures dans la lame d'air

Deux contraintes majeures ont limité l'extension de l'instrumentation :

- Très peu de voies sont disponibles sur les centrales d'acquisition situées à l'intérieur de la cellule ;
- Connecter de nouveaux capteurs à ces centrales impose de démonter les parois isolées pour permettre le passage des câbles.

Aussi, il a été décidé d'utiliser une nouvelle centrale (Agilent 34970A, munie d'un tiroir multiplexeur 20 voies 34901), déportée dans les combles. Elle comporte une mémoire interne qui lui permet de stocker les mesures sans être connectée à un autre système (ordinateur, réseau ...). Cependant, les données ne peuvent être collectées automatiquement comme c'est le cas pour les centrales mises en place dans la cellule. Un opérateur doit donc intervenir pour récupérer les données, sans quoi les plus anciennes sont écrasées (~ 40h pour une acquisition toutes les minutes sur 20 voies). Il n'est donc pas envisageable de réaliser des mesures sur du long terme.

Le bardage de la face Est a été démonté jusqu'à hauteur des combles pour permettre l'installation de 16 thermocouples. Ces derniers sont installés par paires, un premier sur le pare-pluie et un second de l'autre côté de la lame d'air, sur une lame du bardage. Ils se situent au milieu de la hauteur d'une lame et sont repérés à l'aide de la nomenclature proposée dans le Tableau 33.

Tableau 33 : Positionnement des thermocouples dans la lame d'air

| Nomenclature | #T1 | #T2 | #T3 | #T4 | #T5 | #T6 | #T7 | #T8 |
|---------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| Hauteur relative z* | 0,02 | 0,14 | 0,25 | 0,37 | 0,5 | 0,64 | 0,75 | 0,86 |

A noter que l'assemblage du bardage est tel qu'il est nécessaire de le démonter sur l'intégralité de la longueur, ce qui requiert la présence de deux opérateurs supplémentaires. C'est donc une opération relativement contraignante, et constitue un frein important si des modifications sont à apporter (capteur à recoller ou à déplacer). Il est apparu par la suite qu'un thermocouple s'est décollé du bardage (position #T7) et que la soudure du thermocouple collé sur la lame à la position #T4 a été abimée lors de la pose du bardage : ces deux points ne sont donc pas exploitables.

Les mesures de température effectuées par quelques uns de ces thermocouples ont été reportées dans le graphique de la Figure 81. Afin de donner une idée de l'impact du bardage, les mesures de température de la surface extérieure du bardage réalisées pour les mêmes hauteurs sont précisées dans le second graphique et les mêmes échelles sont utilisées.

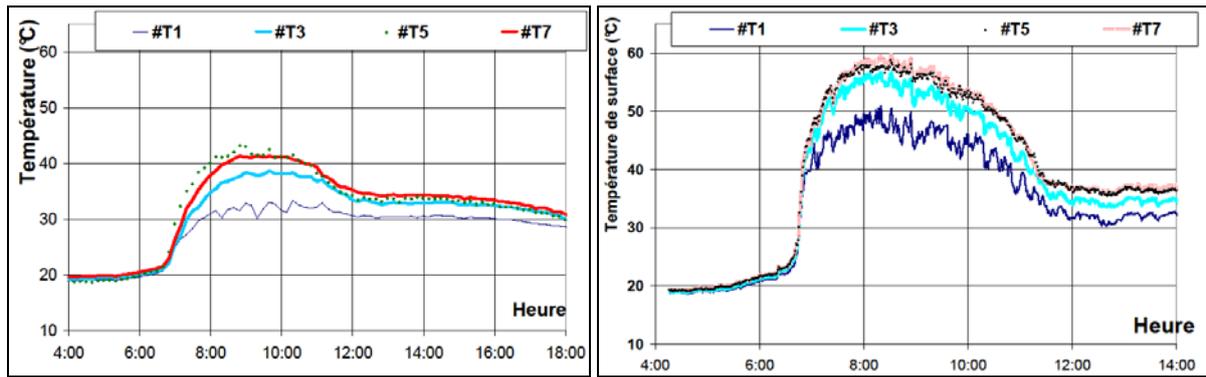


Figure 81 : Mesures de température à différentes hauteurs du pare-pluie le 16/08/2011 (gauche) et mesures par thermographie de la température de la surface extérieure aux mêmes altitudes et au même moment (droite)

Les évolutions sont comparables, mais l'amplitude de l'échauffement du pare-pluie sous l'effet du rayonnement solaire (température maximale : 45°C) est nettement moins importante que celle de la surface extérieure du bardage (maximum : 60°C).

L'hypothèse de transferts unidimensionnels est assez généralement rencontrée dans le domaine du bâtiment, en particulier lorsqu'il s'agit d'estimer les consommations énergétiques globales (Patania *et al.* 10). Les mesures de température du pare-pluie ont été utilisées afin de tester la validité de cette hypothèse pour le cas étudié ici. En particulier, la distribution en température du pare-pluie a été estimée pour trois périodes types de la journée :

- Pendant la nuit, de 22h à 5h ;
- Lorsque la paroi est susceptible de recevoir des apports solaires directs, de 06h à 11h ;
- Lorsque la paroi ne reçoit que des apports solaires diffus, de 12h à 18h.

Les distributions sont ensuite comparées à des intervalles de type $[T_{\text{Moy}} - \sigma ; T_{\text{Moy}} + \sigma]$, avec T_{Moy} la température moyenne du pare-pluie et σ une constante. Une distribution partielle est également définie afin de ne prendre en compte que la partie de la paroi qui correspond au parement intérieur (le plancher, le plafond et les combles sont exclus des calculs). Les résultats sont présentés dans le Tableau 34.

Tableau 34 : Pourcentage de la distribution incluse dans l'intervalle défini par T_{Moy} et σ

| σ | | $\pm 0,5$ (°C) | | ± 1 (°C) | |
|------------------|--------|----------------|-----------|--------------|-----------|
| | | Globale | Partielle | Globale | Partielle |
| Apports solaires | Direct | 17 % | 72 % | 35 % | 92 % |
| | Diffus | 51 % | 91 % | 83 % | 100 % |
| | Aucun | 74 % | 92 % | 95 % | 100 % |

Les valeurs les plus faibles (17 % avec $\sigma = 0,5^\circ\text{C}$) sont obtenues sur la distribution globale avec des apports solaires directs : cela correspond à une distribution très élargie et asymétrique. Dans une telle configuration, une température moyenne est peu représentative de la température du pare-pluie.

Cependant, les distributions partielles présentent des résultats nettement meilleurs, ce qui signifie que la température du pare-pluie est nettement plus homogène en ne considérant que la hauteur du parement intérieur : $\pm 1^\circ\text{C}$ à 92 % pour des conditions d'ensoleillement direct, $\pm 0,5^\circ\text{C}$ sinon. D'une certaine façon, les effets bidimensionnels sont plus fortement marqués au niveau des extrémités du pare-pluie, et une approche unidimensionnelle serait correcte si l'étude se limitait au cas de la paroi intérieure. Cette limite est peu contraignante car les hauteurs extrêmes correspondent aux ponts thermiques du bâtiment, qui sont généralement traités à part de la partie courante.

Par ailleurs, la préparation de la campagne expérimentale sur le bardage fut également l'occasion de proposer une description plus fine de la géométrie de la lame d'air. L'espacement entre les lames du bardage a été mesuré et il est apparu qu'à quelques exceptions près, l'espacement entre les lames du bardage est relativement homogène : 70 % des espacements sont compris entre 0,008 et 0,01 m.

