



HAL
open science

Etudes expérimentales des transferts de masse et de chaleur dans les parois des constructions en bois, en vue de leur modélisation

Helisoa Mamy Rafidiarison

► To cite this version:

Helisoa Mamy Rafidiarison. Etudes expérimentales des transferts de masse et de chaleur dans les parois des constructions en bois, en vue de leur modélisation. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Lorraine, 2012. Français. NNT : 2012LORR0077 . tel-02074483

HAL Id: tel-02074483

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02074483v1>

Submitted on 4 Jan 2021

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

ENSTIB (École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois)
École Doctorale RP2E (Ressources Produits Procédés Environnement)

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 17 Juillet 2012

en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Spécialité : Sciences du bois et des Fibres

par

Helisoa Mamy RAFIDIARISON

**Etudes expérimentales des transferts de masse et de chaleur dans les
parois des constructions en bois, en vue de leur modélisation.
Application aux économies d'énergie et au confort dans l'habitat**

Composition du Jury :

| | | |
|--------------------------------|------------------|---|
| <i>Président :</i> | Patrick PERRÉ | Professeur, LGPM - Ecole Centrale de Paris |
| <i>Rapporteurs :</i> | Monika WOLOSZYN | Professeur, LOCIE - Université de Savoie |
| | Bernard PERRIN | Professeur, LMDC - Université Paul Sabatier Toulouse |
| <i>Examineur :</i> | Gérard JEANDEL | Professeur, LEMTA - Université de Lorraine |
| <i>Directeur de thèse :</i> | Yann ROGAUME | Professeur, LERMAB - Université de Lorraine |
| <i>Co-directeur de thèse :</i> | Éric MOUGEL | Maître de conférences, LERMAB - Université de Lorraine |
| <i>Invités:</i> | Philippe THIRIET | Resp. Transfert Technologique, CRITT BOIS |
| | Alexis NICOLAS | Ingénieur, AVEN'R - Epinal |

Tu es si loin mais demeures toujours dans mon cœur, Maman je sais que tu aurais été si fière de moi !!!

Remerciements

Je tenais à clôturer la rédaction de ce manuscrit en témoignant ici ma reconnaissance la plus sincère aux personnes sans qui ces années de thèse n'auraient pas été belles et enrichissantes aussi bien professionnellement qu'humainement.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord aux Professeurs Monika Woloszyn et Bernard Perrin, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de rapporter ce travail et de faire partie du jury. Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Professeur Patrick Perré qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je remercie également le Professeur Gérard Jeandel et messieurs Philippe Thiriet et Alexis Nicolas pour leur intérêt pour ce travail et leur participation en tant que membres de jury.

Je remercie le professeur Yann Rogaume d'avoir accepté de diriger ce travail, sa disponibilité n'a jamais fait défaut durant ces années. Je ne saurais trouver les mots pour remercier mon co-directeur de thèse, Eric Mougel. Ses conseils très constructifs, sa disponibilité et son aide ont contribué à faire de ces années de thèse une période très enrichissante scientifiquement.

Je remercie également Monsieur Stéphane Ohnimus, Directeur du CRITT BOIS, de m'avoir offert l'opportunité d'une formation aussi intéressante, j'espère avoir apporté ma contribution au développement de la thématique thermique de l'habitat au sein du CRITT BOIS.

Durant ma thèse, les conseils avisés d'Alexis Nicolas et Romain Rémond m'ont toujours été d'une grande aide, qu'ils trouvent ici le témoignage de mon entière reconnaissance pour les échanges qu'on a eus.

Merci également à tout le personnel de l'ENSTIB et du CRITT BOIS, ces années n'auraient été aussi belles sans vous ! Merci à Tristan d'avoir supporté mes humeurs et d'avoir été d'une aide permanente dans la réalisation de ce travail.

Cette thèse a pu se concrétiser grâce à l'appui financier de l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) et de l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche) à travers le projet TRANSBATIBOIS, et je les en remercie.

A toi papa qui a accepté d'être si loin de ta chère enfant juste parce que tu as toujours souhaité le meilleur pour nous, je t'aime !!!

Vous, mes deux chéris ! Je vous adore et je vous dédie ce travail ! Merci Prosper pour tes encouragements, ta présence, merci tout simplement d'être tel que tu es. J'espère que tu comprendras par cette phrase si simple et si compliquée pour les autres que tu es et resteras MGK.

Résumé

Les matériaux hygroscopiques, et tout particulièrement le bois et ses dérivés possèdent des propriétés complexes rendant difficile la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse dans les parois incluant ces matériaux. De ce fait, très peu d'outils numériques sont aujourd'hui capables de prédire correctement la performance hygrothermique de l'habitat bois. L'objectif de ce travail est de caractériser expérimentalement les transferts chaleur-masse dans les parois des constructions bois afin de valider un outil numérique destiné à simuler le comportement hygrothermique des parois comportant des matériaux hygroscopiques.

Dans un premier temps, les notions théoriques et les études antérieures sur les transferts couplés chaleur – masse sont présentés. Ensuite, nous donnons un descriptif détaillé du dispositif expérimental conçu pour caractériser les transferts couplés chaleur-masse dans les parois. Les expériences de caractérisation des performances hygrothermiques des parois fournies par les industriels partenaires du projet TRANSBATIBOIS dans lequel s'inscrit cette thèse sont également abordées. Nous détaillons par la suite les expériences réalisées ainsi que la phase de confrontation des résultats expérimentaux avec les résultats prédits par le code numérique BuildingPore et l'outil commercial WUFI. La troisième partie de ce travail est consacrée aux expérimentations à l'échelle de l'enveloppe. Nous y présentons une analyse de la performance hygrothermique et des consommations énergétiques des constructions bois à travers le suivi de modules-test exposés au climat extérieur. La dernière partie du travail est consacrée aux dispositifs de suivi de bâtiments.

Mots-clés :

Transferts couplés chaleur-masse, dispositifs expérimentaux, bois, matériaux hygroscopiques, paroi, enveloppe, expérimentation, validation.

Abstract

Coupled heat and moisture transfer through hygroscopic materials, particularly wood and wood-based products are difficult to model. This is partly due to some specific and complex properties of these materials that are often not included in numerical models. Currently, only a few numerical models are able to predict accurately the hygrothermal performance of wooden building envelope. The aim of this work is to assess the heat and moisture transfer in wooden building envelope through experiments and validate the prediction capacity of a numerical model developed to simulate hygrothermal behavior of envelope including wooden materials.

After giving a theoretical reminder of the coupled heat and moisture transfer through building envelope and reporting the results of previous studies in this field, we will give details of the experimental investigation on heat and moisture transfer through timber walls. Firstly, the experimental apparatus used for the wall tests is presented. Then, we will analysis the hygrothermal performance of wooden walls provided by the partners of the TRANSBATIBOIS project in which this work was achieved. Experimental works achieved for Buildingpore model validation and results of the comparisons between experimental assessment and numerical predictions with Buildingpore and WUFI are also reported. The third part of this study deals with the experimental assessment of wooden building envelopes exposed to climatic conditions. An analysis of the hygrothermal performance and the energy consumption of wooden test-cells is performed and reported in this part. The latest part concerns experimental works on buildings.

Keywords :

Coupled heat and mass transfer, experimental apparatus, wood, hygroscopic materials, walls, envelope, experience, validation

Table des matières

| | |
|---|-------|
| Remerciements | v |
| Résumé..... | vii |
| Abstract..... | ix |
| Nomenclature | xxiii |
| Introduction générale..... | 1 |
| I. Les transferts couplés chaleur-masse dans la construction | 7 |
| I.1. Caractérisation, formulation et modélisation des transferts de chaleur et de masse | 7 |
| I.1.1. Physique des transferts | 7 |
| I.1.1.1. Transfert de chaleur | 7 |
| I.1.1.2. Transfert d'humidité | 10 |
| I.1.1.3. Transferts couplés de chaleur et de masse | 14 |
| I.1.2. Modélisation numérique des transferts..... | 15 |
| I.1.2.1. Echelle paroi..... | 15 |
| I.1.2.2. Echelle enveloppe | 16 |
| I.2. Approche expérimentale des transferts couplés chaleur-masse dans le bâtiment..... | 18 |
| I.2.1. Mesures à l'échelle de la paroi..... | 18 |
| I.2.1.1. Dispositifs expérimentaux | 18 |
| I.2.1.2. Etudes antérieures..... | 21 |
| I.2.2. Mesures à l'échelle de l'enveloppe | 22 |
| I.2.2.1. Dispositifs de suivi d'enveloppes exposées à un climat réel | 22 |
| I.2.2.2. Confort intérieur | 24 |
| I.2.2.3. Performance hygrothermique des enveloppes | 30 |
| I.2.2.4. Performance énergétique des constructions..... | 31 |
| I.3. Conclusion..... | 31 |
| II. Etude des transferts chaleur-masse à l'échelle de la paroi..... | 33 |
| II.1. Dispositif expérimental | 34 |
| II.1.1. Principe du dispositif..... | 34 |
| II.1.2. Caractéristiques techniques..... | 36 |
| II.1.3. Régulation du dispositif et acquisition des données | 38 |
| II.1.4. Capacités de la double enceinte climatique | 39 |

| | |
|---|-----|
| II.2. Instrumentation des parois étudiées..... | 40 |
| II.2.1. Capteurs et technologies de mesure..... | 40 |
| II.2.2. Positionnement des points de mesures..... | 47 |
| II.3. Protocoles expérimentaux..... | 50 |
| II.3.1. Principe général des essais..... | 50 |
| II.3.2. Campagne expérimentale en vue de la validation de codes numériques..... | 53 |
| II.3.2.1. Modèles de transfert chaleur/masse dans les parois multicouches..... | 53 |
| II.3.2.2. Modèle de transfert chaleur/masse dans une lame d'air..... | 58 |
| II.3.3. Campagne expérimentale de caractérisation des parois bois courantes..... | 61 |
| II.3.3.1. Systèmes constructifs étudiés..... | 61 |
| II.3.3.2. Résistance thermique des parois en régime permanent..... | 63 |
| II.3.3.3. Réponse des parois aux sollicitations dynamiques..... | 63 |
| II.4. Résultats et discussions..... | 65 |
| II.4.1. Confrontation des résultats expérimentaux aux codes numériques..... | 65 |
| II.4.1.1. BuildingPore, (Rémond et Perré, 2008) code développé dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS..... | 65 |
| II.4.1.2. WUFI, logiciel commercial (Fraunhofer IBP)..... | 79 |
| II.4.2. Caractéristiques des parois bois courantes..... | 86 |
| II.4.2.1. Résistance thermique en régime permanent..... | 86 |
| II.4.2.2. Déphasage et amortissement..... | 88 |
| II.5. Conclusion..... | 92 |
| III. Etude expérimentale des transferts chaleur-masse à l'échelle de l'enveloppe : Approche simplifiée sur modules..... | 93 |
| III.1. Descriptif technique des modules..... | 93 |
| III.1.1. Principe général des modules..... | 93 |
| III.1.2. Description détaillée des parois verticales des cinq modules..... | 98 |
| III.1.3. Perméabilité à l'air des modules..... | 101 |
| III.2. Equipement des modules..... | 103 |
| III.2.1. Contrôle du climat intérieur..... | 103 |
| III.2.2. Instrumentation..... | 103 |
| III.2.2.1. Suivi des conditions météorologiques..... | 104 |
| III.2.2.2. Suivi des profils de température et d'humidité dans les parois..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| III.2.2.3. Suivi de l'ambiance intérieure..... | 105 |
| III.2.2.4. Suivi de la consommation | 105 |
| III.3. Descriptif des essais réalisés | 107 |
| III.4. Résultats et discussion..... | 109 |
| III.4.1. Performance énergétique des parois bois – Evaluation du comportement thermique des modules..... | 109 |
| III.4.1.1. Répartition des déperditions thermiques de l'enveloppe..... | 109 |
| III.4.1.2. Comparaison des besoins de chauffage avec Pléiades-Comfie..... | 111 |
| III.4.1.3. Comparatif des consommations énergétiques des modules | 112 |
| III.4.2. Contribution de la paroi au confort intérieur | 114 |
| III.4.2.1. Confort thermique intérieur | 114 |
| III.4.2.2. Confort hydrique intérieur | 121 |
| III.4.3. Les transferts hygrothermiques dans la paroi | 125 |
| III.5. Conclusion..... | 139 |
| IV. Etude des transferts chaleur-masse à l'échelle du bâtiment..... | 141 |
| IV.1. Instrumentation développées à l'échelle bâtiment..... | 141 |
| IV.2. Constructions étudiées..... | 143 |
| IV.2.1. Construction en rondins..... | 144 |
| IV.2.2. Maison en panneaux contrecollés | 146 |
| IV.2.3. Maison en ossature bois | 148 |
| IV.2.4. Bâtiment en ossature bois | 150 |
| IV.3. Résultats et discussion | 152 |
| IV.3.1. Analyse de la température intérieure des bâtiments | 155 |
| IV.3.2. Analyse de l'humidité intérieure des bâtiments..... | 158 |
| IV.4. Conclusion | 163 |
| Conclusion générale | 165 |
| Références..... | 169 |
| ANNEXE A : Résultats de confrontation avec BuildingPore sur les parois 2 et 3..... | 175 |
| ANNEXE B : Validation expérimentale du modèle de transfert chaleur-masse dans une lame d'air (code du LEMTA, Traoré, 2011)..... | 181 |
| ANNEXE C : Propriétés des matériaux utilisés par le code BuildingPore | 185 |
| ANNEXE D : Détails constructifs des bâtiments | 187 |

ANNEXE E : Propriétés des matériaux entrant dans la composition des différentes parois
testées..... 201

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1. Allure générale d'une isotherme de sorption/désorption..... | 12 |
| Figure 2. Dispositif expérimental de test de parois à Tampere, Finlande (Vinha, 2007) | 20 |
| Figure 3. Chambre climatique, Université de Concordia (Ge et Fazio, 2004)..... | 20 |
| Figure 4. Dispositif type boîte chaude gardée de test de parois (Nussbaumer et al, 2006) | 21 |
| Figure 5. Dispositif de test de vitrages et de parois (Fang et al. 2006)..... | 21 |
| Figure 6. Représentation schématique du déphasage et de l'amortissement..... | 27 |
| Figure 7. Zone de confort selon Brager | 28 |
| Figure 8. Schéma de principe de la double enceinte climatique..... | 35 |
| Figure 9. Double enceinte climatique a) vue d'ensemble, b) éléments de mesure et d'acquisition c) boîte chaude gardée..... | 36 |
| Figure 10. Capacité de régulation de la double enceinte climatique | 39 |
| Figure 11. Evolution de la température et de l'humidité relative dans l'isolant en fibres de bois et de chanvre, à 90 mm de l'interface bois/isolant..... | 42 |
| Figure 12. Evolution de la température et de l'humidité absolue dans l'isolant en fibres de bois et de chanvre, à 90 mm de l'interface bois/isolant..... | 43 |
| Figure 13. Evolution de la température et de l'humidité absolue dans le bois massif, à 60 mm de l'interface bois/isolant..... | 43 |
| Figure 14. Méthode de mesure de l'humidité du matériau..... | 44 |
| Figure 15. Eléments de mesure installés dans le dispositif..... | 45 |
| Figure 16. Précision des SHT 75 en température et humidité | 47 |
| Figure 17. Vue de côté de l'instrumentation d'un caisson | 48 |
| Figure 18. Emplacement des capteurs d'ambiance | 48 |
| Figure 19. Emplacement des capteurs d'ambiance et de surface..... | 49 |
| Figure 20. Système d'implantation des capteurs dans la paroi | 50 |
| Figure 21. Montage et instrumentation des parois-test..... | 52 |
| Figure 22. Conditions aux limites pour les essais de transferts couplés, 1 ^{ère} phase..... | 54 |
| Figure 23. Conditions aux limites pour les essais en transferts couplés, 2 ^{ème} phase..... | 55 |
| Figure 24. Coupes verticales des parois testées (a) : bois massif (40 mm), fibres de bois rigide (120 mm), fibres de bois support d'enduit (80 mm), enduit (10 mm) / (b) : bois massif (20 mm), fibres de bois rigide (120 mm), bois massif (20 mm) (c) : bois massif (40 mm), fibres de | |

| | |
|---|----|
| bois rigide (120 mm), pare-pluie (d) : bois massif (40 mm), laine de roche (120 mm), pare-pluie..... | 57 |
| Figure 25. Cycles de température appliqués aux parois pour l'essai dans la lame d'air | 59 |
| Figure 26. Coupes verticales des parois testées pour les essais "lame d'air" | 60 |
| Figure 27. Parois installées sur le cadre en bois | 60 |
| Figure 28. Coupes des parois-test et emplacement des capteurs | 62 |
| Figure 29. Conditions dynamiques estivales et hivernales imposées aux parois | 64 |
| Figure 30. Profils d'humidité relative mesurés et simulés (BuildingPore) au cours de la première campagne expérimentale | 66 |
| Figure 31. Evolution de l'humidité relative au sein de la paroi (1) en 3 points (Pt1 et Pt2 dans l'isolant de fibres de bois avec Pt1: à 30 mm de la surface extérieure, Pt2 : à 90 mm de la surface extérieure, Pt3 : au cœur de la paroi bois massif). a) code actuel, b) simulation sans prise en compte de l'hystérésis de l'isotherme de sorption et sa dépendance avec la température. | 68 |
| Figure 32. Evolution de la température (a) et de l'humidité relative (b) à plusieurs endroits au sein de la paroi 1 au cours de l'essai en conditions hivernales (emplacements définis sur la coupe ci-dessus) | 70 |
| Figure 33. Evolution de la température (a) et de l'humidité relative (b) au sein de la paroi 2 au cours de l'essai en conditions hivernales (emplacements définis sur la coupe ci-dessus) | 72 |
| Figure 34. Evolution de la température (a) et de l'humidité relative (b) à plusieurs endroits au sein de la paroi 3 au cours de l'essai en conditions hivernales (emplacements définis sur la coupe ci-dessus) | 74 |
| Figure 35. Evolution de la température mesurée (a) et simulée (b) à plusieurs endroits au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5 | 77 |
| Figure 36. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée (a) et simulée (b) à plusieurs endroits au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5 | 78 |
| Figure 37. Evolution de la température mesurée et simulée au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6..... | 79 |
| Figure 38. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée et simulée au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6 | 79 |
| Figure 39. Evolution de la température (a) et de l'humidité relative (b) mesurées et simulées avec WUFI au sein de la paroi 1 au cours de l'essai 3 en conditions hivernales (emplacements définis sur la coupe ci-dessus) | 81 |
| Figure 40. Evolution de la température mesurée (a) et simulée avec WUFI (b) au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5 | 83 |
| Figure 41. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée (a) et simulée avec WUFI (b) au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5 | 84 |