Lors du percement des orifices permettant l'insertion des thermo-anémomètres dans la lame d'air, il est apparu que des éléments de supports étaient vissés à l'arrière du bardage. Ces éléments sont d'une épaisseur voisine de celle de la lame d'air et leur position varie fortement selon la hauteur. Leur position a été repérée et est représentée dans le graphique de la Figure 82.

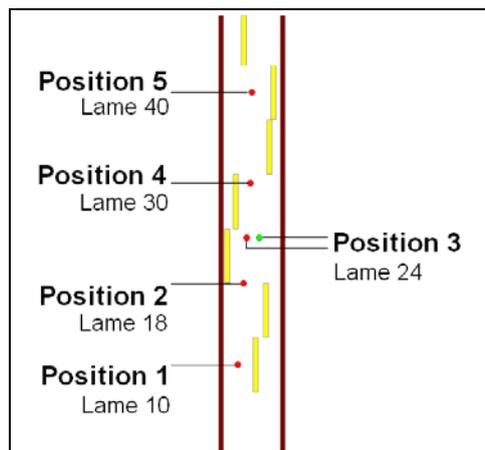


Figure 82 : Schéma des éléments de support du bardage (jaune) et position des orifices (sonde mobile en rouge et sonde fixe en vert) pour la mesure de la vitesse d'air (échelle respectée)

Les orifices ont donc été positionnés de manière à obtenir un compromis entre la distance entre le point de mesure et les obstacles présents dans la lame d'air ainsi que ceux présents en amont et en aval, tout en cherchant à garder une certaine continuité. Pour éviter que les orifices pratiqués sur le bardage ne perturbent l'écoulement de l'air dans la lame d'air, les orifices non-utilisés ont été obstrués à l'aide de bouchons de liège.

Les anémomètres sont composés d'un corps rigide terminé par l'élément sensible qui est encapsulé afin de pouvoir résister aux chocs. Des brides sont fournies (Figure 83) afin de permettre un montage sur gaines et un câble de 5 m relie la sonde au transmetteur, installé dans les combles et connecté à la centrale. Ces transmetteurs permettent d'intégrer les valeurs sur 10 s, limitant ainsi

l'influence de phénomènes rapides sur la mesure. Enfin, la profondeur d'insertion des sondes est telle que l'élément sensible est positionné au milieu de la lame d'air.

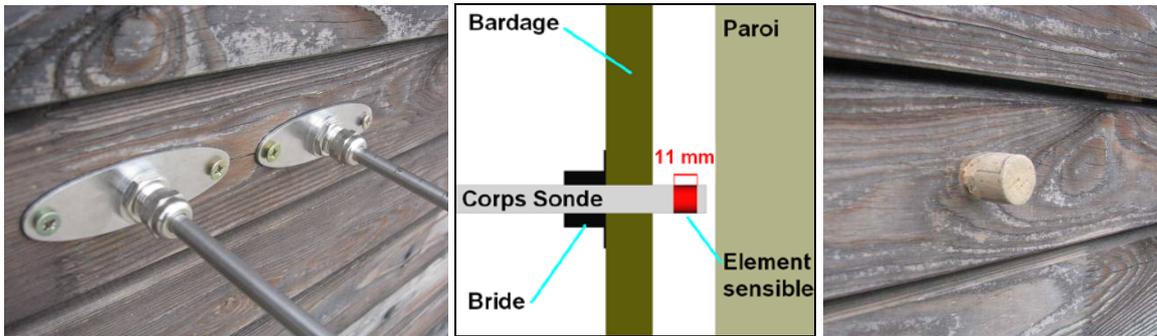


Figure 83 : Sondes de vitesse montées sur la lame 24 avec leur bride de fixation (gauche), schéma du montage de la sonde (centre), bouchon de liège obturant un orifice (droite)

Une séquence expérimentale, non présentée dans le corps du mémoire, a eu lieu alors que les deux sondes étaient positionnées à la hauteur de référence dans la lame d'air (Position 3 dans la Figure 82). Les mesures de vitesse d'air et de température des deux sondes sont portées dans les graphiques de la Figure 84 afin d'estimer l'influence des obstacles dans la lame d'air sur la mesure.

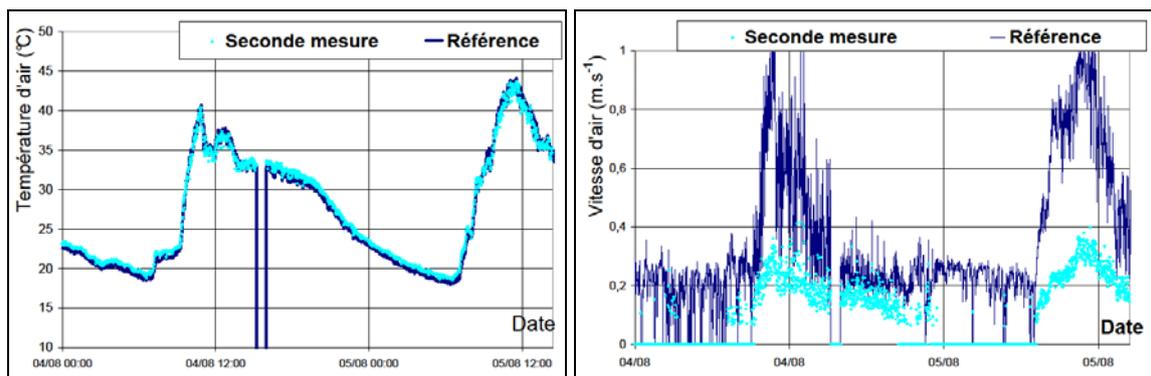


Figure 84 : Comparaison des températures (gauche) et vitesse d'air (droite) mesurées par les deux anémomètres

Les mesures de température des deux sondes sont voisines à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ en moyenne, ce qui correspond à la précision annoncée par le constructeur. En ce qui concerne les mesures de vitesse cependant, d'importants écarts apparaissent, en particulier lorsque le bardage est soumis au rayonnement direct du soleil : la sonde de référence enregistre un pic de vitesse qui atteint $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ tandis que la seconde, placée juste à côté, ne mesure pas de vitesse supérieure à $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Il se trouve que la seconde sonde est positionnée à proximité d'un obstacle dans la lame d'air. Il est donc possible que la vitesse verticale de la lame d'air ne soit pas uniforme sur toute la largeur, c'est-à-dire que l'écoulement soit tridimensionnel.

Annexe 6 : Température de l'environnement

A l'échelle du bâtiment, il est d'usage de considérer que la température de l'environnement est voisine de celle de l'air. Toutefois, l'environnement à proximité de la cellule est essentiellement composé de bitume (sauf à proximité de la face Ouest où il y a majoritairement de l'herbe). En présence d'apports solaires importants, le bitume est susceptible de s'échauffer ce qui peut avoir un impact non négligeable sur les transferts radiatifs. Pour tester cette hypothèse, des thermocouples ont été collés au sol à distance régulière de la paroi Est (0, 2 et 4 m) alors que la température de la paroi était estimée par thermographie comme le montre les photos de la Figure 85.