| | |
|---|-----|
| Figure 42. Evolution de la température (a) et de l'humidité relative (b) mesurées et simulées avec WUFI au sein de la paroi en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6 | 85 |
| Figure 43. Evolution de la température dans les couches de la paroi madrier | 89 |
| Figure 44. Evolution de la température dans les couches de la paroi en panneaux contrecollés avec isolation en fibres de bois rigide..... | 89 |
| Figure 45. Evolution de la température dans les couches de la paroi ossature avec isolation fibres de bois souples | 90 |
| Figure 46. Evolution de la température dans les couches de la paroi en panneaux contrecollés avec isolation en ouate de cellulose..... | 90 |
| Figure 47. Construction et vue d'ensemble des modules | 96 |
| Figure 48. Coupe verticale d'un module..... | 97 |
| Figure 49: Coupe de la paroi du module KLH | 99 |
| Figure 50 : Coupe de la paroi du module en madriers massifs | 99 |
| Figure 51 : Coupe de la paroi du module en ossature isolation fibres de bois..... | 100 |
| Figure 52 : Coupe de la paroi du module en ossature avec isolation en laine de verre..... | 100 |
| Figure 53 : Coupe de la paroi du module en ossature avec isolation en ouate de cellulose ... | 101 |
| Figure 54. Mesure de perméabilité à l'air sur un module | 103 |
| Figure 55. Equipements de mesures et de régulation dans les modules | 106 |
| Figure 56. Répartition des déperditions thermiques dans les modules..... | 111 |
| Figure 57. Besoins en chauffage mesurés et calculés pour les modules..... | 112 |
| Figure 58. Flux de chaleur moyen journalier des modules pendant la période de chauffe | 114 |
| Figure 59. Profils de température dans les parois Nord, Sud, Ouest et Est du module en panneaux contrecollés | 118 |
| Figure 60. Température à l'interface des deux isolants dans les parois Nord, Sud, Ouest et Est du module en panneaux contrecollés..... | 118 |
| Figure 61. Evolution de l'humidité relative intérieure de chaque module pendant la production d'humidité | 122 |
| Figure 62. Evolution de l'humidité absolue intérieure de chaque module pendant la production d'humidité | 123 |
| Figure 63. Flux d'humidité dans chaque module pour un renouvellement d'air naturel | 125 |
| Figure 64. Différence de température entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée de la paroi nord et l'air extérieur, en fonction de la température extérieure | 126 |
| Figure 65. Différence de température entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée de la paroi sud et l'air extérieur, en fonction de la température extérieure | 127 |

| | |
|---|-----|
| Figure 66. Différence moyenne de température entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée et l'air extérieur, en fonction de la température extérieure pour les quatre façades et le cas où $R_s = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ | 127 |
| Figure 67. Différence d'humidité absolue entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée de la paroi nord et l'air extérieur, en fonction de la température extérieure..... | 128 |
| Figure 68. Différence d'humidité absolue entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée de la paroi sud et l'air extérieur, en fonction de la température extérieure | 129 |
| Figure 69. Evolution de la température dans la paroi nord avec isolation laine de verre | 130 |
| Figure 70. Evolution de la température dans la paroi nord avec isolation en ouate de cellulose | 130 |
| Figure 71. Evolution de l'humidité relative dans la paroi nord avec isolation en laine de verre | 132 |
| Figure 72. Evolution de l'humidité relative dans la paroi nord avec isolation en ouate de cellulose | 132 |
| Figure 73. Evolution horaire de la température et de l'humidité absolue de l'air en surface extérieure du panneau OSB/module laine de verre | 133 |
| Figure 74. Evolution de la température et de l'humidité relative à la surface extérieure du panneau OSB (module ossature laine de verre) | 134 |
| Figure 75. Evolution de la température et de l'humidité relative à la surface extérieure du panneau OSB (module ossature ouate de cellulose) | 134 |
| Figure 76. Humidité absolue de part et d'autre de la membrane pare ou frein-vapeur (module laine de verre et ouate respectivement) | 135 |
| Figure 77. Humidité relative dans les lames d'air intérieures des modules laine de verre et ouate de cellulose..... | 136 |
| Figure 78. Evolution de l'humidité absolue de l'air de part et d'autre des membranes de régulation de vapeur dans les modules ossatures laine de verre et ouate de cellulose..... | 137 |
| Figure 79. Evolution de l'humidité relative de l'air de part et d'autre des membranes de régulation de vapeur dans les modules ossatures laine de verre et ouate de cellulose..... | 137 |
| Figure 80. Humidité relative moyenne quotidienne de l'air mesurée derrière le frein-vapeur et le pare-vapeur des ossatures ouate et laine de verre | 138 |
| Figure 81. Implantation des capteurs dans les parois du chalet en fuste | 145 |
| Figure 82. Emplacement des capteurs dans le chalet en fuste | 146 |
| Figure 83. Coupe de la paroi de la maison en panneaux contrecollés | 147 |
| Figure 84. Emplacement des capteurs dans la maison en panneaux contrecollés..... | 148 |
| Figure 85. Implantation des capteurs dans la paroi Sud de la maison en ossature bois..... | 149 |
| Figure 86. Emplacement des capteurs dans la maison en ossature bois | 150 |

| | |
|---|-----|
| Figure 87. Implantation des capteurs dans l'une des parois du bâtiment en ossature bois.... | 151 |
| Figure 88. Emplacement des capteurs dans le logement du bâtiment en ossature bois | 152 |
| Figure 89. Température et humidité intérieures mesurées dans le séjour du chalet en rondins en été au printemps..... | 154 |
| Figure 90. Température et humidité intérieures mesurées dans le séjour de la maison en panneaux contrecollés en été et en hiver | 155 |
| Figure 91. Fréquence de la température dans le séjour et la chambre du chalet en rondins en été..... | 156 |
| Figure 92. Fréquence de la température dans le séjour et la chambre de la maison en panneaux contrecollés en été..... | 156 |
| Figure 93. Evolution des températures intérieure, extérieure et au niveau de la ventilation de la maison en panneaux contrecollés..... | 157 |
| Figure 94. Evolution du profil de température dans la paroi en rondins en été..... | 158 |
| Figure 95. Fréquence de l'humidité relative dans le séjour et la chambre du chalet en rondins en été..... | 158 |
| Figure 96. Fréquence de l'humidité relative dans le séjour et la chambre de la maison en panneaux contrecollés en été..... | 159 |
| Figure 97. Evolution de l'humidité absolue intérieure et extérieure de la maison en panneaux contrecollés | 160 |
| Figure 98. Humidité relative et température intérieures et extérieures de la maison en panneaux contrecollés | 160 |
| Figure 99. Evolution de l'humidité absolue (extérieure, intérieure et paroi) du chalet en rondins | 161 |
| Figure 100. Evolution de l'humidité relative et de la température (extérieures et intérieures) du chalet en rondins..... | 162 |
| Figure 101. Evolution de la température et de l'humidité absolue intérieures du chalet en rondins | 162 |
| | |
| Figure A 1. Evolution de la température mesurée (a) et simulée (b) au sein de la paroi 2 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5..... | 175 |
| Figure A 2. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée (a) et simulée (b) au sein de la paroi 2 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5 | 176 |
| Figure A 3. Evolution de la température mesurée et simulée au sein de la paroi 2 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6..... | 177 |
| Figure A 4. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée et simulée au sein de la paroi 2 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6 | 177 |

| | |
|--|-----|
| Figure A 5. Evolution de la température mesurée (a) et simulée (b) au sein de la paroi 3 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5..... | 178 |
| Figure A 6. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée (a) et simulée (b) au sein de la paroi 3 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5..... | 179 |
| Figure A 7. Evolution de la température mesurée et simulée au sein de la paroi 3 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6..... | 180 |
| Figure A 8 Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée et simulée au sein de la paroi 3 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6..... | 180 |
| | |
| Figure B 1. Evolution de la température au centre des panneaux de bois massif intérieur (a) et extérieur (b)..... | 181 |
| Figure B 2. Evolution de la température à mi-hauteur au centre de la lame d'air..... | 182 |
| Figure B 3. Evolution de la température à $y = 0,02$ m et $y = 0,98$ m..... | 182 |
| Figure B 4. Ecart absolu dans le bois massif (a) et dans la lame d'air (b)..... | 183 |
| Figure B 5. Evolution de la pression partielle de vapeur d'eau dans le bois massif intérieur (a) et extérieur (b)..... | 183 |
| Figure B 6. Evolution de la pression partielle de vapeur d'eau aux interfaces du bois massif et de la lame d'air..... | 184 |
| Figure B 7. Evolution de la pression partielle de vapeur d'eau au centre de la lame d'air..... | 184 |
| | |
| Figure D 1. Chalet en rondins : façades..... | 187 |
| Figure D 2. Chalet en rondins : plans du rez-de-chaussée et de l'étage..... | 188 |
| Figure D 3. Chalet en rondins : coupe d'une façade..... | 189 |
| Figure D 4. Maison en panneaux contrecollés massifs : façades..... | 190 |
| Figure D 5. Maison en panneaux contrecollés massifs : plans du rez-de-chaussée et de l'étage..... | 192 |
| Figure D 6. Maison en panneaux contrecollés massifs : coupe d'une façade..... | 193 |
| Figure D 7. Maison en ossature bois : façades..... | 195 |
| Figure D 8. Maison en ossature bois : plan du rez-de-chaussée..... | 196 |
| Figure D 9. Maison en ossature bois : plan de l'étage..... | 197 |
| Figure D 10. Maison en ossature bois : coupe de la façade sud..... | 198 |
| Figure D 11. Bâtiment en ossature bois : façades..... | 199 |
| Figure D 12. Bâtiment en ossature bois : plan de l'appartement instrumenté..... | 200 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 1. Les différents mécanismes de transport dans les composants du bâtiment (Künzel, 1995)..... | 11 |
| Tableau 2 : Inventaire des capteurs et appareils de mesure installés sur le dispositif | 46 |
| Tableau 3. Précisions de mesures des différents capteurs | 46 |
| Tableau 4 : Configurations des parois testées lors des essais | 61 |
| Tableau 5 : Résistances thermiques mesurées (en régime permanent) et calculées de plusieurs compositions de parois..... | 87 |
| Tableau 6 : Déphasages thermiques et amortissements mesurés et calculés de différents matériaux | 91 |
| Tableau 7. Composition détaillée de chaque module et caractéristiques thermiques | 95 |
| Tableau 8. Valeurs de perméabilité à l'air des modules..... | 102 |
| Tableau 9 : Capteurs utilisés et grandeurs mesurées sur les modules | 107 |
| Tableau 10. Coefficients de transmission thermique linéiques calculés pour les liaisons entre les éléments de parois des modules | 109 |
| Tableau 11. Puissances dissipées dans les cinq modules..... | 110 |
| Tableau 12. Ecart entre besoins en chauffage calculés et mesurés pour les modules | 112 |
| Tableau 13. Déphasages thermiques apportés par les parois nord des modules..... | 120 |
| Tableau 14. Flux d'humidité avant et après humidification..... | 122 |
| Tableau 15. Synthèse des capteurs installés sur les bâtiments | 143 |

Nomenclature

| | |
|------------|--|
| A | : surface du matériau (m^2) |
| C | : coefficient de débit d'air ($m^3.h^{-1}.Pa^{-n}$) |
| C_p | : chaleur spécifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) |
| d | : épaisseur (m) |
| D_{th} | : diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$) |
| e_{th} | : effusivité thermique ($W.m^{-2}.K^{-1}.s^{1/2}$) |
| g_a | : flux d'air ($kg.s^{-1}$) |
| g_{conv} | : flux de vapeur par convection ($kg.s^{-1}$) |
| g_v | : densité de flux de vapeur ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) |
| HA | : humidité absolue ($kg_{vapeur}.kg^{-1}_{air sec}$) |
| h_{conv} | : coefficient de transfert de chaleur par convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$) |
| h_e | : coefficient de transfert de chaleur extérieur ($W.m^{-2}.K^{-1}$) |
| h_{ray} | : coefficient de transfert de chaleur par rayonnement ($W.m^{-2}.K^{-1}$) |
| k_a | : perméabilité à l'air du matériau (s) |
| m | : masse (kg) |
| M_v | : masse molaire de l'eau ($18 g.mol^{-1}$) |
| n | : exposant de l'écoulement (-) |
| n_{50} | : taux de renouvellement d'air sous une différence de pression de 50 Pa (h^{-1}) |
| p | : profondeur de pénétration d'une onde de chaleur (m) |
| P | : pression totale (Pa) |
| P_v | : pression de vapeur (Pa) |
| q_{conv} | : densité de flux de chaleur par convection ($W.m^{-2}$) |
| Q_t | : quantité totale d'énergie (W) |
| Q_v | : débit d'air ($m^3.h^{-1}$) |
| Q_4 | : renouvellement d'air sous une différence de pression de 4 Pa ($m^3.m^{-2}.h^{-1}$) |
| R | : constante des gaz parfaits ($8,314 J.mol^{-1}.K^{-1}$) |
| R | : résistance thermique ($m^2.K.W^{-1}$) |
| R_{se} | : résistance de surface extérieure ($m^2.K.W^{-1}$) |
| R_{si} | : résistance de surface intérieure ($m^2.K.W^{-1}$) |

| | |
|-------------------|---|
| S_d | : épaisseur d'air équivalente (m) |
| t | : temps (s) |
| T | : température (°C ou K) |
| T_a | : température de l'air ambiant (K) |
| T_s | : température de surface du matériau (K) |
| q_{cond} | : densité de flux de chaleur ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) |
| Q_{cond} | : flux de chaleur par conduction (W) |
| W_v | : perméance ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$) |
| Z_v | : résistance à la diffusion de vapeur d'eau ($\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}\cdot\text{kg}^{-1}$) |
| δ_a | : perméabilité à la vapeur d'eau de l'air ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$) |
| δ_v | : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$) |
| ΔP | : différence de pression (Pa) |
| ε | : émissivité (-) |
| λ | : conductivité thermique du matériau ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) |
| μ | : coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (-) |
| θ | : déphasage thermique (h) |
| ρ | : masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) |
| σ | : constante de Stefan-Boltzmann ($5,67\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) |
| v | : humidité volumique de l'air ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) |

Introduction générale

Contexte de l'étude

L'émergence de nouvelles contraintes aussi bien environnementales qu'économiques incite de plus en plus à concevoir des bâtiments à faible impact environnemental qui doivent obéir à des critères élevés de performance énergétique tout en assurant une ambiance intérieure saine et confortable pour les occupants. Dans le secteur de la construction, le bois est devenu un matériau incontournable par son empreinte environnementale et sa capacité à participer efficacement aussi bien à la performance énergétique qu'au confort intérieur. Cependant, la non prise en compte des propriétés spécifiques au bois et autres matériaux hygroscopiques dans les transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein des parois comportant ce genre de matériaux induit souvent une mauvaise estimation des consommations des constructions bois à haute performance énergétique (Pickett (2003), Raji (2006)). Ce constat montre la nécessité d'études scientifiques complémentaires pour contribuer à améliorer l'évaluation des performances de l'habitat bois.

Evaluer ou prédire la performance énergétique et la qualité de confort des constructions en bois nécessite de prendre en compte au mieux les transferts couplés de chaleur et d'humidité. Les matériaux hygroscopiques échangent de l'humidité avec l'air les entourant afin de se mettre en équilibre. Cet effet de régulateur ou de tampon hydrique est bien connu et a fait l'objet de nombreuses études (Hameury 2005, Kunzel et al 2004, Osanyintola *et al* 2006, Osanyintola & Simonson 2006, Simonson *et al* 2004, James *et al* 2010). Ces échanges de matière sont couplés à des transferts de chaleur, ils ont également un impact sur les propriétés des matériaux (Siau 1984, Mendes *et al.* 2003, Olalekan *et al.* 2006). L'évaluation des performances hygrothermiques des enveloppes du bâtiment se fait selon deux méthodes : les mesures expérimentales et la simulation numérique. La simulation numérique est souvent préférée aux méthodes expérimentales car ces dernières sont le plus souvent coûteuses en temps et en investissement. Plusieurs modèles mathématiques existent actuellement et ont prouvé leur efficacité dans la simulation des transferts thermique et hydrique à l'échelle de la paroi et de l'enveloppe. Cependant, les modèles existant ne prennent pas en compte certains paramètres (influence de la teneur en eau et de la température sur les coefficients de transferts, dépendance de l'isotherme de sorption avec la température, hystérésis) entrant en jeu dans les transferts couplés chaleur-masse dans le bois et les autres matériaux à base de bois. Par ailleurs, la complexité du matériau bois rend difficile la modélisation des transferts de chaleur et de masse à travers ce matériau. Très peu de logiciels sont alors capables de reproduire correctement le comportement hygrothermique de parois multicouches intégrant le matériau bois ou d'autres matériaux hygroscopiques.

Le projet TRANSBATIBOIS

Afin de palier à cette difficulté qu'ont les outils numériques à modéliser correctement le comportement hygrothermique de l'habitat bois, le projet TRANSBATIBOIS (TRANSferts dans

les parois des BATiments en BOIS), dont cette thèse fait partie, a été mis en place afin d'entreprendre des travaux numériques et expérimentaux permettant de caractériser correctement les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les constructions en bois. L'objectif du projet est de mieux évaluer les performances hygrothermiques des constructions en bois, par le biais de campagnes expérimentales et d'un outil numérique d'aide à la conception des parois comportant du bois ou un matériau à base de bois, développés dans le cadre du projet. Ce projet de recherche a été réalisé avec le financement de l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche) et géré par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Le projet TRANSBATIBOIS est le fruit de la collaboration entre différents partenaires : le CRITT Bois (Centre de Ressources et de Transferts Technologiques dans le domaine du Bois), qui est le coordinateur du projet, le LERFOB (Laboratoire d'Etudes des Ressources Forêt-Bois), le LEMTA (Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée), le LERMAB (Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois) et cinq entreprises de construction représentatives des différents systèmes constructifs bois (ACMB (Atelier Construction Maison Bois), ECOLOGGIA, LIGNATEC, POIROT Construction et RONDINS Construction). Afin d'atteindre l'objectif fixé, une approche regroupant les trois axes suivants a été choisie:

- La première tâche du projet consiste en la caractérisation des matériaux de construction utilisés dans les campagnes expérimentales. Pour cela, les principales caractéristiques impliquées dans les transferts de chaleur et de masse ont été mesurées. Des propriétés spécifiques telles que les isothermes de sorption, l'hystérésis de sorption/désorption, le coefficient de diffusion, la conductivité thermique apparente et sa dépendance avec l'humidité ont été caractérisées. La thermodiffusion a également été étudiée. Cette tâche a été confiée au LERFOB et au LEMTA.
- La deuxième tâche concerne le développement d'outils numériques permettant de modéliser les transferts de chaleur et de masse dans la construction bois. Dans cette tâche, le LEMTA a développé un modèle numérique traitant de la dynamique des transferts dans une lame d'air intégrée dans une paroi. Parallèlement à cela, le LERFOB a développé le code BuildingPore permettant de modéliser les transferts couplés chaleur-masse dans une paroi multicouche. Ce code numérique est l'extension d'un outil existant nommé TransPore (Perré et Degiovanni, 1990, Perré et Turner, 1999), permettant de simuler les transferts couplés de chaleur et de masse dans un milieu poreux et en particulier dans le cas du séchage du bois. Par ailleurs, un modèle simple à l'échelle de l'enveloppe permettant d'évaluer la consommation énergétique d'un bâtiment et de prédire le niveau de confort thermique et hydrique intérieur a également été développé par le LERFOB.
- La troisième tâche est consacrée au développement de dispositifs expérimentaux en vue de la validation des outils numériques développés dans la deuxième tâche du projet. Cette partie a été réalisée en trois étapes. Dans un premier temps, deux types de dispositifs expérimentaux ont été mis en place. Le premier dispositif permet de suivre le comportement hygrothermique de parois soumises à des conditions contrôlées tandis que le deuxième dispositif est consacré au suivi du comportement d'enveloppes du bâtiment exposées au climat extérieur. Dans un second temps, des campagnes d'essais ont été menées sur des parois

soumises à des sollicitations climatiques contrôlées d'une part et sur des enveloppes exposées aux conditions climatiques réelles extérieures d'autre part. Enfin, les résultats expérimentaux ont été confrontés aux résultats des outils numériques afin de valider la capacité de ces derniers à prédire les transferts de chaleur et de masse dans les parois intégrant du bois ou des matériaux à base de bois. Cette troisième tâche a été réalisée par le LERMAB et le CRITT Bois. Le travail de thèse présenté dans ce mémoire constitue l'intégralité des travaux réalisés dans la troisième tâche du projet TRANSBATIBOIS.