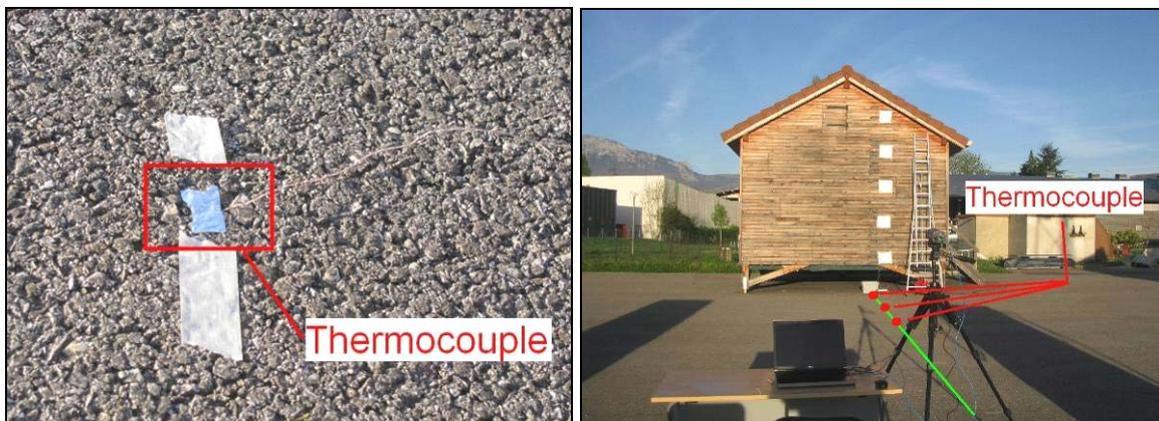


Figure 85 : Photo d'un thermocouple collé sur le bitume et positionnement des capteurs par rapport à la paroi (points rouges sur la photo de droite)

La mesure de température de surface par contact est délicate, particulièrement en extérieur, car les transferts sont multiples et non contrôlés. Afin de limiter les erreurs de mesure dues à l'ensoleillement, la soudure des thermocouples a été recouverte de scotch aluminium, très réfléchissant aux infrarouges. Bien que sommaire, cette expérience permet de donner une première estimation de l'évolution de la température de la surface au sol (T_{SS}) au cours de la journée comme le montre le graphique de la Figure 86.

En présence d'apports solaires la température du bitume est nettement supérieure à celle de l'air (jusqu'à $+20^{\circ}\text{C}$ à 11h30). Elle est également supérieure de 3°C avant l'aube, ce qui peut être imputé à l'inertie du bitume. Enfin, les capteurs se retrouvent à l'ombre de la cellule pendant l'après midi après une certaine heure (qui correspond à leur distance par rapport à la paroi). Ce phénomène est tout à fait visible pour les mesures relevées à 0 et 2 m de la paroi. A partir des mesures, une corrélation simple a été testée afin de représenter l'évolution de la température de la surface au sol (T_{SS}) sous l'effet du rayonnement solaire sur une surface horizontale ($\varphi_{\text{Sol-Horizontal}}$) et en fonction de la température de l'air (T_{Ext}). L'expression est celle présentée dans Eq. 40.

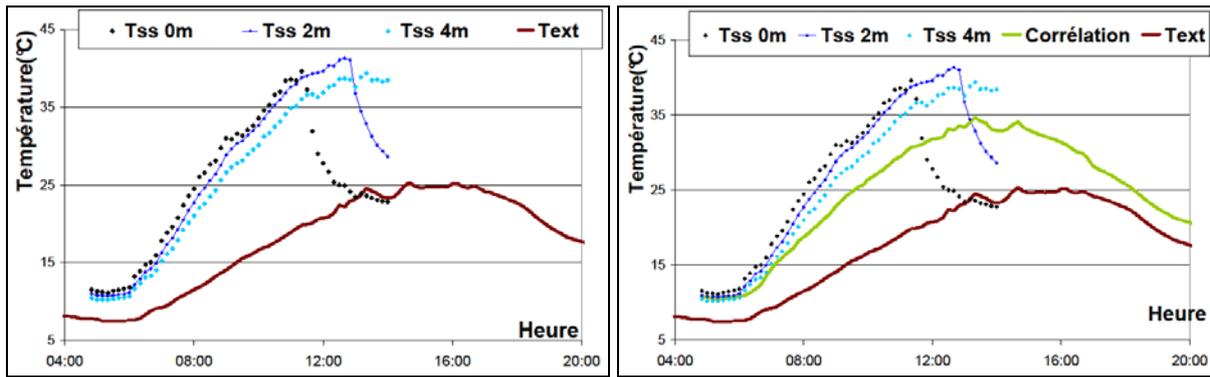


Figure 86 : Mesure de la température du bitume à différentes distances de la face Est pendant la journée du 07/04/2011 (gauche) et comparaison avec la corrélation (droite)

La température de l'environnement (T_{Env} , voir Eq. 27) est une combinaison de la température de rayonnement de la voûte céleste (T_{Ciel} , mesuré avec un pyr géomètre) et de la surface au sol (T_{SS} , estimé par Eq. 40). Elle peut donc être déterminée par le calcul. Elle peut être également estimée à l'aide de la thermographie Infrarouge : pour cela, il suffit de mesurer le rayonnement émis par une surface parfaitement réfléchissante, ici les feuilles d'aluminium fixées sur la paroi. Les mesures par thermographie sont présentées dans le graphique de gauche de la Figure 87. Une comparaison avec les résultats des calculs est présentée dans le graphique de droite.

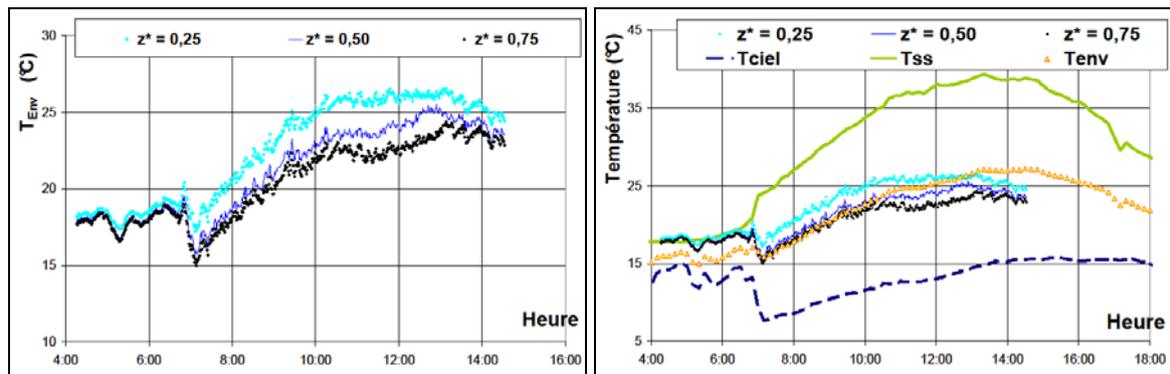


Figure 87 : Mesure de la température de l'environnement à différentes hauteurs relatives de la face Est le 16/08/2011 (gauche) et comparaison avec la température calculée à partir de la corrélation Eq. 40 (droite)

La corrélation permet de représenter l'évolution de la température du bitume en première approche. Des écarts un peu plus importants apparaissent à partir du milieu de journée à cause de l'ombre portée de la cellule sur le bitume (cas de la face Est uniquement). Cependant, l'erreur est nettement moins importante que si la température de l'environnement était prise égale à celle de l'air (résultats non présentés ici).

Annexe 7 : Confrontation du modèle de lame d'air avec les mesures

Les résultats de la simulation ont été comparés plus en détail avec les mesures réalisées lors de la campagne expérimentale (voir Chapitre IID). La température de surface du bardage ayant été mesurée par thermographie infrarouge pour quelques journées, elles sont comparées aux résultats de la simulation dans les graphiques de la Figure 88 et de la Figure 89. Seul le cas de l'altitude $z^* = 0,33$ est présenté et correspond à l'altitude à laquelle sont positionnés les capteurs dans la partie courante de la paroi.

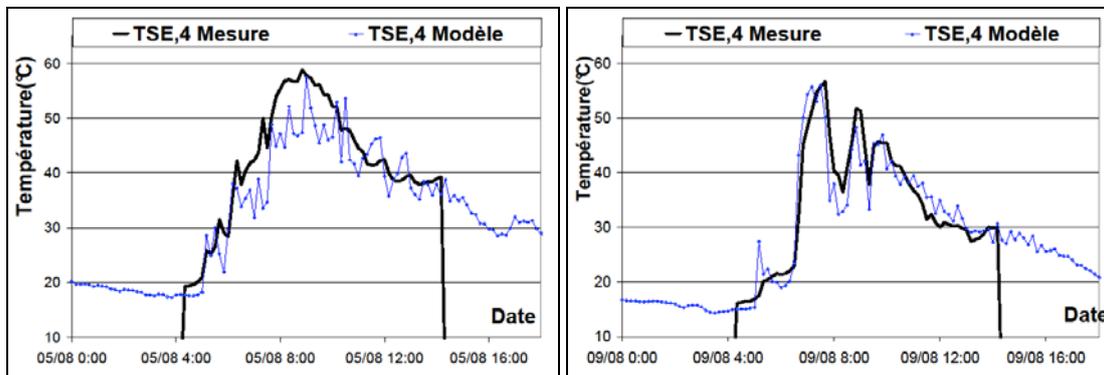


Figure 88 : Comparaison de la température de la surface extérieure du bardage de la face Est simulée avec les mesures réalisées par thermographie infrarouge à une même altitude ($z^* = 0,33$) le 05/08/2011 (gauche) et le 09/08/2011 (droite)

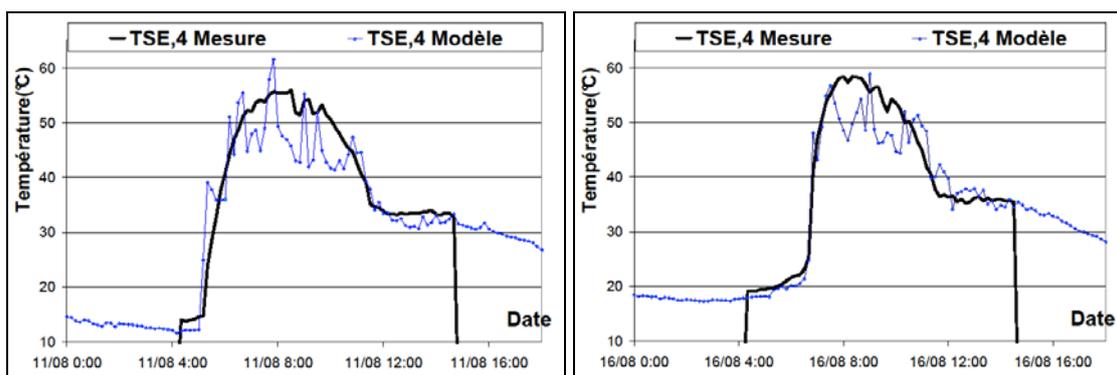


Figure 89 : Comparaison de la température de la surface extérieure du bardage de la face Est simulée avec les mesures réalisées par thermographie infrarouge à une même altitude ($z^* = 0,33$) le 11/08/2011 (gauche) et le 16/08/2011 (droite)

Il apparaît que le modèle permet de reproduire l'allure de l'évolution en température du bardage à cette hauteur ainsi que les ordres de grandeur des températures maximales obtenues en milieu de matinée. Les variations de température calculées sont plus rapides que les variations

mesurées, ce qui peut provenir de l'évaluation des conditions extérieures, notamment en ce qui concerne les apports solaires directs. De fait, les écarts peuvent être importants ponctuellement (8°C le 11/08 à 8h40) mais l'allure générale est respectée et les températures estimées en absence d'apports solaires directs sont voisines des mesures à $\pm 1,5^\circ\text{C}$, ce qui reste acceptable compte tenu de la précision de la mesure.

La même démarche est appliquée aux mesures de vitesse au niveau de la hauteur de l'axe neutre ($z^* = 0,55$). Cette position a été préférée à la position des capteurs dans la paroi courante car le nombre de mesures disponibles est plus important (un capteur a effectué une mesure en permanence à cette position) et car la corrélation sur la vitesse de la lame d'air dépend fortement du calcul de la vitesse à cette position précise. Les résultats sont présentés dans les graphiques de la Figure 90 et de la Figure 91.

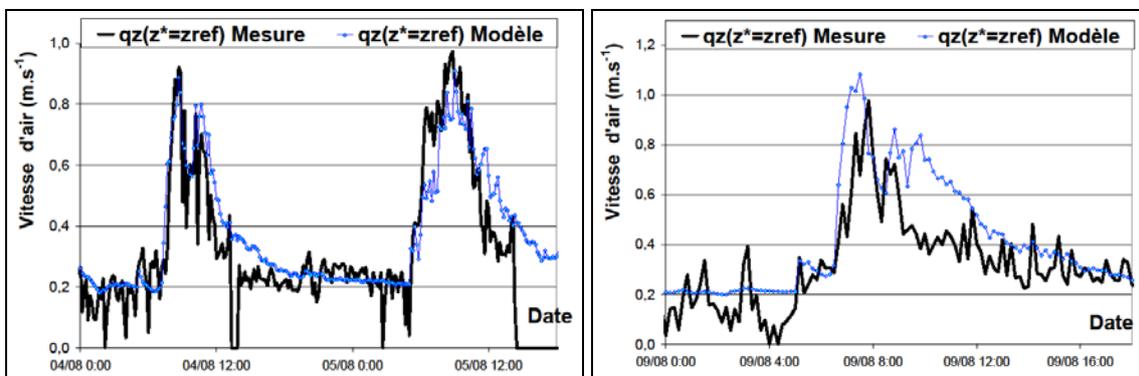


Figure 90 : Comparaison de la vitesse simulée de la lame d'air de la face Est au niveau de l'axe neutre avec les mesures réalisées par un thermo-anémomètre à une même altitude ($z^* = 0,55$) du 04/08 au 05/08 (gauche) et le 09/08/2011 (droite)

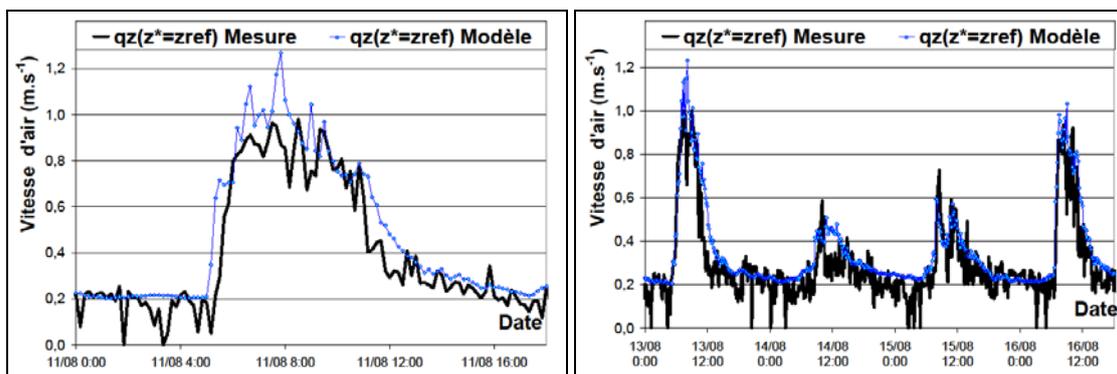


Figure 91 : Comparaison de la vitesse simulée de la lame d'air de la face Est au niveau de l'axe neutre avec les mesures réalisées par un thermo-anémomètre à une même altitude ($z^* = 0,55$) le 11/08 (gauche) et du 13/08 au 16/08 (droite)

L'évolution de la vitesse de la lame d'air et les ordres de grandeur des mesures sont correctement représentés par le modèle. De la même façon que pour la température de surface du bardage, des écarts plus importants peuvent apparaître ponctuellement (surestimation de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ le 11/08 à 8h40). Seul le cas de l'expérience du 09/08 est un peu différent : le pic de vitesse en matinée semble déphasé de 40 minutes tandis que la vitesse est surestimée de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ l'après-midi.