Objectif de l'étude et approche adoptée

L'objectif de ce travail est d'une part de caractériser par le biais de campagnes expérimentales les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les enveloppes en vue de mieux évaluer le confort intérieur, la performance énergétique ainsi que le comportement hygrothermique des constructions bois à l'échelle de la paroi et à l'échelle de l'enveloppe et d'autre part de valider les codes numériques développés dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS.

L'approche expérimentale est une étape indispensable dans une démarche de validation des outils numériques permettant de simuler les transferts de chaleur et de masse dans les enveloppes du bâtiment. La caractérisation expérimentale peut être abordée suivant deux échelles :

- L'échelle paroi : à cette échelle, un dispositif expérimental spécifique est utilisé pour reproduire des sollicitations climatiques de part et d'autre d'une paroi. Grâce à la métrologie installée, un suivi de l'évolution des profils de température et d'humidité dans la paroi est réalisé pendant l'essai. Cette méthode offre l'avantage de pouvoir caractériser les transferts couplés chaleur-masse dans un échantillon de paroi soumis à des conditions maîtrisées et simplifiées. Dans ce cas, la confrontation des résultats expérimentaux avec la prédiction du code numérique développé à l'échelle paroi constitue une première étape dans la validation de l'outil numérique, avant de tester son potentiel prédictif sur le comportement de parois exposées aux conditions climatiques réelles extérieures.
- L'échelle enveloppe: les expérimentations à cette échelle permettent d'intégrer les paramètres qui ne peuvent être reproduits à l'échelle du laboratoire tels que les événements climatiques difficilement reproductibles (la pluie, le vent, l'ensoleillement ou le rayonnement céleste), les paramètres d'usage et les conditions de fonctionnement du bâtiment. Dans l'échelle enveloppe, nous pouvons distinguer le suivi en extérieur sur notre site expérimental du comportement de cellules-test et le suivi du comportement réel de bâtiments occupés. Les cellules-test sont des constructions non habitées, de géométrie simple et de la taille d'une pièce d'habitation. Ces cellules expérimentales permettront de suivre sur de longues périodes et en conditions extérieures le comportement des parois étudiées, et de disposer ainsi de données sur des enveloppes simplifiées par la géométrie et l'absence d'ouverture, dont les conditions de température et d'humidité relative sont parfaitement contrôlées. La réalisation d'expérimentations sur ces cellules-test et la confrontation des résultats expérimentaux avec la prédiction des codes numériques constituent une étape de validation intermédiaire entre l'échelle paroi et l'échelle bâtiment.

Le suivi expérimental du comportement des bâtiments exposés aux conditions réelles d'utilisation reste la dernière étape indispensable pour la validation du potentiel prédictif des codes numériques. En effet, les résultats expérimentaux utilisés pour la confrontation intègrent tous les paramètres d'exposition, d'utilisation et de fonctionnement du bâtiment et permettent donc de valider le potentiel prédictif des outils numériques destinés à la conception hygrothermique du bâtiment.

Du fait de la complémentarité de ces différentes échelles dans une démarche de validation des codes numériques développés dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS, nous avons choisi de mener des campagnes d'expérimentations à l'échelle paroi, à l'échelle des cellules-test (dénommées modules-test dans cette étude) et à l'échelle du bâtiment.

Organisation du document

Le travail présenté dans ce manuscrit est subdivisé en trois parties :

Nous allons dans la première partie de l'étude revoir les notions de base des transferts de chaleur et d'humidité appliqués au bâtiment. Nous abordons par la suite les différents modèles numériques existants et leur capacité à prédire le comportement des matériaux hygroscopiques. Cette partie du travail est également consacrée à une revue des différents travaux expérimentaux réalisés et consacrés à l'évaluation du comportement thermique et hydrique des constructions bois, aussi bien à l'échelle de la paroi qu'à l'échelle de l'enveloppe.

La deuxième partie est consacrée aux campagnes expérimentales destinées à caractériser le comportement hygrothermique des matériaux à l'échelle de la paroi. Le dispositif expérimental développé dans cette étude et destiné à la caractérisation du comportement hygrothermique des parois est tout d'abord présenté. Les résultats de la caractérisation des propriétés thermiques en régime permanent et en régime dynamique des parois en bois sont également détaillés et analysés. Cette partie est particulièrement intéressante pour les constructeurs partenaires du projet car elle a permis d'évaluer des propriétés de parois, telles que la résistance thermique, le déphasage thermique et l'amortissement, souvent mal estimées et pourtant indispensables à la conception thermique des parois. L'autre travail rapporté dans cette partie concerne la phase de validation de l'outil numérique de simulation des transferts couplés de chaleur et de masse à l'échelle de la paroi développé dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS. Nous y détaillons les expériences de validation réalisées sur des échantillons de parois et la confrontation des résultats obtenus avec les résultats prédits par le modèle numérique. Nous aborderons ensuite la confrontation des résultats expérimentaux avec la prédiction du logiciel commercial WUFI afin de comparer le caractère prédictif du logiciel TRANSBATIBOIS avec celui de cet outil reconnu et largement utilisé dans le domaine du bâtiment.

La troisième partie de ce travail concerne les travaux expérimentaux réalisés à l'échelle de l'enveloppe. Nous abordons dans un premier temps les mesures réalisées à l'échelle de modules expérimentaux. Cette partie présente les résultats comparatifs du comportement en conditions climatiques extérieures de plusieurs enveloppes simples développées sur la base de différents systèmes constructifs bois. Les détails constructifs et l'instrumentation des

modules sont tout d'abord détaillés. Nous présentons par la suite les résultats expérimentaux obtenus sur les premiers mois de fonctionnement des dispositifs et permettant d'évaluer l'impact de différents paramètres sur le confort intérieur et la performance hygrothermique des enveloppes. Une analyse des consommations énergétiques des différents systèmes constructifs étudiés est également donnée. Un comparatif de ces consommations mesurées avec les valeurs calculées par le logiciel commercial Pléiades-Comfie est également abordé dans cette partie.

Dans la quatrième et dernière partie, nous présentons les dispositifs de suivi de bâtiments en utilisation mis en place dans le cadre de l'étude. Pour ces bâtiments, la métrologie installée et les premiers résultats obtenus sont présentés. Les résultats d'instrumentation de ces bâtiments seront utilisés ultérieurement pour la validation du code numérique à l'échelle du bâtiment développé dans le cadre du projet.

CHAPITRE I.

I. Les transferts couplés chaleur-masse dans la construction

I.1. Caractérisation, formulation et modélisation des transferts de chaleur et de masse

I.1.1. Physique des transferts

I.1.1.1. Transfert de chaleur

Dans le domaine du bâtiment, le transfert de chaleur est le processus de transmission de l'énergie d'un milieu à un autre à travers l'enveloppe sous l'effet d'un gradient de température. En général, cette forme d'énergie se propage dans les matériaux à travers les trois modes de transfert de chaleur suivants :

- la conduction,
- la convection,
- le rayonnement.

a) Conduction

En conduction, la chaleur se transfère par vibration interne des molécules. Ce type de transfert est régi par la loi de Fourier :

$$\vec{Q}_{cond} = -\lambda \cdot \vec{grad}T \cdot dA \quad (1.1)$$

Où :

Q_{cond} : flux de chaleur par conduction(W)

λ : conductivité thermique du matériau (W.m⁻¹.K⁻¹)

T : température (°C)

A : surface du matériau

La densité de flux de chaleur q_{cond} (W.m⁻²) est la quantité de chaleur traversant 1 m² de matériau et est exprimée par la relation :

$$\vec{q}_{cond} = -\lambda \cdot \vec{grad}T \quad (1.2)$$

A travers les parois du bâtiment, le flux de chaleur est presque unidirectionnel, ce qui donne en régime permanent la relation suivante pour un flux de chaleur traversant une épaisseur d de matériau :

$$Q_{cond} = -\lambda.A.\frac{(T_2 - T_1)}{d} = \lambda.A.\frac{(T_1 - T_2)}{d} \quad (1.3)$$

où $T_1 > T_2$

Dans le domaine du bâtiment, différentes grandeurs sont utilisées pour qualifier le transfert de chaleur par conduction dans l'enveloppe :

La conductivité thermique d'un matériau traduit la quantité de chaleur le traversant par unité d'épaisseur et de surface et pour une différence de température de 1K de part et d'autre du matériau. Pour un matériau poreux, on parle de conductivité thermique équivalente car la propriété mesurée prend en compte le rayonnement et la convection au sein des pores du matériau.

La résistance thermique d'une couche de matériau d'épaisseur d caractérise sa résistance à s'opposer au flux de chaleur qui le traverse :

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}) \quad (1.4)$$

Pour une paroi, la notion de coefficient de transmission thermique U_{paroi} (1.5), traduit la quantité de chaleur traversant cette paroi par unité de surface et pour une différence de température de 1K de part et d'autre de la paroi. En pratique, elle est mesurée avec la résistance thermique de la paroi par la méthode de la boîte chaude gardée (EN 8990, 1996).

$$U_{paroi} = \frac{1}{R_{paroi}} = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \sum_i R_i} \quad (\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}) \quad (1.5)$$

Avec :

R_{si} : résistance de surface intérieure ($\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$)

R_{se} : résistance de surface extérieure ($\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$)

R_i : résistance de chaque matériau i constituant la paroi ($\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$)

Lors d'un transfert de chaleur à travers un composant du bâtiment qui était initialement à l'équilibre thermique, la capacité de ce composant à résister au changement de température induit par la diffusion de chaleur caractérise son inertie thermique. Cette propriété trouve surtout son importance en été car elle conditionne très souvent le confort thermique intérieur du bâtiment. En effet, plus l'inertie d'un bâtiment est élevée et plus le temps mis par l'onde de chaleur extérieure pour traverser l'enveloppe et atteindre l'intérieur du bâtiment sera élevé. Une bonne conception valorisant l'inertie du bâtiment permet ainsi d'avoir l'élévation de température intérieure plutôt en soirée lorsque l'extérieur du bâtiment s'est déjà rafraîchi. L'inertie thermique dépend essentiellement de la chaleur spécifique, de la

conductivité thermique et de la densité du matériau. Elle est caractérisée par l'effusivité thermique et la diffusivité thermique. L'effusivité thermique d'un matériau est une grandeur physique qui caractérise sa capacité à absorber ou à restituer de l'énergie à son environnement.

$$\text{Effusivité thermique : } e_{th} = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}) \quad (1.6)$$

La quantité de chaleur stockée pendant un temps t est donnée par :

$$Q = e_{th} \sqrt{t} \quad (\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (1.7)$$

La diffusivité thermique définit la capacité d'un matériau à se chauffer rapidement, cette grandeur permet de déterminer la profondeur à laquelle une onde de chaleur pénètre dans un matériau donné après un temps t .

$$D_{th} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (1.8)$$

Profondeur de pénétration d'une onde de chaleur dans le matériau après un temps t :

$$p = \sqrt{D_{th} t} \quad (\text{m}) \quad (1.9)$$

b) Convection

En physique du bâtiment, le transfert convectif est le processus par lequel la chaleur est transportée d'un point à un autre par un flux de fluide qui est principalement l'air. Dans ce domaine, le transfert de chaleur par convection a lieu généralement sous la forme de :

- Convection forcée : ce type de transfert résulte d'une force extérieure telle que le vent atmosphérique ou un ventilateur. La convection forcée rencontrée typiquement dans le domaine du bâtiment est celle ayant lieu entre l'air et la surface du matériau de revêtement de l'enveloppe. Le flux convectif est alors régi par la loi de Newton et en régime stationnaire on aura :

$$q_{conv} = h_{conv} \cdot (T_s - T_a) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (1.10)$$

Où :

h_{conv} : coefficient de transfert de chaleur convectif ($\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_s : température de surface du matériau (K)

T_a : température de l'air ambiant (K)

- Convection naturelle : la convection naturelle caractérise un mouvement de fluide (généralement l'air) induit par un gradient de température au sein du fluide. Dans le bâtiment, ce gradient est du aux matériaux qui encadrent la lame d'air et qui sont à des températures différentes.

c) Rayonnement

Le transfert radiatif s'effectue par transmission d'une énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Dans le domaine du bâtiment, deux types de rayonnement peuvent être rencontrés : le rayonnement infrarouge (grande longueur d'onde, émis par les parois) et le rayonnement solaire (courte longueur d'onde). Le calcul simplifié du transfert radiatif dans le bâtiment (EN ISO 8990) définit un coefficient d'échange surfacique par rayonnement, qui, avec le coefficient d'échange surfacique par convection donne le coefficient d'échange thermique surfacique total h_e (1.11). Ce coefficient étant l'inverse de la résistance thermique superficielle R_{se} extérieure d'une paroi.

$$R_{se} = \frac{1}{h_e} = \frac{1}{h_{conv} + h_{ray}} \quad (1.11)$$

Pour un matériau donné, la quantité d'énergie émise dépend de sa surface et du traitement qui y est appliqué. Cette quantité d'énergie est généralement définie par l'émissivité ε qui est le rapport entre l'énergie réellement émise par le matériau est celle qui est émise par un corps noir (corps idéal qui émet le maximum d'énergie). Dans la physique du bâtiment, si l'on considère l'absorptivité d'une surface comme égale à son émissivité, la densité de flux radiatif q_{rad} ($W.m^{-2}$) émise par la surface est donnée par la relation 1.12.

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_i^4) \quad (1.12)$$

Où :

ε : émissivité

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$)

T_s : température de surface

T_i : température ambiante

I.1.1.2. Transfert d'humidité

L'humidité dans un matériau poreux peut transiter sous différentes formes et de différentes manières, selon la force motrice qui gouverne le mode de transfert. Le Tableau 1 donne les différents mécanismes de transfert d'humidité (vapeur et liquide) qui pourraient se produire dans les différents composants du bâtiment. Dans cette étude, nous étudierons seulement les plus importants modes de transfert en relation avec le travail présenté ici, à savoir : le transfert de vapeur par diffusion, le transfert de vapeur par convection et la migration capillaire.

Tableau 1. Les différents mécanismes de transport dans les composants du bâtiment (Künzel, 1995)

| <i>Mécanisme de transport</i> | <i>Force motrice</i> | |
|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Transport de vapeur | Diffusion de vapeur | Pression de vapeur |
| | Transport moléculaire (effusion) | Pression de vapeur |
| | Convection | Pression totale |
| Transport de liquide | Migration capillaire | Succion capillaire |
| | Migration d'eau liée | Teneur en eau |
| | Flux gravitationnel | Gravité |
| | Flux hydraulique | Différence de pression totale |
| | Électrokinésie | Champs électrique |
| | Osmose | Concentration ionique |

a) Humidité d'un matériau

Humidité de l'air

L'air est un mélange complexe de plusieurs gaz dont la vapeur d'eau. La teneur en vapeur d'eau de l'air peut s'exprimer à travers différents paramètres physiques.

La pression partielle de vapeur d'eau, notée p_v , est la pression exercée par la vapeur contenue dans l'air. La vapeur d'eau étant considérée comme un gaz parfait, la relation 1.11 donne l'expression de p_v .

$$p_v = \frac{v.R.T}{M_v} \quad (\text{Pa}) \quad (1.13)$$

Où :

v : humidité volumique de l'air (kg.m^{-3})

R : constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J. mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

T : température (K)

M_v : masse molaire de l'eau (18 g.mol^{-1})

L'humidité absolue représente la masse de vapeur d'eau contenue dans une masse d'air sec. Elle est donnée par la formule suivante :

$$HA = \frac{m_{vapeur}}{m_{air\ sec}} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (1.14)$$

Du fait de l'équilibre gaz-liquide de l'eau, l'air ne peut contenir qu'une quantité limitée de vapeur d'eau à une température donnée. La valeur maximale de vapeur d'eau contenue dans l'air saturé est appelée pression de vapeur saturante p_{sat} (Pa).

On définit alors la notion d'humidité relative de l'air ϕ (%) qui est le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau sur la pression de vapeur saturante.

Le transfert de vapeur d'eau dans l'air immobile s'effectue par diffusion et est régi par la loi de Fick. La densité de flux de vapeur d'eau est alors proportionnelle au gradient de pression partielle de vapeur d'eau entre deux points (1.12).

$$\vec{g}_v = -\delta_a \cdot \vec{grad}P_v \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (1.15)$$

Où δ_a est la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$).

Comportement hygroscopique d'un matériau

A l'équilibre, la teneur en eau d'un matériau est fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. Cette dépendance entre la quantité d'eau emmagasinée et l'humidité relative ambiante est décrite par les isothermes de sorption/désorption du matériau.

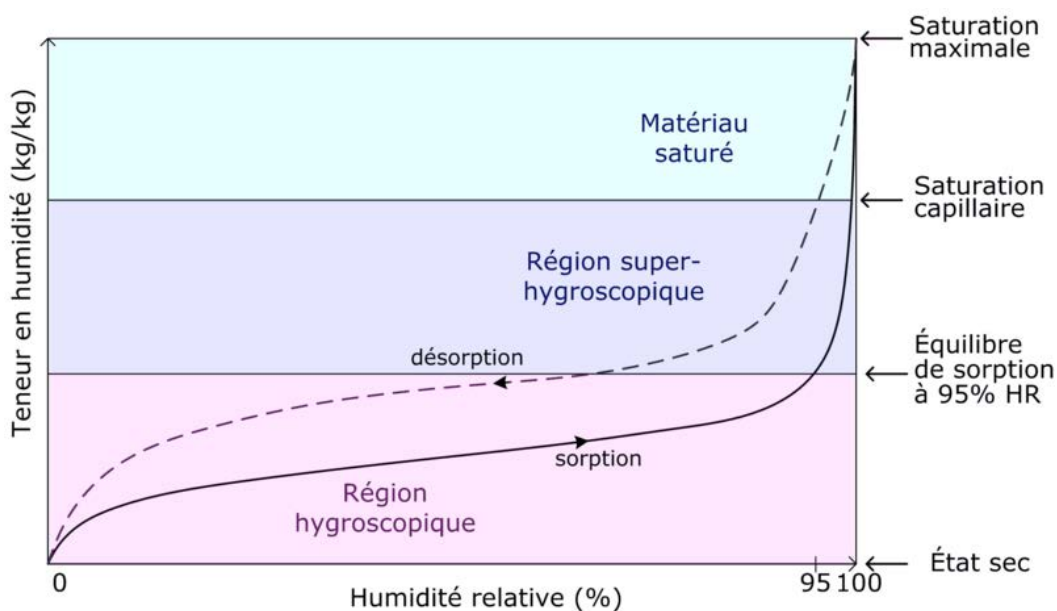


Figure 1. Allure générale d'une isotherme de sorption/désorption

Le comportement des matériaux hygroscopiques au cours du stockage/déstockage d'humidité est caractérisé par trois régions illustrées sur la courbe de sorption/désorption :

- *La région hygroscopique* (0 - 95% HR): dans cette région, l'eau transportée est essentiellement sous forme d'eau adsorbée/liée. À faible humidité relative, l'eau est adsorbée sur les parois des pores en couches monomoléculaires. A une humidité relative plus élevée, l'adsorption s'effectue en couches multimoléculaires. Lorsqu'un pore est rempli d'eau, la

condensation capillaire apparaît mais il n'y a pas de continuité d'eau liquide à l'échelle macroscopique.

- *La région super-hygroscopique* : lorsque suffisamment de pores sont remplis d'eau, l'eau est transportée également sous forme liquide jusqu'à atteindre la condensation capillaire. La teneur en eau maximale d'un matériau en contact avec de l'eau liquide est dans ce cas appelée teneur en eau de condensation capillaire.
- *La région saturée* : la saturation maximale est difficile à atteindre car de l'air résiduel est facilement piégé dans les pores du matériau. L'état de saturation maximale ne peut être atteint que dans le cas où une pression extérieure artificielle est appliquée sur les faces du matériau ou bien lorsque l'on applique un vide pour enlever les poches d'air résiduelles (Krus & Kiessl, 1998, Kunzel, 1995).

La teneur en eau d'équilibre d'un matériau est différente pour un processus de prise d'humidité (sorption) et un processus de séchage (désorption). Ce phénomène est appelé hystérésis. La quantité d'eau retenue lors d'une désorption est supérieure à la quantité adsorbée et la différence dépend essentiellement des propriétés des pores du matériau (dimension moyenne et répartition). La courbe de sorption suffit généralement à décrire le stockage d'humidité dans un matériau de construction.

b) Transfert de vapeur par diffusion

Dans les différents matériaux de construction, la vapeur d'eau peut migrer au sein d'un matériau sous l'effet d'un gradient de concentration en vapeur d'eau ou d'un gradient de température. La diffusion de vapeur sous l'effet du gradient de température, aussi appelée thermodiffusion, est généralement négligeable dans les composants du bâtiment. La diffusion de vapeur est dans ce cas décrite par la loi de Fick où la force motrice la plus communément utilisée est le gradient de pression partielle de vapeur d'eau. La dépendance de la densité de flux de vapeur d'eau ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) avec la pression partielle de vapeur d'eau pour un transfert monodimensionnel est dans ce cas donnée par :

$$g_v = -\delta_v \frac{\delta p_v}{\delta x} \quad (1.16)$$

Où δ_v est la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$). Cette propriété définit le taux de vapeur d'eau pouvant traverser en une seconde une épaisseur de 1 m de matériau pour une différence de pression partielle de vapeur d'eau de 1 Pa de part et d'autre du matériau.

On définit alors la propriété du matériau à s'opposer au transfert de vapeur d'eau par le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur μ (-) donné par :

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_v} \quad (1.17)$$

Pour les films et membranes, ce coefficient est le plus souvent exprimé par l'épaisseur d'air équivalente S_d (m) qui représente l'épaisseur d'air ayant la même résistance à la vapeur d'eau que le matériau.

$$S_d = \mu \cdot d \quad (1.18)$$

On peut également utiliser la résistance à la diffusion de vapeur d'eau Z_v ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} \cdot \text{kg}^{-1}$) donnée en 1.16 ou la perméance W_v qui est l'inverse de Z_v pour s'affranchir de l'épaisseur du matériau.

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (1.19)$$

c) Transfert de vapeur par convection

L'air circulant dans le matériau peut également véhiculer de l'humidité. Ce mécanisme est alors nommé transfert par convection ou advection et dépend principalement de la quantité d'air et de la teneur en humidité de l'air en mouvement. Le flux d'air est donné par :

$$\vec{g}_a = -k_a \cdot \vec{\text{grad}}P \quad (1.20)$$

La quantité d'humidité transportée par convection est donc donnée par l'équation ci-après :

$$\vec{g}_{\text{conv}} = -HA \cdot k_a \cdot \vec{\text{grad}}P \quad (1.21)$$

d) Transfert d'eau liquide

Dans le domaine de la condensation capillaire, le transfert d'eau liquide par conduction est le mécanisme de transfert d'humidité prédominant. Il s'effectue sous l'effet du gradient de pression de succion.

I.1.1.3. Transferts couplés de chaleur et de masse

Dans la physique du bâtiment, les différentes propriétés des matériaux et leur dépendance avec la température et l'humidité entraînent une interaction quasi permanente entre le transfert de chaleur et le transfert d'humidité dans les principaux composants de l'enveloppe du bâtiment.

Le taux d'humidité d'un matériau influe sur la conduction de chaleur à travers les parois d'un bâtiment via la dépendance de la conductivité thermique du matériau avec son taux d'humidité.

Lors de la migration d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment, un changement de phase accompagnant la diffusion d'humidité (adsorption ou désorption) engendre également un flux de chaleur latente.

Dans les matériaux hygroscopiques, la température influe sur l'humidité relative et donc sur l'équilibre de sorption du matériau. Une variation de température au sein de la paroi entraînera une modification locale du taux d'humidité du matériau concerné qui pourrait entraîner un transfert de masse au sein de la paroi.

I.1.2. Modélisation numérique des transferts

I.1.2.1. Echelle paroi

L'une des premières méthodes utilisées pour la conception hygrothermique des parois est celle de Glaser, développée en Allemagne, qui permet de tracer le profil de pression partielle de vapeur d'eau dans une paroi lorsque celle-ci est en régime permanent. Cette méthode permet d'avoir une approche simplifiée du comportement hygrothermique d'une paroi, d'estimer le risque de condensation et d'en déduire la quantité de condensat dans la paroi.

Depuis plusieurs années, de nombreux modèles numériques de simulation des transferts couplés de chaleur, de masse et/ou d'air ont été développés afin d'optimiser au mieux les performances hygrothermiques des parois. La liste donnée ci-après n'est pas exhaustive mais donne les principaux outils utilisés habituellement pour traiter des problématiques de transferts HAM (Chaleur – Air – Masse) à travers les parois.

- WUFI (Wärme Und Feuchte Instationär - chaleur et humidité transitoires) est un modèle de simulation des transferts couplés de chaleur et de masse développé par le Fraunhofer IBP (Institut de Physique du Bâtiment) en Allemagne. Ce logiciel qui est disponible en version commerciale est largement utilisé en Europe et aux Etats-Unis pour prédire les mouvements d'humidité dans les enveloppes du bâtiment (Kunzel, 1995, Kunzel et Kiessel, 1997). Pour la simulation des transferts à l'échelle de la paroi, le logiciel est disponible en version 1-D et 2-D.
- 1-D HAM (Heat Air Moisture) est un logiciel de simulation des transferts couplés Chaleur – Air – Masse en une dimension développé par l'Université de Technologie de Gothenburg, en Suède et l'Institut de Technologie de Massachusetts, aux Etats-Unis (Kalamees et Vinha, 2003).
- Le programme MATCH a été développé au Laboratoire de l'isolant thermique de l'Université Technique de Danemark. C'est un code de simulation des transferts couplés de chaleur et d'humidité en une dimension à travers les enveloppes de construction (Kalamees et Vinha, 2003).
- DELPHIN est un code de calcul des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité développé par l'Institut de la Climatologie du Bâtiment (IBK) à Dresde, en Allemagne (Grunewald et al, 2007).
- CHAMPS-BES est par ailleurs un logiciel développé conjointement entre le BEESL (Laboratoire de l'Energie du bâtiment et des systèmes environnementaux, Université de

Syracuse, Etats-unis) et l'Institut de la Climatologie du Bâtiment (IBK). Outre le comportement hygrothermique d'enveloppes du bâtiment, ce logiciel intègre également la simulation des émissions de polluants dans le bâtiment (Grunewald et al, 2007).

- BuildingPore (Rémond et Perré, 2008) est une version adaptée pour le bâtiment du code de calcul *Transpore* (Perré, 1990, Perré et Turner, 1999). Ce dernier outil a été initialement développé pour la simulation du processus de séchage d'une planche de bois. Le code intègre la migration capillaire de la phase liquide, la diffusion-convection de la phase gazeuse et la diffusion de l'eau adsorbée lors des transferts de masse. Le bilan énergétique, quant à lui, tient compte de la conduction, de la chaleur latente de vaporisation, de la chaleur différentielle de sorption et de la convection au sein du milieu poreux. Des modifications ont été apportées au code *Transpore* dans le cadre de l'ANR TransBatiBois, afin d'obtenir un outil permettant de simuler les transferts couplés chaleur-masse dans des parois multicouches du bâtiment et intégrer l'hystérésis des isothermes de sorption (Almeida, 2011).

Ces différents programmes ont pour la plupart été utilisés dans des campagnes de confrontation avec des résultats expérimentaux de suivi du comportement hygrothermique de parois, aussi bien dans une démarche de validation du modèle que dans des travaux de comparaison des modèles entre eux.

Dans une étude comparative de la dynamique de séchage de différentes parois en ossature bois par la simulation numérique par WUFI-2D et des résultats expérimentaux, il en ressortait que les parois étudiées possédaient une capacité de séchage réelle supérieure à ce que prédisait le code. Une explication donnée dans l'étude est la possible existence d'un ou plusieurs phénomènes influant sur le processus de transfert d'humidité mais qui ne sont pas pris en compte par le modèle (Teasdale-St-Hilaire et Derome, 2007).

Les résultats de confrontation de 1-D HAM, MATCH et WUFI avec les résultats expérimentaux ont montré l'utilité et la validité de ces modèles dans l'évaluation du comportement hygrothermique des enveloppes du bâtiment. Néanmoins, les résultats obtenus ont montré que ces modèles, bien que très avancés, présentent certaines difficultés à reproduire correctement le comportement hygrothermique des parois contenant des matériaux hygroscopiques (Kalamees et Vinha, 2003). En effet, la dépendance des propriétés de transfert avec la température et l'humidité est souvent difficile à mesurer et à prendre en compte dans les modèles. Pourtant, ce paramètre pourrait s'avérer important dans le processus de transport d'humidité à travers l'enveloppe. Pour comprendre de manière plus précise le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiment, il est donc nécessaire de recourir à des campagnes expérimentales de mesure des transferts de chaleur et d'humidité à l'échelle de la paroi et à l'échelle de l'enveloppe (Kalamees et Vinha, 2003).

1.1.2.2. Echelle enveloppe

A l'échelle de l'enveloppe, différents modèles numériques d'aide à la conception et à la prédiction du comportement hygrothermique des bâtiments se sont également développés ces dernières années. La majorité des outils existants sont les fruits de projets de recherche et diffèrent souvent par les potentiels de transfert d'humidité choisis et les mécanismes de

transfert pris en compte. Parmi les modèles existants, citons les logiciels commerciaux HAM-Tools de l'université de Technologie de Chalmers en Suède (Kalagasidis et al, 2007) TRNSYS (TRNSYS) et Wufi-Plus, développé par le Fraunhofer IBP (Institut de Physique du Bâtiment) en Allemagne (Lengsfeld et Holm, 2007).

Bien que très avancés dans la prédiction des transferts couplés de chaleur et de masse à l'échelle du bâtiment, ces logiciels présentent quelques faiblesses lorsqu'il s'agit de prédire le comportement hydrique de bâtiments incluant des parois à base de bois ou d'autres matériaux hygroscopiques.

Lors de la validation expérimentale de l'outil numérique HAM-BE (Heat, Air, Moisture), les processus de séchage de différentes configurations de parois en ossature bois ont été comparés. Ces parois ont été intégrées dans des cellules-test dans lesquelles des scénarios de production d'humidité ont été créés afin d'évaluer la dynamique de séchage des parois. Les résultats de confrontation ont montré quelques différences entre les résultats mesurés et les résultats simulés par le code (Li et al, 2009).

Dans le cadre de l'Annexe 41 de l'IEA (International Energy Agency), une large campagne expérimentale en régime transitoire des transferts couplés de chaleur, de masse et d'air dans l'enveloppe du bâtiment a été menée afin de comparer les résultats avec les prédictions de douze outils numériques de simulation des transferts à l'échelle de l'enveloppe. L'objectif était de vérifier la fiabilité de ces outils grâce à la confrontation avec les résultats expérimentaux. Les expériences étaient menées dans des cellules-test dont les dimensions sont représentatives des pièces d'un bâtiment. Le principe de chaque expérience était de mesurer l'influence des matériaux sur la capacité de tampon hygroscopique des parements intérieurs de chaque cellule. Les résultats obtenus ont montré une très bonne corrélation entre les humidités relatives intérieure mesurée et calculée (coefficient de corrélation 97%) dans le cas d'un parement intérieur non hygroscopique. Par contre, les 12 modèles testés ont eu plus de difficultés à simuler l'humidité relative intérieure dans le cas d'un parement intérieur hygroscopique (coefficient de corrélation : autour de 80%) (Holm et Lengsfeld, 2007).

Dans ce chapitre traitant de la physique des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans la construction et de leur modélisation notamment à l'échelle de la paroi et à l'échelle de l'enveloppe, un point important est à retenir : les transferts d'humidité dans une paroi sont régis par plusieurs mécanismes dont certains sont interdépendants avec les transferts de chaleur. Pour les matériaux hygroscopiques en particulier, ces transferts d'humidité sont difficiles à reproduire numériquement. D'autant plus que pour les matériaux hygroscopiques, le comportement en humidité est plus complexe du fait de la dépendance de leur teneur en eau avec l'humidité relative et donc avec la température, entraînant ainsi des mouvements d'humidité souvent négligés mais qui peuvent être importants dans certains cas. Pour toutes ces raisons, il a été démontré que les modèles numériques, bien que performants et très avancés, rencontrent des difficultés lorsqu'ils simulent le comportement en humidité des matériaux hygroscopiques.

Compte tenu de l'importance de plus en plus grande donnée à ce genre de matériaux pour leur contribution au confort intérieur et à la performance des bâtiments, il est nécessaire de recourir à des validations expérimentales pour mieux comprendre la dynamique des transferts couplés de chaleur et d'humidité aussi bien à l'échelle de la paroi qu'à l'échelle de l'enveloppe.

I.2. Approche expérimentale des transferts couplés chaleur-masse dans le bâtiment

Compte tenu de l'importance des mesures expérimentales aussi bien pour la validation des outils numériques que pour la compréhension des phénomènes physiques gérant le comportement thermique et hydrique des enveloppes de construction, des études ont été consacrées à la caractérisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans le bâtiment. Les études exposées ci-après ne sont qu'une partie de ces travaux de recherche réalisés sur les transferts couplés chaleur-masse dans les enveloppes de construction. Elles concernent surtout les mesures réalisées à l'échelle de la paroi et à l'échelle de l'enveloppe et consacrées à l'impact des transferts sur le climat intérieur et les consommations d'énergie.

I.2.1. Mesures à l'échelle de la paroi

I.2.1.1. Dispositifs expérimentaux

L'étude des performances énergétiques des bâtiments est logiquement abordée par la compréhension du comportement du composant élémentaire que constitue la paroi, en réponse à des sollicitations climatiques stationnaires ou dynamiques. Les dispositifs expérimentaux existants, destinés à mesurer les transferts de chaleur à travers une paroi, sont essentiellement des bancs expérimentaux conçus sur la base des méthodes de la boîte chaude gardée ou calibrée décrites dans la norme EN 8990. L'installation est composée de deux caissons semi-ouverts, appelés chambre chaude et chambre froide, régulés en température, et parfois capables de reproduire des conditions climatiques proches des conditions réelles extérieures et intérieures. L'installation d'une paroi entre ces deux caissons (Figure 2 à Figure 5) permet de l'exposer aux sollicitations climatiques choisies. Le suivi de l'évolution de la température sur les faces ou même au sein de la paroi permet d'estimer différentes propriétés telles que la résistance thermique ou le coefficient de transmission thermique pour des mesures réalisées en régime permanent. Ghazi Wakili et Tanner (2003) ont utilisé un dispositif type boîte chaude calibrée pour mesurer le coefficient de transmission thermique en régime permanent d'un mur en briques d'argile poreuses. Dans les boîtes chaudes calibrées, en régime établi, l'estimation du flux de chaleur se fait par mesure de la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir constante la température de la boîte chaude. Le même type d'essai peut être réalisé suivant le principe basé sur la méthode de la boîte chaude gardée (EN 8990). Cette deuxième méthode diffère de la méthode à la boîte chaude calibrée par le type de dispositif utilisé. En effet, le dispositif de base est le même et une deuxième boîte, appelée boîte chaude gardée et de taille plus petite, est installée dans le caisson

intérieur et maintenue à la même température que ce dernier. La mesure de la quantité d'énergie utilisée pour maintenir constante la température de la boîte chaude gardée permet de calculer le flux de chaleur total traversant la paroi. Ce genre de dispositif a par exemple été réalisé pour mesurer les coefficients de transmission thermique de parois incluant des isolants sous vide Nussbaumer et al (2006) et lors d'un travail de validation des outils numériques HEAT2 et HEAT3 pour caractériser le comportement de plusieurs échantillons de parois légères (Rose et Svendsen, 2004). Le dispositif boîte chaude gardée peut également être adapté pour la mesure du coefficient de transmission thermique des parois vitrées (Fang et al, 2006). La mise en place d'équipements de régulation et de mesure adéquats sur ce genre de dispositif permet également de mesurer le comportement thermique d'une paroi en régime transitoire, comme décrit par Lacarrière et al (2006) et Brahami et al (2007).