Annexe 8 : Validation de la méthode de mesure par gaz traceur

Plusieurs paramètres ont été identifiés comme étant de possibles sources de perturbations et ont été testés afin de valider la qualité des mesures de débits d'infiltrations.

Brassage de l'air intérieur

Plusieurs expériences ont été menées en faisant varier le nombre et la puissance des ventilateurs afin de déterminer s'ils produisaient un impact ou non sur le renouvellement d'air ou sur la mesure. Ici, deux expériences qui se sont déroulées pour des conditions de renouvellement d'air similaires (tirage thermique et vitesse du vent, voir Tableau 35) sont comparées. Les décroissances sont présentées dans le graphique de la Figure 92.

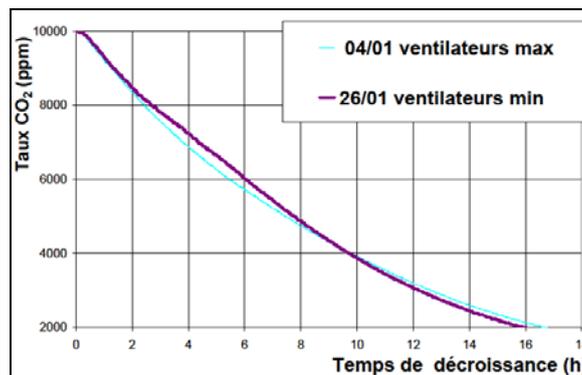


Figure 92 : Mesures de la décroissance le 04/01/2011 avec 4 ventilateurs activés à pleine puissance et le 26/01/2011 avec un seul ventilateur à vitesse minimale

Tableau 35: Mesures de la décroissance le 04/01/2011 et le 26/01/2011

| Date | Décroissance (h) | q_v ($m^3 \cdot h^{-1}$) | v_{10} ($m \cdot s^{-1}$) | $(T_{Int} - T_{Ext})$ (K) |
|------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 04/01/2011 | 15h54 | 5,6 | 1,7 | 26,4 |
| 26/01/2011 | 15h06 | 5,9 | 1,7 | 26,2 |

Il apparaît que réduire le nombre et la puissance des ventilateurs n'affecte pas l'allure de la décroissance, qui est régulière et peu bruitée. Bien que les conditions ne soient pas exactement identiques entre les deux expériences, les résultats sont suffisamment proches pour permettre d'affirmer que le brassage de l'air intérieur ne perturbe pas la mesure.

Influence de la vapeur d'eau sur la mesure

La vapeur d'eau agit comme un gaz parasite car elle absorbe une partie du rayonnement infrarouge utilisé par l'analyseur. Si une tare en début d'expérience permet d'en limiter l'influence, une variation de la quantité de vapeur d'eau au cours d'une mesure de renouvellement d'air peut toujours perturber la mesure. En effet, bien que les parements intérieurs soient composés de matériaux fortement hygroscopiques (plaque d'OSB au sol) et moyennement hygroscopiques (plaque de plâtre sur les autres parois), l'humidité de l'air intérieur varie au cours de l'année (voir Figure 93) et ses variations au cours d'une expérience peuvent dépasser 10 % lors d'une mesure de renouvellement d'air. Il a donc été décidé de tester l'influence de ce paramètre en effectuant une mesure, sans émission de CO₂, mais avec une forte génération de vapeur d'eau. Les résultats sont présentés dans la Figure 93.

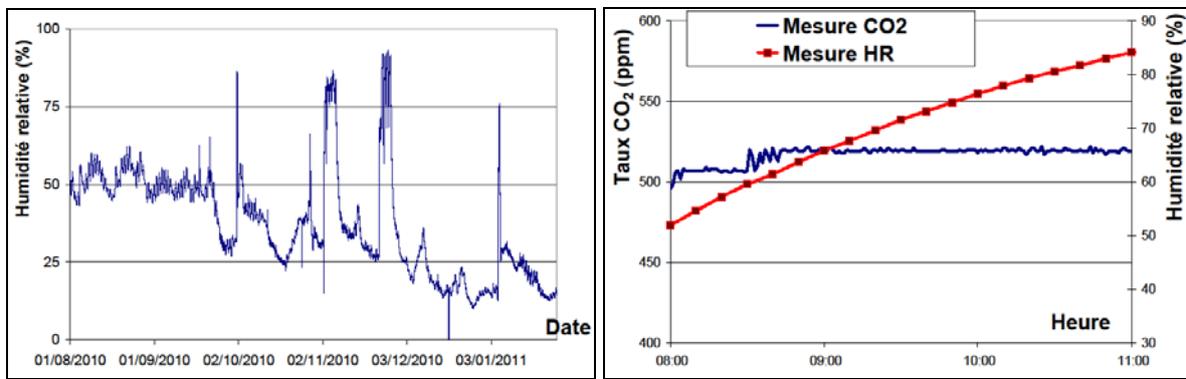


Figure 93 : Evolution de l'humidité relative de l'air intérieur (gauche) et évolution de la mesure de l'analyseur lors d'une montée en humidité relative (droite)

Lorsque l'humidité croît de 50 à 85 %, l'analyseur mesure une absorption supplémentaire de l'ordre de 10 ppm, ce qui est de nettement inférieur à la précision de l'appareil (± 100 ppm). Il n'est donc pas nécessaire d'appliquer une correction aux mesures en fonction de l'humidité relative de l'air intérieur.

Influence de la bouche d'aération

Deux expériences ont été menées successivement, l'une avec la bouche ouverte et l'autre avec la bouche fermée afin de vérifier la sensibilité du renouvellement d'air aux transferts qui s'effectuent à travers cet orifice. La cellule a été chauffée à 30°C afin que le tirage thermique prédomine sur les effets du vent. En effet, la différence de masse volumique entre les ambiances intérieure et extérieure est du même ordre de grandeur pour les deux expériences, ce qui produit des renouvellements d'air voisins pour les deux expériences comme le montrent les graphiques de la Figure 94.