D'autres études, traitant du comportement hygrothermique des parois, ont également utilisé des dispositifs expérimentaux similaires à celui de la boîte chaude gardée en adaptant une régulation d'humidité au dispositif de base pour imposer des sollicitations climatiques couplés en température et humidité. Les dispositifs présentés ci-après possèdent au moins une chambre climatique régulée au moins en température et humidité relative de l'air, seules les spécificités de chaque dispositif seront précisées.

Une double enceinte climatique de simulation du comportement stationnaire ou transitoire de parois est installée à l'Université de Technologie de Tampere en Finlande et permet la caractérisation du comportement aussi bien thermique qu'hydryque d'une paroi donnée (Kalamees et Vinha, 2003, Vinha 2007). Le dispositif est installé dans une pièce climatisée dont la température peut être contrôlée entre -35 et 20°C, imposant la température de la chambre froide reproduisant habituellement les conditions extérieures. Les dimensions de l'enceinte permettent le test d'une paroi de 1,2 m de large et 1,2 m de haut avec une épaisseur maximale de 40 cm.

Le même genre de dispositif, avec des dimensions plus petites est également installé à la Faculté d'Ingénierie Civil de Prague. Ce dispositif a été utilisé pour évaluer expérimentalement la performance hygrothermique d'isolants intégrés dans des configurations de parois (Pavlik et Cerny, 2008).

A l'université de Concordia (Montréal, Canada), une enceinte climatique comportant également deux enceintes a été construite. Le côté froid de l'enceinte peut reproduire une température allant de -40 à 50°C et une humidité relative entre 10 et 90% tandis que le côté chaud peut être régulé entre 4 et 60°C. La particularité de cette installation est sa grande dimension qui permet le test de paroi de 7 m * 4,1 m * 0,6 m (Fazio et al, 1993, Fazio et al, 1997). Récemment, cette installation a été utilisée pour simuler les transferts d'humidité à travers les ouvertures horizontales d'un bâtiment expérimental à deux niveaux régulé en intérieur et exposé à des sollicitations climatiques proches des conditions réelles sur site en extérieur. La grande enceinte climatique a dans ce cas permis de reproduire les sollicitations en température et humidité relative extérieures imposées au bâtiment expérimental (Vera et al. 2008, Vera et al, 2010).

Le CNRC (Conseil National de Recherche Canada) dispose d'une enceinte climatique permettant d'imposer des conditions climatiques intérieures et extérieures entre -47 et 48 °C

avec des humidités allant de 10 à 100%. Les dimensions de l'enceinte permettent de tester des parois de 2,43 m * 2,43 m. Ce dispositif est particulier en son genre car il est équipé d'un système de pesée de la paroi, permettant ainsi de suivre la dynamique de séchage de la paroi entière soumise à des conditions proches des conditions réelles (Maref et al, 2002, Maref et al, 2004).

Quelques dispositifs sont schématisés ci-après.

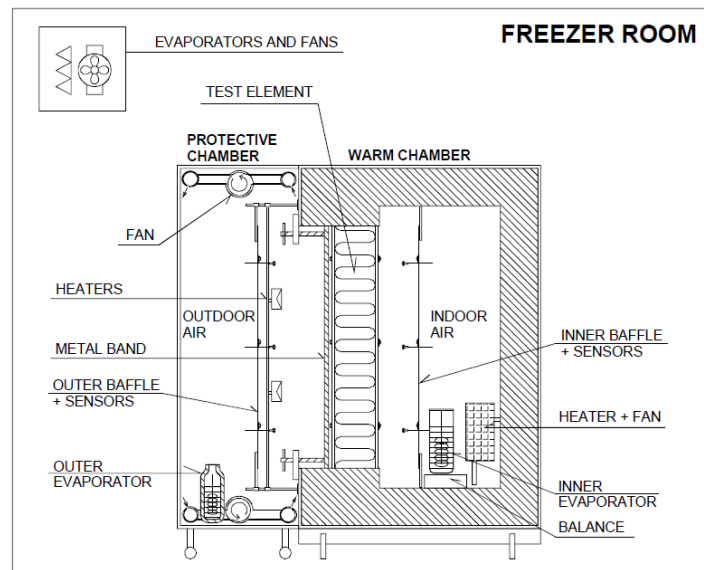


Figure 2. Dispositif expérimental de test de parois à Tampere, Finlande (Vinha, 2007)

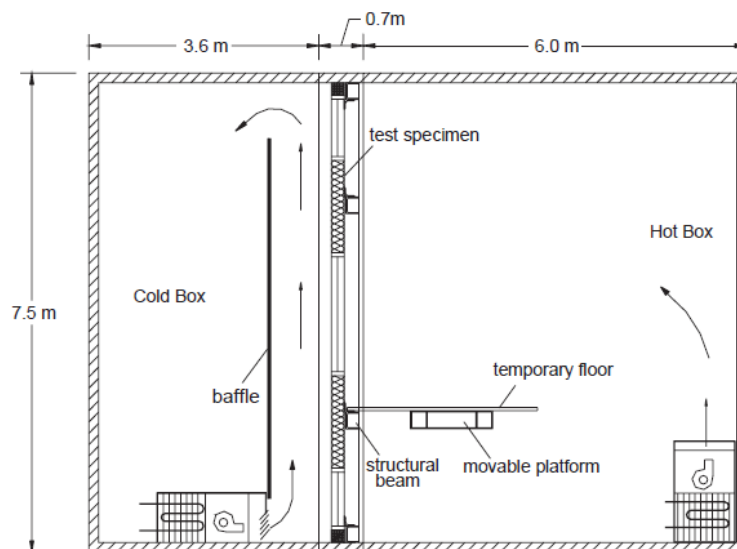


Fig. 1. Test setup in an environmental chamber.

Figure 3. Chambre climatique, Université de Concordia (Ge et Fazio, 2004)

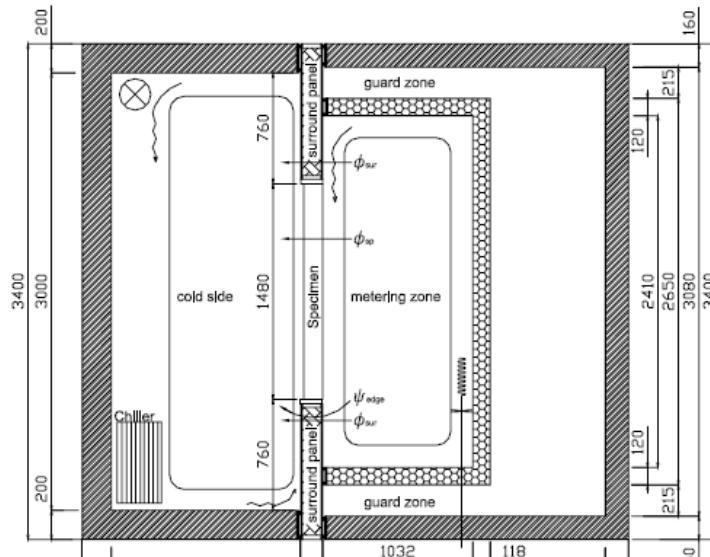


Figure 4. Dispositif type boîte chaude gardée de test de parois (Nussbaumer et al, 2006)

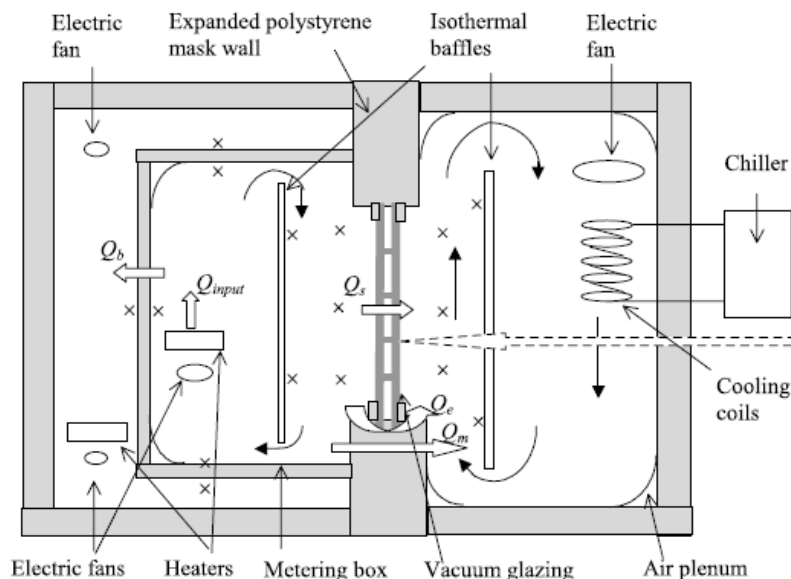


Figure 5. Dispositif de test de vitrages et de parois (Fang et al. 2006)

I.2.1.2. Etudes antérieures

La méthode de conception optimisée d'enveloppes la plus communément utilisée ces dernières années a été la simulation numérique à l'aide d'outils de prédiction du comportement hygrothermique de parois. Cette méthode étant beaucoup moins coûteuse et peu longue. En effet, les expérimentations réelles, bien que plus précises, sont souvent onéreuses et nécessitent un temps de réalisation beaucoup plus long. Néanmoins, ces mesures expérimentales sont nécessaires pour la validation des modèles. C'est pourquoi, la plupart des mesures expérimentales réalisées sur des parois réelles avaient comme objectif la confrontation du comportement hygrothermique de parois soumises à des sollicitations climatiques à celui prédit par des modèles numériques à valider (Belarbi et al (2008),

Kalamees et Vinha (2003), Maref et al (2004), Teasdale-St-Hilaire et Derome, 2007). Les conditions imposées représentent donc le plus souvent des valeurs moyennées ou lissées pour confronter plus facilement aux résultats des modèles et ne permettent donc pas toujours de caractériser le comportement réel de la paroi testée dans des conditions dynamiques réalistes.

Dans le bâtiment, la gestion du mouvement d'humidité est une problématique qui nécessite d'être prise en compte lors de la conception de l'enveloppe. Une optimisation des composants d'enveloppes permettrait de limiter la quantité d'humidité traversant les parois et d'éviter au maximum les problèmes pouvant altérer la pérennité du bâtiment (développement fongique, détérioration du matériau). Cette optimisation de l'enveloppe peut être réalisée en évaluant expérimentalement la capacité de séchage des parois. En effet, lorsqu'une trop grande quantité d'eau pénètre dans la paroi, l'évacuation de cette humidité dépend principalement des propriétés des matériaux. Une méthode a été nouvellement développée pour évaluer la capacité de séchage des parois en ossature bois. Elle consiste à utiliser un système de génération de vapeur pour imposer une charge d'humidité directement entre les montants d'ossature et à évaluer par gravimétrie la quantité d'humidité absorbée par les montants et les matériaux environnants pour en déduire la capacité de séchage de la paroi (Alturkistani et al, 2008).

Les risques liés à l'excès d'humidité dans la paroi dépendent de plusieurs facteurs dont les plus importants sont entre autres les climats intérieur et extérieur. Les différentes couches de matériaux composant une paroi influent également énormément sur la performance hydrique de cette dernière. Vinha (2007) a montré lors d'une campagne d'études sur la performance hygrothermique de plusieurs parois à ossature bois, que les parois ayant un ratio (rapport entre la résistance à la diffusion de vapeur du parement intérieur de la paroi et celle du parement extérieur) de résistance à la diffusion de vapeur inférieur à 5 :1 ne présentaient aucun risque de développement fongique ni de condensation alors que les parois avec un ratio supérieur à 5 :1 étaient plus exposées à des risques liés à l'humidité. L'étude réalisée a donc montré que le problème d'humidité provenait surtout de la diffusion depuis l'intérieur vers l'extérieur. Dans les conceptions courantes, une trop grande résistance à la diffusion de vapeur côté intérieur limite également la capacité de séchage de la paroi. Mao et al (2009) a effectivement observé lors d'essais de suivi de la capacité de séchage de plusieurs configurations de parois à ossature bois que l'utilisation d'une membrane de régulation de vapeur du côté intérieur de la paroi diminuait de façon significative la capacité de séchage des parois car elle empêchait l'évacuation de l'humidité vers l'intérieur.

I.2.2. Mesures à l'échelle de l'enveloppe

I.2.2.1. Dispositifs de suivi d'enveloppes exposées à un climat réel

Le suivi d'une maison d'habitation de 107 m² située à Lieto en Finlande est rapporté par Vinha (2007). Les façades du bâtiment sont à ossature bois et isolées avec de la ouate de cellulose, la façade sud est équipée de sondes de température, d'humidité et de vitesse d'air. Un suivi des conditions intérieures et extérieures de la maison a également été réalisé. Le suivi du

comportement hygrothermique des parois a permis de comparer leur comportement lorsqu'elles sont exposées au climat extérieur à celui reproduit en laboratoire.

En Norvège, un bâtiment-test situé à Trondheim a été utilisé au cours d'une campagne expérimentale de quatre ans visant à suivre le comportement de plusieurs configurations de parois installées sur le bâtiment (Geving & Uvsløkk, 2000). Au total 16 parois à ossature bois composent les façades est et ouest du bâtiment ce qui a permis de caractériser le comportement à long terme sur site des différentes parois et d'en établir un comparatif en fonction des différents éléments qui les constituent. Les parois testées avaient toutes le même type d'isolant (laine de verre) et différaient par leurs parements intérieurs (fibres de bois ou plaque de plâtre), leurs pare-vapeurs (polypropylène ou polyéthylène) et leurs panneaux de contreventement/pare-pluie (fibres de bois, plaque de plâtre ou polyéthylène).

Un bâtiment-test dénommé VLIET a été construit sur le site de l'université de Leuven en Belgique. Un compartiment du bâtiment a été isolé et comporte une façade de test orientée Nord-Est et constituée par un mur à ossature bois. La métrologie mise en place sur le site permet le suivi de la température, de l'humidité et du flux de chaleur traversant la paroi. Des suivis de la différence de pression de part et d'autre du mur et des données météorologiques du site sont également réalisés. Le mur est divisé en trois parties verticales qui diffèrent par la résistance à la diffusion de vapeur et la perméabilité à l'air des parements intérieurs. Des scénarios de production d'humidité et de ventilation ont été reproduits à l'intérieur du bâtiment afin de suivre la réponse de la paroi en température et humidité. Le suivi, réalisé pendant un an et demi, visait à constituer des données expérimentales de validation d'un modèle numérique tout en évaluant le comportement hygrothermique de murs à ossature bois (Desta et al, 2011).

Le Vetenskapsstaden est un bâtiment à plusieurs niveaux situé à Stockholm, en Suède. Ce bâtiment expérimental est assez particulier car il est constitué de modules préfabriqués de murs et de planchers en bois massif. Ce bâtiment-test possède 36 appartements sur trois étages, et comprend quatre niveaux (le dernier étage étant un duplex). Tous les parements intérieurs des appartements sont en bois massif et les façades extérieures sont isolées avec de la laine de verre. Plusieurs appartements de ce bâtiment ont été instrumentés lors d'une campagne pour caractériser l'influence du bois massif sur le confort intérieur. Plusieurs sondes de température et d'humidité ont ainsi été installées aussi bien à l'intérieur des appartements qu'à différentes épaisseurs dans les parois en bois massif pour suivre l'évolution des transferts hygrothermiques et évaluer le confort intérieur (Hameury et Lundstrom, 2004).

Dans le cadre du projet de recherche ANR OPTIMOB, une cellule expérimentale de 21 m² (surface intérieure) a été construite sur le site du CSTB (Centre Technique et Scientifique du Bâtiment) à Grenoble. Cette étude a permis de caractériser le comportement hygrothermique d'une maison à ossature bois (transfert dans les parois, consommation énergétique, ponts thermiques etc.) et valider un modèle numérique de simulation des transferts couplés à l'échelle de l'enveloppe (Piot, 2009, Piot et al (2011)). La conception de la cellule permet de modifier la composition des parois et de tester ainsi différentes. A part le suivi des profils de température et d'humidité dans les parties courantes des parois, des points particuliers tels

que les montants et les angles sont également instrumentés. La réponse des parois à différents scénarios de charge d'humidité est également étudiée.

Une autre cellule expérimentale (dimensions extérieures : 4,7 x 4 x 4,4 m³ et dimensions intérieures : 4,4 x 3,7 x 2,7 m³) est également installée sur la plateforme d'essais du site du CSTB à Grenoble. Utilisée dans le développement d'un nouveau concept d'enveloppe hybride à haute performance énergétique, la cellule intègre les principes de base d'une construction bioclimatique et est équipée de capteurs solaires thermiques et de façades modulables intégrant des matériaux à changement de phase (Faure, 2007).

Deux pièces mitoyennes sont installées dans un bâtiment de Fraunhofer IBP (Institut de Physique du Bâtiment), en Allemagne, et exposées au climat extérieur sur l'une de leurs faces. L'installation a servi à l'étude de la capacité de tampon hygroscopique de différents matériaux de parement intérieur par comparaison avec du plâtre. La première pièce dite de référence possède un parement intérieur en plâtre peint tandis l'autre pièce possède le parement intérieur testé (Kunzel et al, 2004).

Un bâtiment-test à deux niveaux est également installée à l'université de Concordia (Montréal, Canada). Les deux pièces (3,62 x 2,44 x 2,43 m³ chacune) sont reliées par une large ouverture permettant une circulation entre les deux pièces. La construction est représentative d'un système à ossature bois canadien et chaque pièce est dotée d'équipements de chauffage et de génération de vapeur. Contrairement aux autres systèmes décrits précédemment, ce bâtiment n'est pas exposé au climat réel mais est installé à l'intérieur d'une grande enceinte climatique qui impose les conditions extérieures au bâtiment. Cette installation a été utilisée pour tester l'influence de différents paramètres (température, ventilation) sur le flux de vapeur échangé entre les deux pièces à travers l'ouverture horizontale (Vera et al, 2008, Vera et al, 2010).

Une large campagne expérimentale a été conduite dans 12 départements français afin de caractériser la performance énergétique de 20 maisons en bois massif (Raji, 2006). Dans le cadre de la campagne, les bâtiments ont été équipés de capteurs de température et d'humidité relative dans différentes pièces. La consommation énergétique des bâtiments pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire a été mesurée à l'aide de compteurs électriques. L'étude a permis de comparer les besoins énergétiques réellement mesurés sur les maisons à la prédiction des logiciels réglementaires et d'établir également un comparatif entre le niveau de confort intérieur mesuré et celui calculé par les codes réglementaires.