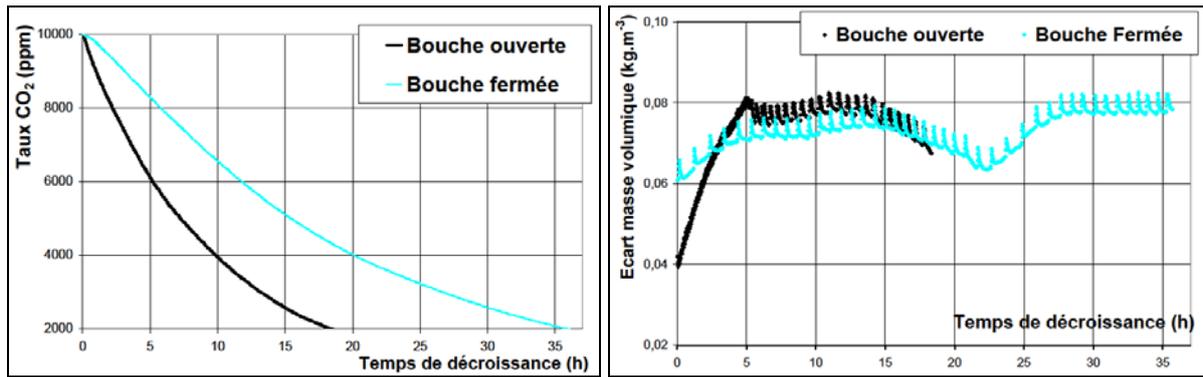


Figure 94 : Comparaison des décroissances mesurées avec la bouche d'aération ouverte et fermée (gauche) et des différences de masse volumique (droite)

Pour des conditions similaires, il apparaît que l'expérience avec la bouche fermée dure presque deux fois plus longtemps qu'avec la bouche ouverte. C'est-à-dire qu'un peu moins de la moitié des infiltrations ont lieu au niveau de la bouche de ventilation. Cette comparaison ne fait pas lieu de mesure exacte, car il faudrait tenir compte des variations de la concentration extérieure et des effets du vent pour être précis. Elle permet cependant de vérifier que la bouche d'aération est un point sensible sur lequel l'étude doit se focaliser.

Concentration extérieure de CO₂ (toutes expériences confondues)

Le second analyseur a été placé au niveau de la station météo afin de mesurer l'évolution du taux de CO₂ en extérieur. Les mesures sont présentées dans les graphiques de la Figure 95.

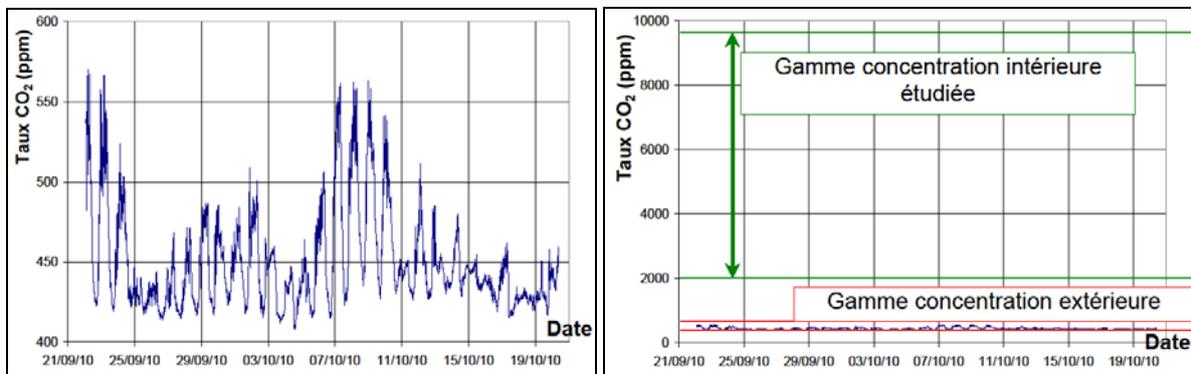


Figure 95 : Evolution de la concentration extérieure, du 22/09 au 01/10 avec différentes échelles (gauche [400 ; 600] ppm, droite [0 ; 10 000] ppm)

La concentration extérieure varie de 400 à 600 ppm, ce qui représente des variations de 50 %. Toutefois, ces variations sont à relativiser par rapport au niveau qui est utilisé pour réaliser les mesures de débit d'infiltration : l'utilisation de la gamme [2000 ; 10000] ppm pour étudier les débits d'infiltrations permet de se situer nettement au dessus des variations du niveau extérieur.

Débit extrait mécaniquement

La fiabilité du système de mesure a été testée en imposant un renouvellement d'air à l'aide du système de ventilation mécanique (VMC). Le gaz est émis dans la cellule en conditions normales, puis le système de ventilation est activé. Le débit extrait n'est pas mesuré précisément mais le constructeur (ALDES) précise que le débit nominal à pleine puissance est de $140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (soit $2,8 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$). En mesurant les temps de décroissance de 9500 à 2000 ppm et en résolvant l'équation Eq. 55, il est ainsi possible d'estimer le renouvellement d'air. Les résultats sont comparés dans le Tableau 36.

Tableau 36 : Mesure de débits extraits lorsque le système de ventilation est actif

| Date | Temps décroissance | Débit estimé ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) |
|---------|--------------------|---|
| 21-déc | 0h34 | 158 |
| 05-janv | 0h39 | 138 |

L'ordre de grandeur des débits estimés concorde avec les données du constructeur. Toutefois, il apparaît que ce type de mesure n'est pas reproductible pour des taux de renouvellement d'air important : la qualité de l'échantillonnage de l'air et la fréquence des mesures pourraient être remises en question.

Conclusion des tests

Le choix du CO_2 comme gaz traceur ne semble pas poser de problème particulier pour la mesure des débits de renouvellement d'air. Les variations de concentration atmosphérique peuvent en effet être compensées par l'utilisation de concentrations élevées en intérieur et il n'est apparu aucune interaction particulière entre le CO_2 et les matériaux de construction ou entre les autres gaz et l'analyseur.

Le choix de l'analyseur et du système de brassage de l'air s'est également avéré adéquat. Comme le renouvellement d'air est limité par rapport au volume de la cellule, les ventilateurs permettent d'obtenir un air de qualité homogène sans influencer significativement sur les transferts d'air.

Annexe 9 : Identification des paramètres du modèle aéraulique

Le modèle aéraulique a été testé en utilisant les valeurs de paramètres suivantes :

- Quatre couples de coefficients de terrain $\{a_T ; k_T\}$ (voir Tableau 21, Hagentoft 01) ;
- Quatre hauteurs équivalentes de tirage thermique $Z_{Th,Porte}$ $\{0,01 ; 0,5 ; 1 ; 2\}$ (m) ;
- Quatre hauteurs équivalentes de tirage thermique $Z_{Th,Mur}$ $\{0,01 ; 0,75 ; 1,5 ; 2,5\}$ (m).

Les résultats sont présentés en termes d'écart relatif par rapport au temps de décroissance et par rapport au débit horaire moyen dans le Tableau 37 et dans le Tableau 38. Les résultats sont moyennés sur l'ensemble de douze séquences afin de faciliter la lecture. Une représentation graphique de ces résultats est également donnée dans les graphiques de la Figure 96 sous forme d'histogrammes.

Tableau 37 : Ecart relatif mesure / simulation obtenus pour les coefficients de terrain de type « plat » et « obstacles » et pour toutes les hauteurs équivalentes de tirage thermique

| $\{a_T ; k_T\}$ | $Z_{Th,Porte}$ | $Z_{Th,Mur}$ | t_{Decr} | $q_{V,H}$ | $\{a_T ; k_T\}$ | $Z_{Th,Porte}$ | $Z_{Th,Mur}$ | t_{Decr} | $q_{V,H}$ |
|-----------------|----------------|--------------|------------|-----------|-----------------|----------------|--------------|------------|-----------|
| Plat | 0,01 | 0,01 | 46 % | 82 % | Obstacles | 0,01 | 0,01 | 44 % | 81 % |
| | | 0,75 | 44 % | 78 % | | | 0,75 | 43 % | 76 % |
| | | 1,5 | 40 % | 67 % | | | 1,5 | 38 % | 61 % |
| | | 2,5 | 36 % | 58 % | | | 2,5 | 33 % | 50 % |
| | 0,5 | 0,01 | 43 % | 73 % | | 0,5 | 0,01 | 42 % | 72 % |
| | | 0,75 | 41 % | 69 % | | | 0,75 | 41 % | 67 % |
| | | 1,5 | 36 % | 58 % | | | 1,5 | 35 % | 54 % |
| | | 2,5 | 31 % | 51 % | | | 2,5 | 29 % | 43 % |
| | 1 | 0,01 | 37 % | 58 % | | 1 | 0,01 | 35 % | 53 % |
| | | 0,75 | 35 % | 55 % | | | 0,75 | 34 % | 50 % |
| | | 1,5 | 28 % | 45 % | | | 1,5 | 25 % | 37 % |
| | | 2,5 | 24 % | 42 % | | | 2,5 | 20 % | 31 % |
| | 2 | 0,01 | 23 % | 36 % | | 2 | 0,01 | 16 % | 24 % |
| | | 0,75 | 21 % | 34 % | | | 0,75 | 15 % | 23 % |
| | | 1,5 | 19 % | 34 % | | | 1,5 | 18 % | 25 % |
| | | 2,5 | 28 % | 41 % | | | 2,5 | 40 % | 35 % |

Tableau 38 : Ecarts relatifs mesure / simulation obtenus pour les coefficients de terrain de type « urbain » et « centre ville » et pour toutes les hauteurs équivalentes de tirage thermique

| $\{a_T ; k_T\}$ | $Z_{Th,Porte}$ | $Z_{Th,Mur}$ | t_{Decr} | $q_{V,H}$ | $\{a_T ; k_T\}$ | $Z_{Th,Porte}$ | $Z_{Th,Mur}$ | t_{Decr} | $q_{V,H}$ |
|-----------------|----------------|--------------|------------|-----------|-----------------|----------------|--------------|------------|-----------|
| Urbain | 0,01 | 0,01 | 47 % | 84 % | Centre ville | 0,01 | 0,01 | 63 % | 85 % |
| | | 0,75 | 46 % | 81 % | | | 0,75 | 65 % | 86 % |
| | | 1,5 | 39 % | 61 % | | | 1,5 | 56 % | 59 % |
| | | 2,5 | 33 % | 47 % | | | 2,5 | 50 % | 43 % |
| | 0,5 | 0,01 | 45 % | 79 % | | 0,5 | 0,01 | 63 % | 83 % |
| | | 0,75 | 45 % | 76 % | | | 0,75 | 65 % | 84 % |
| | | 1,5 | 37 % | 56 % | | | 1,5 | 55 % | 57 % |
| | | 2,5 | 30 % | 42 % | | | 2,5 | 47 % | 39 % |
| | 1 | 0,01 | 39 % | 59 % | | 1 | 0,01 | 58 % | 66 % |
| | | 0,75 | 38 % | 57 % | | | 0,75 | 59 % | 68 % |
| | | 1,5 | 28 % | 37 % | | | 1,5 | 48 % | 40 % |
| | | 2,5 | 25 % | 32 % | | | 2,5 | 47 % | 39 % |
| | 2 | 0,01 | 28 % | 20 % | | 2 | 0,01 | 31 % | 19 % |
| | | 0,75 | 27 % | 19 % | | | 0,75 | 30 % | 19 % |
| | | 1,5 | 27 % | 22 % | | | 1,5 | 36 % | 20 % |
| | | 2,5 | 36 % | 35 % | | | 2,5 | 69 % | 36 % |

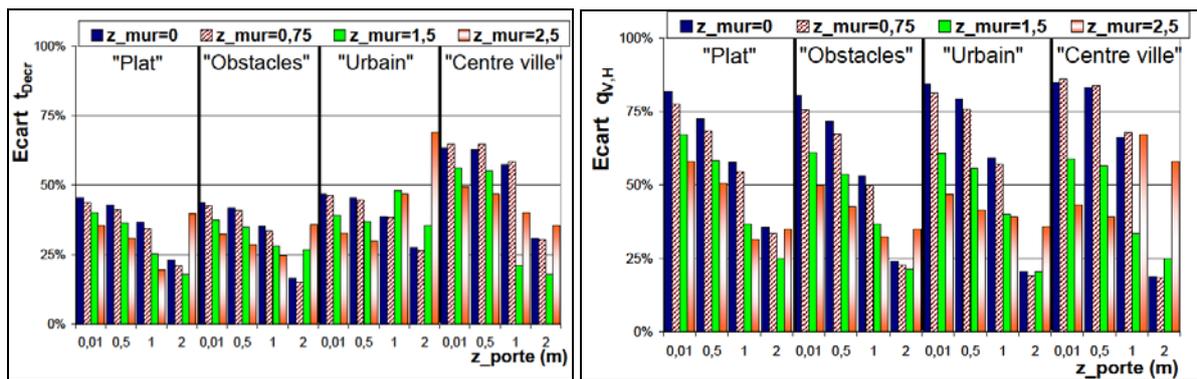


Figure 96 : Ecarts moyens sur la décroissance (gauche) et sur le débit horaire (droite) pour différentes combinaisons des paramètres $\{a_T, k_T\}$, $Z_{Th,Mur}$ et $Z_{Th,Porte}$.

L'allure générale des histogrammes montre une forte influence de la hauteur $Z_{Th,Porte}$ (axe de l'abscisse) : l'écart relatif sur le temps de décroissance diminue de 15 % en moyenne en augmentant $Z_{Th,Porte}$ de 0 à 2 m (25 % en considérant le débit horaire).

L'influence de la hauteur du tirage thermique au niveau des parois est moins évidente et semble dépendre de la valeur de $Z_{Th,Porte}$. Par exemple, l'écart diminue alors que $Z_{Th,Mur}$ augmente si $Z_{Th,Porte}$ est inférieur à 2 m mais augmente si $Z_{Th,Porte}$ est égal à 2 m. Concernant les coefficients de terrain enfin, les différences ne sont pas très marquées sauf en ce qui concerne les coefficients de type « Centre Ville » pour lesquels l'écart moyen sur le temps de décroissance est de 50 % (30 % avec les autres coefficients de terrain).

Pour les combinaisons de paramètres qui permettent d'obtenir les écarts moyens les plus faibles, les séquences expérimentales ont été analysées une à une. Cela a permis d'écarter les combinaisons de paramètres pour lesquelles les écarts sont inhomogènes. Par exemple, la

Annexe 9 : Identification des paramètres du modèle aéraulique

combinaison de paramètres ($z_{Th,Porte} = 2$ m, $z_{Th,Mur} = 0$ m et les coefficients de terrain de type « Centre Ville ») permet d'obtenir des résultats moyens satisfaisants (27 % sur le temps de décroissance et 19 % sur le débit horaire). Cependant, les écarts deviennent très importants pour la séquence 10 (277 % sur le temps de décroissance, 71 % sur le débit horaire). Cela provient du fait que les conditions extérieures étaient très différentes lors de cette séquence particulière (vent fort). La faible fréquence d'apparition de ce phénomène lors des séquences expérimentales fait que l'erreur moyenne ne rend pas compte de ces écarts.

En conclusion, la solution retenue correspond à $z_{Th,Porte} = 2$ m, $z_{Th,Mur} = 0,75$ m et des coefficients de terrain de type « Obstacles » (cases grisées dans le Tableau 37). Cette solution est satisfaisante, d'une part parce qu'elle offre un bon compromis entre écart sur la décroissance et sur le renouvellement d'air horaire, et d'autre part parce qu'elle correspond à la réalité du terrain.