1.2.2.2. Confort intérieur

Les conditions intérieures d'un bâtiment ont une influence importante sur le ressenti et la santé des occupants qui pour certains, peuvent passer une majeure partie de leur temps à l'intérieur plutôt qu'à l'extérieur du bâtiment. Depuis plusieurs années, de nombreuses études ont permis de déterminer les différents facteurs d'influence sur la perception du confort par les occupants. La diversité de ces facteurs rend souvent la définition du mot confort très complexe. Selon les différents travaux de recherche sur le confort intérieur rapportés dans la littérature (Frontczak et Wargocki (2011), Corgnati et al (2007), Huang et al (2012)), quatre paramètres principaux permettent de définir cette notion de confort intérieur, à savoir :

- Le confort thermique : un bâtiment est considéré comme remplissant les conditions de confort thermique lorsque la température ressentie n'est ni trop chaude ni trop froide.
- Le confort visuel : défini par différentes propriétés de l'environnement visuel telles que la distribution de la luminance, la couleur de la lumière artificielle ou la quantité de lumière naturelle de jour.
- Le confort acoustique : en général, assurer un confort acoustique revient à minimiser les risques d'inconfort liés aux conditions acoustiques.
- La qualité de l'air intérieur : un air de bonne qualité et acceptable se traduit par une ambiance exempte de contaminants et de substances dangereuses.

Pour simplifier la détermination du confort intérieur, les études font souvent abstraction d'un ou plusieurs des paramètres cités précédemment. Parmi ces quatre notions de confort, le confort thermique de l'environnement intérieur est celui qui est le plus souvent considéré comme facteur principal permettant d'assurer une satisfaction des occupants vis-à-vis de la qualité de leur environnement intérieur, selon une étude résumant les différents travaux antérieurs réalisés dans ce domaine (Frontczak et Wargocki, 2011). Le confort thermique dépend principalement de la température de l'air, de la température moyenne rayonnante (température de surface), de l'humidité intérieure ainsi que des mouvements d'air à l'intérieur de l'habitat. Cette notion de confort est donc étroitement liée à la qualité du bâtiment et aux conditions extérieures. La température et l'humidité intérieures sont des facteurs importants et fréquemment étudiés dans le domaine du bâtiment car ils agissent aussi bien sur le confort thermique que sur la perception de la qualité de l'air respiré par les occupants et sur leur santé (Fang et al, 1998, Toftum et al, 1998).

Par la suite et également pour la partie de notre étude traitant du confort intérieur, nous avons choisi de nous focaliser sur l'évaluation de la température et de l'humidité intérieures et l'influence de l'enveloppe du bâtiment sur ces paramètres.

Température intérieure :

L'enveloppe du bâtiment agit directement sur la température de surface. Comme elle assure la transition entre l'extérieur et l'intérieur de l'habitat, l'enveloppe conditionne également la température d'air et le taux d'humidité intérieure.

Pour assurer un niveau de confort acceptable, la température de l'air doit présenter une faible variation temporelle et être homogène dans l'espace. L'optimisation de l'enveloppe pour un bon confort thermique intérieur revient donc à assurer une bonne isolation thermique qui limiterait les échanges avec l'ambiance extérieure. A ceci doit être couplé une bonne inertie thermique qui permettrait de limiter l'effet des variations de température extérieure sur le confort intérieur. En effet, une bonne inertie thermique de l'enveloppe permet de déphaser les pics de température extérieure (on parle alors de déphasage thermique) tout en amortissant les amplitudes de variation de température (amortissement), assurant ainsi une température intérieure quasi-stable dans le temps. Le déphasage thermique et l'amortissement sont des

paramètres utilisés dans le domaine du bâtiment pour caractériser la réponse d'une paroi aux ondes de chaleur extérieure. En effet, le déphasage thermique correspond au temps nécessaire à une onde de chaleur pour traverser une paroi de sa surface extérieure jusqu'à sa surface intérieure. Le déphasage thermique dépend de la diffusivité thermique de chaque matériau constituant la paroi. Le déphasage thermique peut être calculé par la formule ci-après :

$$\theta = \frac{24.d.\sqrt{\rho.\Pi.C_p}}{2\Pi\sqrt{24\lambda.3600}} \quad 1.22$$

Où :

- d : épaisseur du matériau (m)
- ρ : masse volumique du matériau (kg.m^{-3})
- C_p : la chaleur spécifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- λ : conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Le taux de réduction de l'amplitude de variations de la température entre la surface intérieure et la surface extérieure de la paroi désigne l'amortissement qui est donné par la relation suivante :

$$f = \frac{T_{i,\max} - T_{i,\min}}{T_{e,\max} - T_{e,\min}} \quad 1.23$$

Où $T_{i,\max}$ et $T_{i,\min}$ désignent respectivement la température maximale et minimale à la surface intérieure de la paroi. De même, $T_{e,\max}$ et $T_{e,\min}$ désignent respectivement la température maximale et minimale à la surface extérieure de la paroi.

La Figure 6 permet d'illustrer le déphasage thermique et l'amortissement pour une paroi donnée.

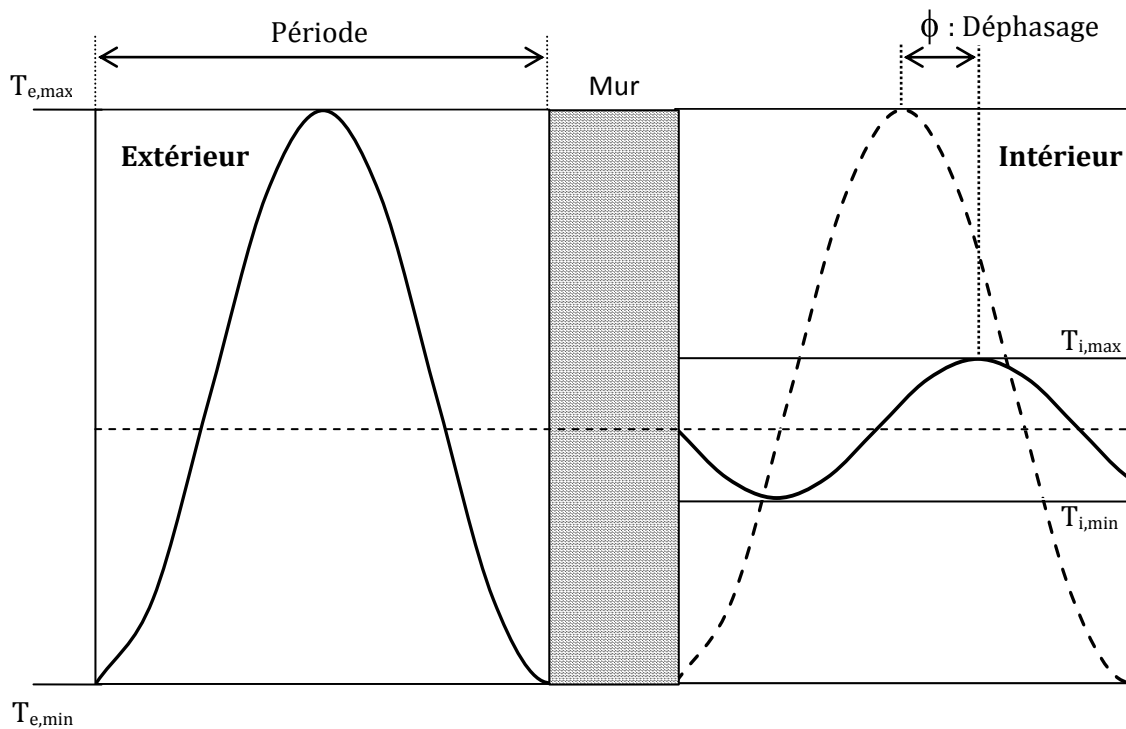


Figure 6. Représentation schématique du déphasage et de l'amortissement

Différentes méthodes permettent d'aborder la notion de confort hygrothermique, chaque méthode repose principalement sur des valeurs limites de température et d'humidité délimitant ce que l'on appelle la « zone de confort ».

D'une part, une méthode dénommée la méthode de Brager a été définie pour définir le niveau de confort thermique intérieur dans les bâtiments. Cette norme évalue le confort thermique intérieur en fonction de la température extérieure : la température prise en compte est la température résultante sèche prenant en compte la température d'air, la température de surface des parois et la vitesse d'air. La température limite supérieure de la zone de confort de Brager (Brager et De Dear, 2000) est donnée sur la Figure 7 et peut être caractérisée par la relation suivante, pour une limite d'acceptabilité du confort de 90%.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour } T_{ext} \leq 5^{\circ}\text{C} : T_{sup} = 22^{\circ}\text{C} \\ \text{Pour } 5^{\circ}\text{C} < T_{ext} < 33^{\circ}\text{C} : T_{sup} = \frac{9}{28}T_{ext} + 20,4^{\circ}\text{C} \\ \text{Pour } T_{ext} > 33^{\circ}\text{C} : T_{sup} = 31^{\circ}\text{C} \end{array} \right.$$

1. 24

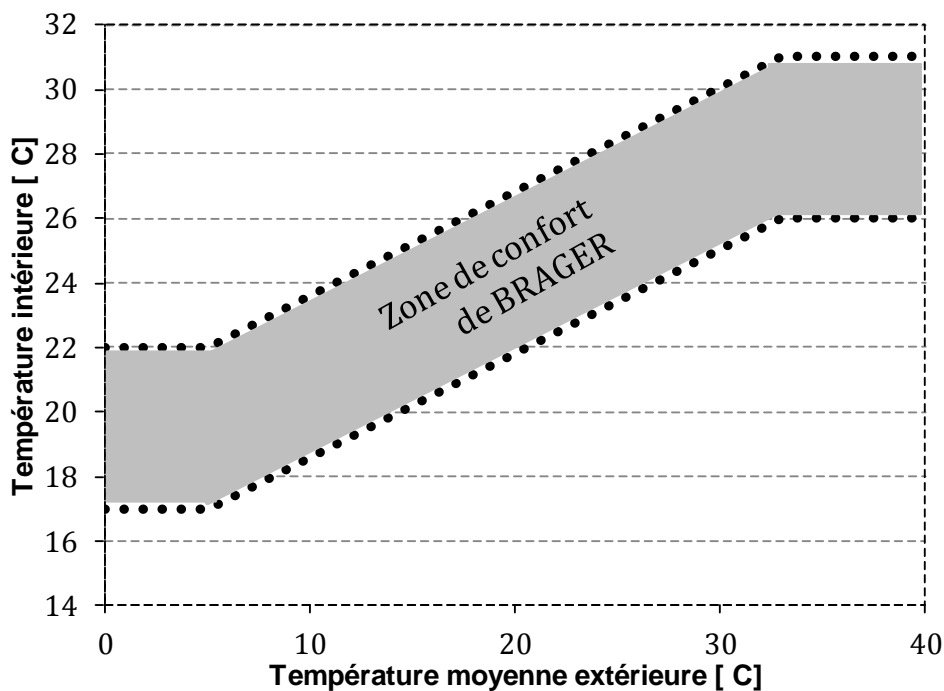


Figure 7. Zone de confort selon Brager

FANGER (Fanger & Toftum, 2002, Charles, 2003) a également développé un modèle de confort combinant quatre variables physiques (température, vitesse d'air, température moyenne et humidité relative) et deux variables personnelles (vêtue et activité des occupants) en un seul paramètre pour évaluer le niveau de sensation thermique d'un groupe de personnes dans un espace.

En général, d'après les études expérimentales d'évaluation du confort thermique, une zone de confort thermique en relation avec les conditions extérieures varie entre 20 et 26°C et 30 et 60%.

La gamme de température acceptable pour les occupants dépend de différents paramètres. Des mesures expérimentales ont été menées sur 120 personnes dans des bureaux afin d'identifier les valeurs acceptables pour les différents facteurs de confort. Selon les résultats obtenus, la gamme de température jugée acceptable par les occupants se situe entre 20,9 °C et 30,4 °C (Huang et al (2012)).

Humidité intérieure :

L'humidité intérieure est un paramètre ayant une influence importante aussi bien sur le confort thermique, notamment le confort respiratoire, que sur la qualité de l'air intérieure telle qu'elle est perçue par les occupants (Fang et al, 1998, Toftum et al, 1998). Les valeurs limites d'humidité intérieure souvent considérées comme acceptables dans différentes études se situent souvent entre 30 et 60% d'humidité relative. En effet, une humidité supérieure à 70% augmenterait le risque de développement fongique tandis qu'une humidité trop faible (inférieure à 30%) nuirait à la santé des occupants.

L'humidité intérieure d'une habitation ne correspond pas souvent à l'humidité recommandée pour assurer le confort des occupants, ce qui nécessite la mise en place de solutions

permettant d'ajuster cette humidité. Outre la solution de régulation de l'humidité par le renouvellement de l'air intérieur, les matériaux hygroscopiques constituant l'enveloppe d'un bâtiment, et plus particulièrement les matériaux de parement intérieur sont également capables de réguler l'humidité relative de l'air intérieur (Hameury 2005, Kunzel et al 2004, Osanyintola *et al* 2006, Osanyintola & Simonson 2006, Simonson *et al* 2004, James *et al* 2010). En effet, un matériau hygroscopique a la capacité d'absorber ou de restituer de l'humidité en fonction de l'humidité ambiante : si l'air intérieur est sec, le matériau va restituer de l'humidité à l'air ambiant jusqu'à atteindre l'équilibre de sorption, ce phénomène va donc rendre l'ambiance moins sèche. Inversement, pour une ambiance trop humide, le matériau hygroscopique va absorber le surplus d'humidité de l'air. Ce genre de matériau joue donc le rôle de tampon hygroscopique de l'air. Ainsi, en comparaison à des matériaux non hygroscopiques, les matériaux hygroscopiques comme la fibre de bois permettent de réduire les pics d'humidité intérieure et ainsi de diminuer le taux de renouvellement d'air requis pour maintenir une humidité intérieure acceptable pour la santé des occupants (Simonson et al, 2004). L'étude des transferts d'humidité et de chaleur dans les matériaux hygroscopiques prend donc de l'importance dans la mesure où l'hygroscopicité des matériaux est une méthode simple et non consommatrice d'énergie qui permet d'assurer un climat intérieur acceptable dans des régions à climat modéré.

L'impact des matériaux hygroscopiques sur le climat intérieur dépend de plusieurs facteurs. Dans une étude de simulation de l'évolution du climat intérieur d'une habitation avec un parement intérieur en bois massif, Hameury (2005) a montré que la capacité du bois à réguler l'humidité intérieure dépendait du taux de renouvellement d'air appliqué et de la surface de bois ouverte à la diffusion. Ainsi, lorsque le taux de renouvellement d'air est faible (de 0,25 à 0,5 vol/h), les fluctuations d'humidité intérieure sont peu importantes du fait du comportement hygroscopique du bois massif. A l'inverse, lorsque le taux de renouvellement d'air est élevé (supérieur à 0,8 vol/h), la régulation d'humidité intérieure par le matériau devient moins significative. Dans des cas où le bâtiment est en utilisation réelle, cette capacité hygroscopique des matériaux à tamponner les fluctuations d'humidité peut être masquée par l'influence plus prononcée du renouvellement d'air intérieur. Ce cas a été rencontré pour plusieurs bâtiments au cours d'une large campagne expérimentale réalisée en Finlande sur 170 maisons occupées dont plusieurs à ossature bois et d'autres en bois massif. Certaines maisons comportaient des parements intérieurs hygroscopiques tandis que d'autres comportaient des parements non hygroscopiques. Le système de ventilation diffère également d'une maison à une autre (ventilation naturelle ou mécanique). Les fluctuations d'humidité mesurées dans les différentes maisons instrumentées n'ont pas montré de différence réelle entre l'humidité intérieure mesurée dans le cas d'un parement hygroscopique et celle mesurée pour un parement non hygroscopique. Ce constat a été en partie attribué au taux de ventilation élevé des maisons ainsi qu'au traitement appliqué aux matériaux de parement intérieur qui est susceptible de modifier leur capacité de tampon hygroscopique (Kalamees et al, 2009).

Un autre facteur influant sur l'hygroscopicité est le type de matériau utilisé. En effet, dans l'étude menée sur les cellules-test du Fraunhofer IBP (Institut de Physique du Bâtiment) en Allemagne, le pouvoir de régulation de l'humidité de différents matériaux de parement

intérieur (lambris en épicéa, ossature avec isolation en fibre de cellulose et avec un parement intérieur en plâtre, éléments de paroi acoustique, rondins et panneau de bois) a été testé en imposant des scénarios quotidiens de production d'humidité dans deux cellules exposées au climat extérieur. Les résultats ont montré qu'à court terme le panneau de fibre de bois présentait la meilleure capacité de régulation de l'humidité en réduisant les fluctuations d'humidité intérieure de 80%. Le lambris en épicéa possède également un pouvoir tampon intéressant avec 50% de réduction des fluctuations d'humidité tandis que l'utilisation d'une paroi acoustique réduit les fluctuations d'humidité de 30%. Par ailleurs, pour une longue période de production d'humidité, les rondins en pin scandinave ont la plus grande capacité à réguler l'humidité intérieure (Kunzel et al, 2004).

Lors d'une campagne de suivi de plusieurs appartements du bâtiment Vetenskapsstaden en Suède, les profils de température et d'humidité ainsi que l'évolution de l'ambiance intérieure ont été mesurés pendant une période de chauffe (hiver) et une période chaude. Les résultats obtenus ont montré une longue période hivernale très sèche, avec une humidité relative souvent en dessous de 25%. Les conditions d'humidité enregistrées en été se situent dans l'intervalle de confort préconisé (entre 30 et 60%), avec une moyenne de 45%. La température intérieure en été est moins confortable car les valeurs mesurées excèdent souvent les 25°C (Hameury et Lundstrom, 2004).

1.2.2.3. Performance hygrothermique des enveloppes

Les transferts d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment peuvent avoir un impact non seulement sur sa durabilité des composants de cette enveloppe, mais également sur la qualité de l'air intérieur et l'efficacité énergétique de l'enveloppe.

A la fin des quatre années d'investigation sur les 16 parois en ossature bois testées sur le bâtiment situé à Trondheim en Norvège (cf. paragraphe 1.2.2.1), les mesures ont révélé des facteurs de risque pouvant induire des taux d'humidité élevés et critiques dans les parois : la résistance élevée à la diffusion de vapeur au niveau du pare-pluie ou les infiltrations d'air parasite dans les parois. Les mesures ont confirmé que le transfert d'air parasite dans la paroi est un facteur engendrant des problèmes beaucoup plus importants liés à l'humidité que le processus simple de diffusion de vapeur d'eau. Par ailleurs, les configurations de parois sans pare-vapeur intérieur n'ont pas montré de risque de taux d'humidité critiques comparées aux parois plus fermées à la vapeur d'eau (Geving & Uvsløkk, 2000).

Vinha (2007) a étudié la performance hygrothermique de parois en ossature bois ouvertes à la diffusion de vapeur avec une isolation en ouate de cellulose, intégrées à un bâtiment d'habitation situé sur la côte sud de la Finlande. Les résultats obtenus ont montré un bon comportement de la paroi orientée plein sud, qui, grâce à l'ensoleillement direct favorisant le séchage des matériaux, n'a pas montré des conditions d'humidité critiques pour le développement de moisissures ou la condensation. Vinha (2007) a également montré, lors du suivi du comportement d'une cellule-test avec des parois verticales en bois massif avec isolation par l'extérieur en ouate de cellulose et un bardage en bois, que le taux d'humidité de la lame d'air ventilée derrière le bardage était toujours plus faible ou égal à celui de l'air extérieur. L'étude a donc montré que les facteurs tels que la pluie, le vent, le rayonnement

solaire et le refroidissement de surface n'augmentaient pas l'humidité de la lame d'air ventilée pendant toutes les saisons.

I.2.2.4. Performance énergétique des constructions

Les matériaux hygroscopiques, de part leur comportement en humidité, agissent également sur la consommation énergétique des bâtiments. En effet, en période de chauffe, la nuit, lorsque la production d'humidité intérieure est élevée à cause de la présence des occupants, les matériaux hygroscopiques vont absorber le surplus d'humidité ambiante. Cette accumulation d'humidité va libérer de l'énergie à raison de 2,5 kJ/kg d'humidité adsorbée, réduisant ainsi la demande énergétique pour le chauffage du bâtiment.

Lors d'une étude numérique visant à caractériser l'impact de l'hygroscopicité des matériaux sur la performance énergétique des constructions, Osanyintola et Simonson (2006) ont comparé les besoins énergétiques en chauffage mesurés lors du suivi expérimental des appartements du bâtiment Vetenskapsstaden (bois massif en parement intérieur) (Hameury et Lundstrom, 2004), présenté dans le paragraphe I.2.2.1, avec les besoins en chauffage d'un bâtiment avec des matériaux non hygroscopiques. Ils ont montré que la chaleur générée par l'accumulation d'humidité dans les matériaux hygroscopiques en période d'occupation (nuit) diminue les besoins de chauffage du bâtiment de 10% comparés aux besoins de chauffage dans le cas de matériaux non hygroscopiques. Par contre, il y a peu de différence observée entre les deux cas pendant toute la durée de la période de chauffe. En effet, lors du processus de séchage de la paroi, l'évaporation de l'humidité accumulée génère un besoin énergétique qui va annuler le gain énergétique obtenu pendant le processus d'accumulation d'humidité.

Lors d'une étude visant à évaluer les performances énergétiques réelles de constructions en bois massif (Raji, 2006), où 20 maisons en rondins et en madriers ont été suivies, les résultats ont montré que les consommations réelles d'énergie pour le chauffage des bâtiments étaient pour la majorité (15 maisons sur les 20 instrumentées) inférieures aux prédictions du code de calcul réglementaire. D'autre part, l'épaisseur de la paroi n'a pas montré une influence importante sur la consommation énergétique, contrairement au mode et à la gestion du système de chauffage.

I.3. Conclusion

Actuellement, les nombreuses études consacrées aux transferts couplés de chaleur et de masse dans les constructions bois montrent l'importance donnée à cette thématique dans le milieu scientifique. A l'échelle de la paroi, peu de dispositifs permettent aujourd'hui de tester à la fois le comportement thermique et hydrique des constructions. La majorité des dispositifs existant étant consacrés uniquement à la caractérisation thermique des parois. A l'échelle de l'enveloppe, les dispositifs en climat extérieur existants intègrent souvent des parois modulables, permettant de tester différentes compositions de parois. Cependant, la comparaison du comportement de ces parois reste difficile car elles ne sont pas exposées simultanément aux mêmes conditions climatiques. Les résultats expérimentaux des études antérieures réalisées sur le comportement des enveloppes de constructions bois ont montré

la contribution des matériaux hygroscopiques au confort intérieur et à la performance énergétique des bâtiments. Par ailleurs, les études expérimentales antérieures présentées dans ce chapitre ont également montré l'influence du comportement en humidité des matériaux sur les risques liés aux problèmes de condensation dans les parois. Un verrou persiste néanmoins car les modèles numériques existants, bien que performants et très avancés, rencontrent des difficultés lorsqu'ils simulent le comportement en humidité des matériaux hygroscopiques. Une des raisons rendant complexe la modélisation du comportement de ces matériaux est la non prise en compte ou la méconnaissance de certaines propriétés impliquées dans les transferts chaleur-masse au sein des matériaux hygroscopiques.

Dans le travail de thèse présenté par la suite, nous avons conçu et construit un dispositif expérimental permettant d'imposer des conditions en température et en humidité à des échantillons de parois et de caractériser leur réponse en mesurant l'évolution des profils de température et d'humidité dans les différentes couches de matériaux. Par ailleurs, cinq modules-test de 3 m * 3 m, avec des parois représentant les principaux systèmes constructifs (ossature, bois massif contrecollés, rondins, madriers empilés) et comportant des matériaux différents (bois massif, panneaux contrecollés massifs, fibre de bois souple et rigide, ouate de cellulose, laine de verre, frein-vapeur, pare-vapeur) ont également été construits sur un même site. Ce concept est unique car il permet de comparer le comportement des différents systèmes constructifs exposés simultanément aux mêmes conditions climatiques. L'étude présentée par la suite vise également à contribuer, par le biais de campagnes expérimentales à l'échelle de la paroi et à l'échelle de l'enveloppe, à la validation d'un outil intégrant des paramètres souvent négligés dans les codes existants (hystérésis des isothermes de sorption, dépendance des isothermes de sorption avec la température) et qui sont importants dans les transferts couplés de chaleur et de masse au sein des matériaux hygroscopiques.

CHAPITRE II.

II. Etude des transferts chaleur-masse à l'échelle de la paroi

Etudier les transferts de chaleur et de masse en laboratoire sur des éléments de paroi de dimensions réelles a de multiples avantages. Cela permet de maîtriser parfaitement la conception et la mise en œuvre des composants de la paroi (échantillon représentatif étudié). Cela permet également de maîtriser au mieux les conditions de sollicitation de la paroi (contrôle précis des conditions de sollicitation et possibilité d'étudier des conditions extrêmes). Ceci permet surtout d'obtenir des données plus fiables pour la validation des modèles numériques et d'avoir une approche plus réaliste du comportement réel de ces parois lorsqu'elles sont intégrées à l'enveloppe du bâtiment exposé aux sollicitations climatiques sur site. Dans ce chapitre, nous exposons les travaux réalisés pour caractériser le comportement de parois en bois soumises à différents types de sollicitations climatiques. Afin d'obtenir des résultats illustrant la performance des différents modes de construction en bois, nous avons sélectionné des échantillons de parois représentatifs des différents systèmes constructifs bois existants.

L'objectif du travail présenté dans ce chapitre est de mieux évaluer expérimentalement à l'échelle de la paroi le comportement thermique et hydrique des constructions bois, en vue de déterminer leurs performances hygrothermiques d'une part, et de valider le modèle numérique développé dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS d'autre part.

Pour cette étude, une double enceinte climatique a été conçue pour la réalisation des essais de caractérisation du comportement hygrothermique des parois. Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons les caractéristiques du dispositif expérimental ainsi que l'instrumentation développée sur les parois-test.

Nous détaillerons ensuite les différents essais conduits sur le dispositif et terminerons ce chapitre par la présentation de l'ensemble des résultats expérimentaux et de confrontation.

Afin de mieux caractériser à l'échelle du bâtiment la performance énergétique des systèmes constructifs bois et leur contribution au confort thermique intérieur, nous avons choisi de caractériser pour différentes parois, les principales propriétés thermiques qui contribuent au comportement thermique global du bâtiment. Ensuite, nous cherchons, également à travers la caractérisation des parois, à mettre en évidence le rôle et l'importance des cavités (lames) d'air (fermées ou ouvertes) dans le comportement hygrothermique d'une paroi. Enfin, la troisième série d'essais réalisés et abordés dans ce chapitre concerne la mise en évidence des transferts couplés chaleur-masse dans différentes parois bois en vue de valider le modèle numérique BuildingPore développé dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS.

II.1. Dispositif expérimental

Le dispositif doit permettre de caractériser les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les parois. Il doit donc permettre d'imposer différentes conditions de sollicitation à la paroi afin de provoquer ces transferts. Le dispositif doit ensuite être capable de caractériser les transferts dont la paroi est le siège. Ce dispositif a été conçu et dimensionné pour permettre la réalisation d'expérimentations sur des échantillons de parois à échelle réelle, en permettant de reproduire soit des conditions stationnaires soit des conditions variables de température et d'humidité, reproduisant les conditions climatiques réelles voire extrêmes rencontrées sur site.

L'installation permet de tester des parois verticales mono ou multicouches de 2,80 m x 2,78 m (largeur x hauteur) avec une épaisseur pouvant aller jusqu'à 50 cm.

II.1.1. Principe du dispositif

Le dispositif expérimental développé pour cette étude est assimilable à une double enceinte climatique constituée de deux caissons semi-ouverts entre lesquels la paroi testée est installée. Les deux caissons, que l'on nommera pour la suite caisson intérieur et caisson extérieur, sont équipés de systèmes de régulation, permettant de reproduire respectivement des sollicitations climatiques intérieures et extérieures, en température et humidité relative de l'air proches des conditions réelles. Le dispositif devait également permettre d'envisager des conditions d'exposition extrêmes dites exceptionnelles en situation réelle.

Pour étudier les transferts couplés chaleur-masse dans la paroi, des conditions en température et humidité représentatives de celles observées dans les ambiances intérieure et extérieure d'une habitation sont reproduites dans les deux caissons de part et d'autre de la paroi. Ces conditions peuvent être soit stationnaires soit dynamiques selon le type d'essai réalisé. Les systèmes de mesure installés dans le banc expérimental permettent de suivre la réponse de la paroi testée suite à ces sollicitations imposées. On peut ainsi suivre l'évolution spatio-temporelle de la température et de l'humidité relative de l'air dans les deux ambiances. L'évolution temporelle des flux de chaleur et des profils de température et d'humidité dans la paroi est également suivie à l'aide de différents capteurs.

Ainsi, la conception de l'ensemble double enceinte climatique et boîte chaude gardée est en partie basée sur la norme EN 8990 de 1996, concernant la « détermination des propriétés de transmission thermique en régime stationnaire » à l'aide d'une boîte chaude gardée ou d'une boîte chaude calibrée. Lorsqu'une mesure de flux de chaleur est réalisée, un caisson isolé semi-ouvert, appelée boîte chaude gardée, est utilisé en complément de la double enceinte climatique. Cette boîte chaude gardée est accolée au centre de la paroi du côté du caisson intérieur simulant l'ambiance intérieure. Toutes les mesures de flux effectuées sont réalisées dans cette boîte afin de s'affranchir des effets de bord.

La Figure 8 décrit le principe de la double enceinte climatique et la Figure 9 donne sa vue d'ensemble.

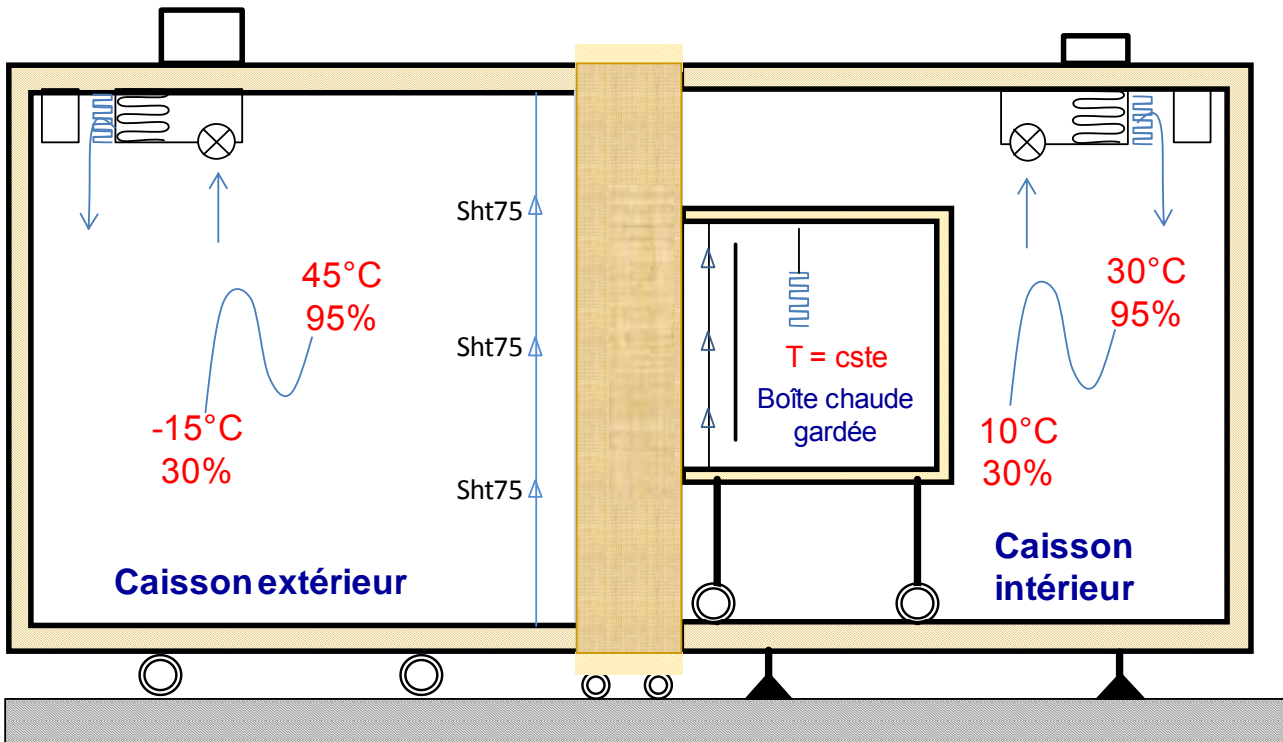


Figure 8. Schéma de principe de la double enceinte climatique

(a)



(b)



(c)



Figure 9. Double enceinte climatique a) vue d'ensemble, b) éléments de mesure et d'acquisition c) boîte chaude gardée

II.1.2. Caractéristiques techniques

La paroi extérieure de la double enceinte climatique a été conçue de manière à assurer une bonne isolation thermique ainsi qu'une très grande résistance aux transferts de vapeur et d'air. L'objectif étant de minimiser les flux de chaleur, d'air et d'humidité à travers les parois de l'enceinte. Les parois des caissons extérieur et intérieur sont constituées de 2 couches de panneaux en polyuréthane de 60 mm d'épaisseur chacun. L'épaisseur des parois est donc de 120 mm environ, le coefficient de transmission thermique U est de $0,21 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (données constructeur). Les panneaux d'isolant sont recouverts de chaque côté d'une feuille en aluminium assurant l'étanchéité à la vapeur d'eau des parois. La détection des fuites réalisée au cours de la mesure de la perméabilité à l'air des caissons a montré que les parois des

caissons étaient étanches à l'air. Les défauts d'étanchéité observés se trouvaient au niveau des jonctions entre les caissons et la paroi testée. Les caissons sont construits sur deux structures séparées : le caisson intérieur est fixe tandis que le caisson extérieur est muni de roues permettant son déplacement le long de rails implantés sur le sol, facilitant ainsi la mise en place des parois testées.

Les caractéristiques de chaque partie de la double enceinte climatique sont données ci-après.

a) Caisson extérieur

Le caisson extérieur est équipé de système de régulation permettant d'imposer une ambiance dite extérieure reproduisant les sollicitations climatiques extérieures d'un bâtiment. La température peut être imposée entre -15 °C et $+45\text{ °C}$ et l'humidité relative entre 30 % et 95 %. Ce caisson possède des dimensions extérieures de 2,78 m de haut, 2,80 m de large et 3 m de profondeur.

Le caisson est muni d'une pompe à chaleur assurant la déshumidification et le refroidissement de l'air ambiant. Trois ventilateurs installés à l'entrée du caisson aspirent l'air de l'enceinte et l'amène dans le circuit de traitement d'air. Une résistance électrique de 4000 Watts, installée à la sortie du circuit de traitement d'air, assure le chauffage de l'air sortant. Le système d'humidification consiste à vaporiser de l'eau alimentée en goutte à goutte sur une résistance électrique de 250 W.

b) Caisson intérieur

Les dimensions extérieures du caisson sont de 2,78 m de haut, 2,80 m de large et 3 m de profondeur.

Le système de traitement d'air du caisson intérieur est similaire à celui du caisson extérieur décrit auparavant, seules les puissances des éléments sont différentes. En effet, le caisson intérieur est équipé d'un compresseur d'une puissance plus faible et d'une résistance de chauffe de 2500 W. La puissance de la résistance d'humidification étant la même. Ces plus faibles puissances de refroidissement et de chauffage se justifient par des consignes en température plus faibles du côté intérieur. L'équipement du caisson permet de reproduire notamment une température entre 10 et 30 °C et une humidité relative de 30 à 95%, correspondant aux gammes d'ambiances à l'intérieur d'une habitation.

c) Boîte chaude gardée

La boîte chaude gardée, utilisée pour les mesures de flux, est installée dans le caisson intérieur. Ses dimensions extérieures sont de 1,4 m de haut, 1,4 m de large et 0,70 m de profondeur. Les parois de la boîte chaude gardée sont constituées de panneaux en polyuréthane de 60 mm d'épaisseur.

Selon la recommandation de la norme EN 8990, un déflecteur en panneau de Polychlorure de Vinyle (PVC) est installé parallèlement à la surface de la paroi testée, à une distance de 20 cm. Ce déflecteur permet de protéger la surface de la paroi testée du transfert radiatif émis par les

appareils utilisés et les parois de la boîte chaude gardée. Afin d'assurer une distribution uniforme de l'air parallèlement à la surface de la paroi testée, le déflecteur est muni d'ouvertures en bas et en haut, permettant la circulation de l'air en convection naturelle. Une résistance électrique de 55 W est installée derrière le déflecteur, pour assurer le maintien de la consigne de température dans la boîte chaude gardée.

II.1.3. Régulation du dispositif et acquisition des données

Le pilotage de la régulation en température et humidité relative de tout le dispositif expérimental se fait avec un logiciel développé sous LabVIEW (National Instruments). Ce même outil est également utilisé pour l'acquisition et l'enregistrement des différentes données mesurées au cours des essais. Pour cela, différents modules d'acquisition de la marque National Instrument, sont utilisés pour acquérir les données collectées par les différents éléments de mesure.