Annexe 10 : Etude de sensibilité locale

D'après (Saltelli *et al.* 04), une analyse de sensibilité est une étude qui permet de déterminer dans quelles proportions l'incertitude sur les données de sorties d'un modèle peut être reliée aux incertitudes des données d'entrée. Il existe plusieurs méthodes d'analyse que recensent (Spitz *et al.* 12), dont l'analyse locale qui est utilisée couramment.

Cette méthode consiste à appliquer une perturbation à chacun des paramètres X_i d'un modèle et à observer l'effet sur la sortie Y . En supposant que les k paramètres d'entrée soient indépendants les uns des autres, cette méthode ne nécessite de réaliser que $k+1$ simulations. Il est alors possible de proposer une classification entre les différents paramètres en définissant leur indice de sensibilité S_i comme présenté dans l'équation Eq. 62, et dont l'approximation numérique est donnée dans Eq. 63.

$$\text{Eq. 62} \quad S_i = X_i \cdot \frac{\partial Y_k}{\partial X_i}$$

$$\text{Eq. 63} \quad S_i = X_i \cdot \frac{[Y_k(X_1, X_2, \dots, X_{i+\Delta_i}, \dots, X_k) - Y_k(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_k)]}{\Delta X_i}$$

Une étude de sensibilité locale à été appliquée au comportement thermique de la paroi Ouest de la cellule expérimentale pour une séquence d'une quinzaine de jours (1^{er} au 14 février 2012 – voir Chapitre IVA pour davantage de détails). Pour cela, les transferts couplés dans la lame d'air et la paroi isolée ont été simulés plusieurs fois en imposant les conditions intérieures et extérieures. Les entrées X_i qui ont été étudiées sont :

- Les propriétés thermo-hygriques des composants des trois couches de la paroi isolée (épaisseur, λ , λ_{Hum} , C_p , ρ , δ_{vap} (voir Tableau 1 et Tableau 2) et sorption (Figure 7)).
- Les coefficients de transferts convectifs et radiatifs (voir Eq. 22 et Eq. 23)
- L'émissivité du bardage extérieur (courtes et grandes longueurs d'ondes).

Pour chacun de ces paramètres, une perturbation de 1 % a été appliquée et la quantité totale d'énergie qui traverse la paroi a été calculée. Les résultats ont été triés en fonction de leur indice de sensibilité par ordre décroissant. Les quatorze paramètres les plus influents sont présentés dans le graphique de la Figure 97.

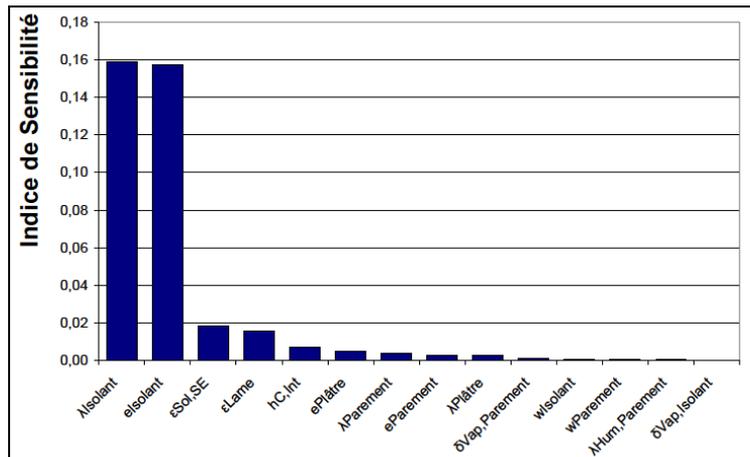


Figure 97 : Comparaison des indices de sensibilité des différents paramètres de l'étude

Il apparaît que le calcul de la quantité d'énergie qui traverse la paroi isolée est très sensible à la valeur de la conductivité thermique sèche de l'isolant (ouate de cellulose) et à son épaisseur. Dans des proportions moindres (la valeur de l'indice S_i est dix fois plus faible), le calcul est influencé par l'émissivité du bardage extérieur. La sensibilité des autres paramètres est enfin au moins vingt fois moins importante.

Dans le cas particulier de la ouate de cellulose, utilisée ici comme isolant, il a été mis en évidence lors de sa mise en œuvre que ce matériau n'était pas homogène, ce qui pouvait se traduire par de fortes variations de ses propriétés thermo-hygriques. Par contre, l'épaisseur de la couche du matériau est mieux maîtrisée. Aussi, il semble raisonnable d'utiliser une valeur de la conductivité thermique de la ouate de cellulose différente de celle de la mesure faite en laboratoire pour chercher à s'approcher des mesures expérimentales (voir Chapitre IVB).

NOM : **LABAT**

DATE de SOUTENANCE : 21.11.2012

Prénoms : **Matthieu Jordan**

TITRE : **Chaleur – humidité – air dans les maisons à ossature bois, expérimentation et modélisation**

NATURE : **Doctorat**

Numéro d'ordre : 2012ISAL0115

Ecole doctorale : **MEGA (Mécanique, Energétique, Génie civil, Acoustique)**

Spécialité : **Génie Civil**

RESUME : L'évolution actuelle des exigences en termes de performance énergétique des bâtiments a fait apparaître de nouveaux enjeux et problématiques scientifiques, dont ceux liés à l'humidité. Cette étude s'appuie sur une cellule expérimentale construite sur la technologie des maisons à ossature bois et soumise aux conditions climatiques réelles de Grenoble. L'instrumentation de ce bâtiment et le suivi de l'évolution en température et en humidité dans les différentes couches de l'enveloppe permettent de définir des séquences nécessaires à la validation de modèles numériques.

Dans cet objectif, un modèle existant nommé HAM-Tools a été utilisé pour simuler les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à l'échelle du bâtiment. La démarche de validation a été décomposée en plusieurs étapes, de manière à cibler des transferts spécifiques et d'en améliorer la modélisation. Ces études localisées concernent les transferts couplés de chaleur et de masse à travers les parois solides, la modélisation des transferts de chaleur à travers une lame d'air ventilée et enfin la modélisation du renouvellement de l'air intérieur en conditions naturelles. Pour estimer la précision globale du modèle, c'est-à-dire à l'échelle du bâtiment, une séquence expérimentale a été simulée en prenant en compte l'ensemble des transferts couplés simultanément.

Les performances du modèle sont discutées à partir des mesures locales, c'est-à-dire dans les parois, puis globales. La bonne concordance entre mesures et résultats de simulation permet de conclure sur la validité et la généralité de la démarche mise en œuvre et les hypothèses de simulation. Plus particulièrement, il est apparu que l'outil de modélisation permet de prédire correctement le comportement moyen des parois en humidité et en température. Il est donc envisageable de l'utiliser pour simuler et estimer l'impact des constituants des parois en termes de durabilité, de performances énergétiques et de confort de l'occupant.

MOTS CLES : **Transferts couplés, modélisation, expérimentation, matériaux hygroscopiques, lame d'air ventilée, renouvellement d'air**

Laboratoires : **CETHIL (Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008)**

CSTB, Division Caractérisation Physique des Matériaux Grenoble

Directeurs de thèse : Jean-Jacques Roux, Monika Woloszyn

Président du jury :

Composition du jury : **Jean-Jacques Roux, Monika Woloszyn, Christian Inard, Gérard Jeandel, Dominique Derome, Daniel Quenard, Arnold Janssens, Samira Kherrouf**