Le système d'acquisition, développé sous LabVIEW, est composé d'un ordinateur relié à deux stations d'acquisition, dénommées CompactRIO respectivement reliée à chaque caisson. Plusieurs modules sont connectés à chaque station :

- deux modules 9403 de type TOR (Tout Ou Rien), comportant chacun 31 voies et permettant la conversion des signaux numériques enregistrés par les capteurs Sensirion SHT75
- un module 9411 avec 6 voies de comptage d'énergie,
- un module 9205 avec 32 voies analogiques 0-10 V
- un module 9213 avec 16 voies thermocouples
- Un module à 8 entrées relais et un module à 8 sorties relais sont également connectés à chaque station pour la commande du système de régulation en température et humidité relative des deux caissons.

Grâce aux différents modules qui y sont connectés et à la programmation sous LabVIEW, ce système d'acquisition et de régulation permet :

- d'acquérir et d'enregistrer les valeurs mesurées par chaque capteur connecté au module d'acquisition
- de visualiser en temps réel sur un écran, les grandeurs mesurées. Chaque valeur enregistrée est ensuite envoyée vers une base de données de stockage.
- de superviser à distance la régulation et l'acquisition des données.
- d'introduire des fichiers de régulation en température et en humidité relative, constantes ou variables dans le temps.

II.1.4. Capacités de la double enceinte climatique

a) Vérification du système de régulation

Afin de vérifier le bon fonctionnement et la conformité de la double enceinte climatique au cahier des charges initial, des tests de vérification du système de régulation ont été réalisés pendant plusieurs semaines en imposant des rampes et des paliers de température et d'humidité compris entre les intervalles de régulation de la double enceinte. Ces tests ont montré que le système de régulation du dispositif permettait d'atteindre les consignes souhaitées de température et d'humidité relative imposées avec des vitesses de variation de température de 0,1 °C/min et d'humidification/déshumidification de 200 g/h. Le graphe suivant (Figure 10) montre l'un des résultats de ces tests de la régulation.

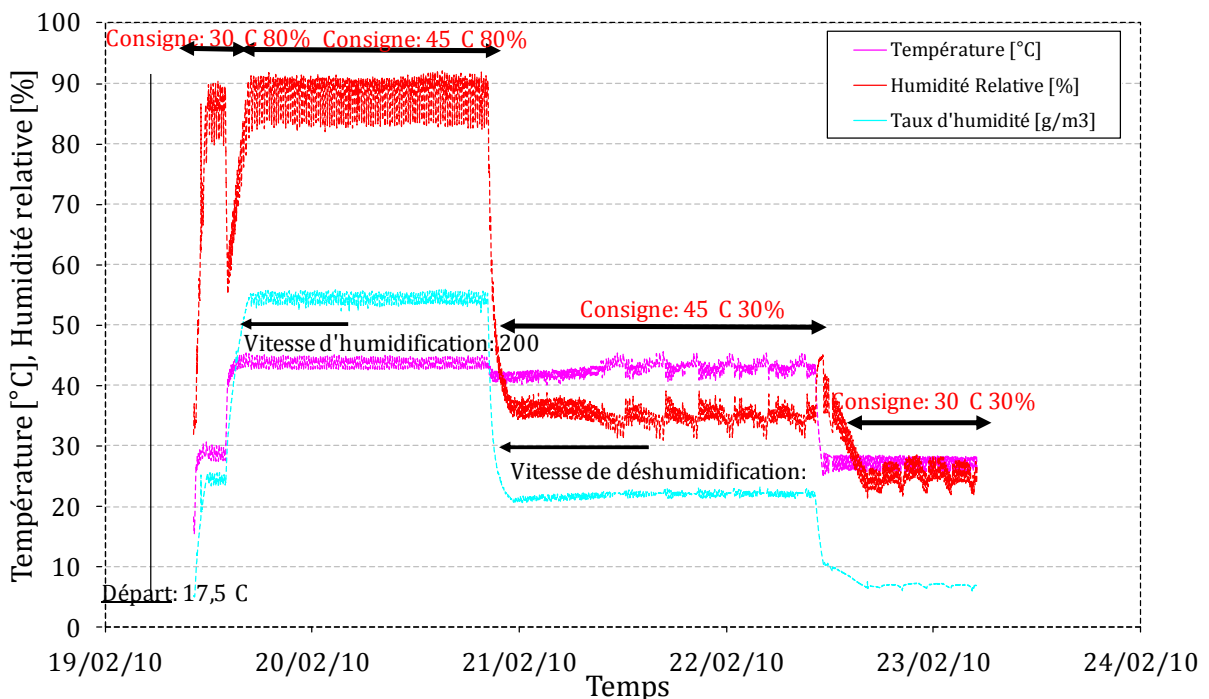


Figure 10. Capacité de régulation de la double enceinte climatique

b) Etalonnage du dispositif boîte chaude gardée

Pour des essais de caractérisation des parois basés sur la méthode de la boîte chaude gardée, le flux passant à travers la paroi testée est identifié comme étant la somme de la quantité de chaleur apportée par le système de chauffage utilisé pour maintenir une température constante dans la boîte et celle dissipée par tous les autres appareils se trouvant dans cette boîte. Cependant, des études antérieures (Guy et Nixon, Fazio et al, 1997) ont montré que des flux parasites peuvent passer à travers les parois de la boîte chaude gardée et au niveau de la jonction paroi/boîte chaude gardée. La chaleur fournie par les différents appareils au caisson de mesure devra donc être corrigée par ces flux parasites.

Un essai d'étalonnage du dispositif expérimental a donc été réalisé sur un panneau rigide de polyuréthane. Le caisson intérieur et la boîte chaude gardée sont maintenus à une température constante de 25°C et à 40% HR. Le caisson extérieur est maintenu à une température de 5°C et 80% HR. Le test est réalisé jusqu'à l'obtention du régime permanent (obtenu lorsque la quantité d'énergie fournie pour maintenir la boîte chaude gardée à la même température, ainsi que les températures de surface sont constantes (Norme EN ISO 8990). On mesure alors la chaleur Q_t apportée à la boîte de mesure pour maintenir la température constante dans la boîte chaude gardée (incluant la chaleur dissipée par les appareils).

Dans la mesure où la boîte chaude gardée n'est pas adiabatique, le bilan d'énergie est donné par la relation : $Q_t = Q_p + Q_m$ 1. 25

Avec : Q_t : quantité totale d'énergie apportée à la boîte par la résistance électrique et les ventilateurs.

Q_p : quantité de chaleur traversant la paroi

Q_m : perte totale de chaleur à travers la boîte chaude.

Afin de déduire le flux parasite Q_m à travers la boîte chaude gardée, le flux Q_p traversant la paroi est déterminé par la formule ci-après : $Q_p = \frac{1}{R} * A(T_{Si} - T_{Se})$ 1. 26

Où A : la surface de mesure dans la boîte chaude gardée,

T_{Si} : température moyenne de surface côté intérieur (côté chaud) du panneau

T_{Se} : température moyenne de surface côté extérieur (côté froid) du panneau ;

R : la résistance thermique du panneau de polyuréthane

Ainsi, nous avons : $Q_m = Q_t - (\frac{1}{R} * A(T_{Si} - T_{Se}))$ 1. 27

Le flux de chaleur parasite mesuré à travers les parois de la boîte chaude gardée est de 3,15 W/K.

II.2. Instrumentation des parois étudiées

II.2.1. Capteurs et technologies de mesure

Afin de suivre le comportement thermique et hydrique des parois, plusieurs grandeurs peuvent être mesurées selon le type d'essai réalisé, à savoir :

Température de surface

Pour la mesure de la température de surface, la norme ISO 8990, de décembre 1996, préconise l'utilisation de thermocouple de diamètre inférieur à 0,22 mm, appliqué à la surface.

En effet, ce genre de capteurs a l'avantage de ne pas modifier localement la température sur la zone de mesurage.

Pour la mesure des températures de surface de la paroi et des températures sur les surfaces de part et d'autre d'une lame d'air, des thermocouples de type T et de classe 1 ont été utilisés. Ce type de thermocouple a été choisi car il permet une mesure de température avec une précision de $\pm 0,5$ K entre -50 °C et 250 °C, ce qui permet d'avoir une continuité assez précise des mesures dans la paroi. D'autre part, le diamètre des conducteurs monobrins est de $0,2$ mm, ce type de capteur perturbe donc peu le milieu et ne modifie la température sur la zone de mesurage.

Température et humidité relative

Le principe adopté pour la mesure de la température et de l'humidité des matériaux consiste à insérer des capteurs de température et d'humidité relative de l'air à différents endroits dans l'épaisseur des matériaux. Ceci permet au capteur de mesurer la température et l'humidité relative de l'air qui l'entoure. Comme ce volume d'air autour du capteur est supposé en équilibre avec le matériau environnant, ceci permet de remonter à la teneur en eau du matériau environnant à chaque instant (Figure 14).

Afin de vérifier notre méthode de mesure de l'humidité, nous avons observé le comportement en humidité de deux matériaux hygroscopiques (isolant et bois massif) soumis à des variations de température et d'humidité relative. Les résultats présentés ci-après correspondent aux essais présentés dans le paragraphe II.3.3.3 et concernent la paroi en madriers empilés dont les caractéristiques sont illustrées sur la Figure 28.

La Figure 11 donne l'évolution de la température et de l'humidité relative de l'air mesurées dans l'isolant en fibres (bois/chanvre) de la paroi en madriers empilés. L'évolution de l'humidité relative calculée en supposant qu'il n'y a pas d'effet de l'hygroscopicité du matériau est également illustrée sur la même figure. Ce calcul a été effectué en utilisant la relation de dépendance de l'humidité relative avec la pression partielle de vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante ($HR = P_v / P_{sat}$), la courbe donnée par ce calcul ne prend donc pas en compte l'échange entre le matériau et l'air qui l'entoure.

L'évolution de l'humidité relative calculée montre qu'une augmentation de la température s'accompagne d'une baisse de l'humidité relative tandis qu'une diminution de la température entraîne une augmentation de l'humidité relative. Pourtant, les résultats de mesure dans l'isolant en fibre de bois et de chanvre montrent une tendance inverse. D'une part, lorsque la température augmente, l'humidité relative mesurée augmente également. D'autre part, une diminution de la température s'accompagne d'une baisse de l'humidité relative de l'air. Afin d'expliquer ce phénomène et également pour la suite de l'étude, nous avons choisi de présenter les variations d'humidité mesurées en humidité absolue. En effet, comme l'humidité relative est par défaut fortement liée à la variation de température, il est indispensable, afin d'interpréter correctement les résultats expérimentaux, de s'affranchir de la température. L'humidité absolue représente la masse de vapeur d'eau contenue dans une masse d'air sec en équilibre avec le matériau. Elle est donnée par la formule suivante :

$$HA = \frac{m_{\text{vapeur}}}{m_{\text{air sec}}} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

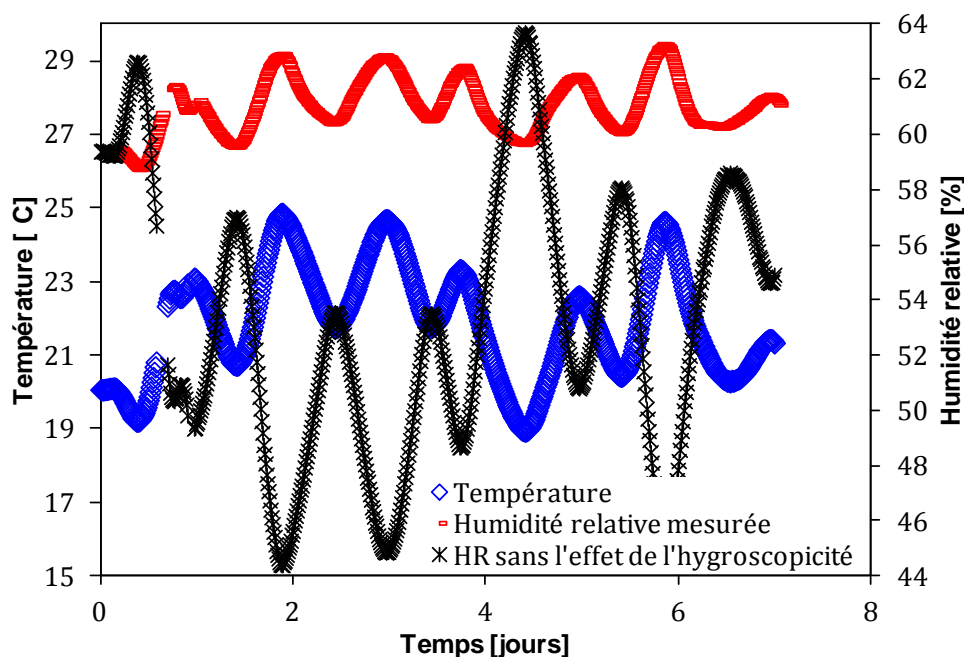


Figure 11. Evolution de la température et de l'humidité relative dans l'isolant en fibres de bois et de chanvre, à 90 mm de l'interface bois/isolant

La Figure 12 montre les évolutions de la température et de l'humidité absolue de l'air entourant les capteurs, mesurées dans l'isolant en fibres de bois et de chanvre présenté précédemment. La Figure 13 illustre l'évolution des mêmes paramètres dans le bois massif. Notons que la température et l'humidité absolue sont présentées sur deux axes séparés pour plus de lisibilité des graphiques.

Les résultats montrent qu'une augmentation de la température dans les matériaux entraîne une augmentation de l'humidité absolue de l'air entourant les capteurs. Le comportement inverse est observé lors d'une baisse de la température. Ce phénomène peut s'expliquer par le comportement hygroscopique des matériaux. En effet, lorsque la température augmente, l'humidité relative de l'air diminue induisant une diminution de la teneur en eau du matériau via les isothermes de sorption. Le matériau va donc libérer de l'humidité, ce qui entraîne une hausse de l'humidité absolue de l'air contenue dans la petite cavité entourant le capteur. Le même phénomène a été observé dans de précédentes études (Piot, 2009, Derome et al, 2009).

Ce comportement, bien qu'observé à l'intérieur de la paroi, se produit également lorsque les matériaux hygroscopiques sont utilisés en tant que parement intérieur dans l'habitat. La mise en équilibre de sorption de ce genre de matériaux contribuerait dans ce cas à limiter les variations d'humidité relative de l'air intérieur lors de fortes variations de température surtout en période estivale.

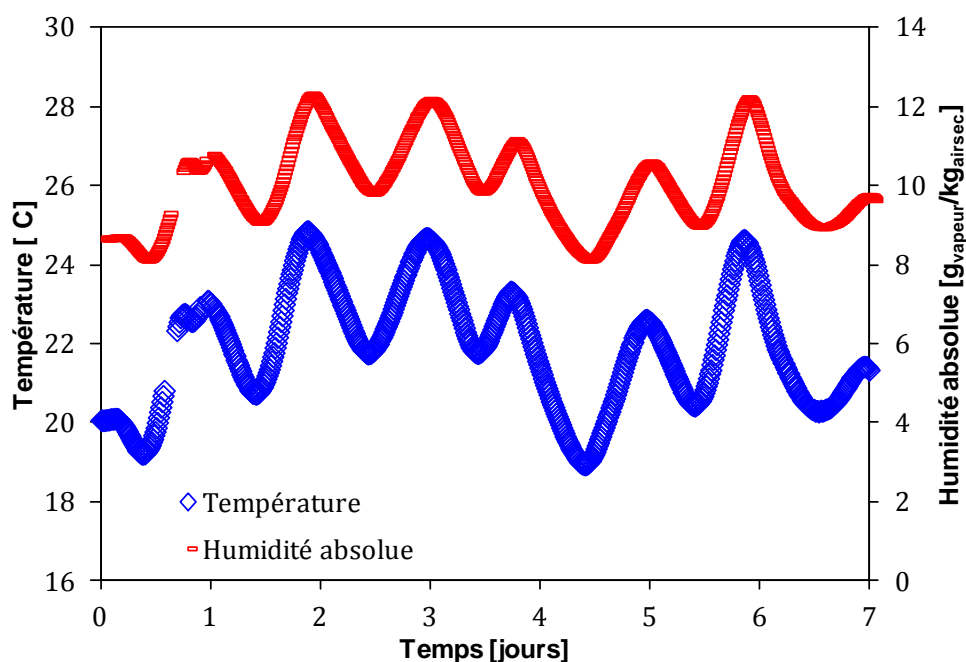


Figure 12. Evolution de la température et de l'humidité absolue dans l'isolant en fibres de bois et de chanvre, à 90 mm de l'interface bois/isolant

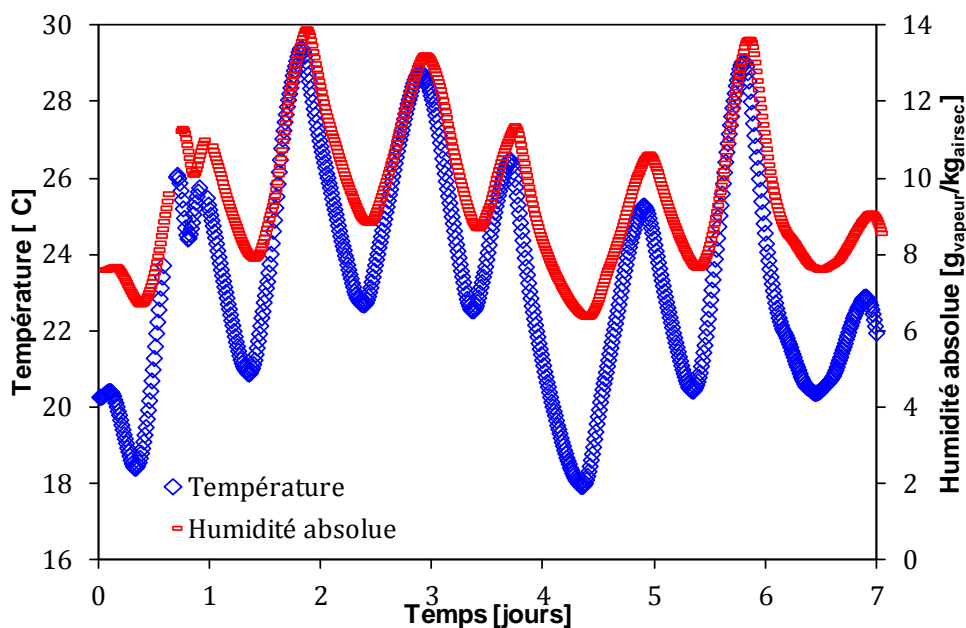


Figure 13. Evolution de la température et de l'humidité absolue dans le bois massif, à 60 mm de l'interface bois/isolant

Pour la mesure de la température et de l'humidité, notre choix s'est porté sur les capteurs capacitifs SHT75 (Figure 15) de chez Sensirion Company. Ce choix se justifie entre autres par la petite taille (3,1 mm x 5,08 mm x 19,5 mm) du capteur, qui évite de perturber l'environnement lorsqu'il est placé dans la paroi. D'autre part, les SHT75 ont été utilisés dans

plusieurs études scientifiques pour leur très bonne précision en humidité relative ($\pm 1,8\%$) et en température ($\pm 0,3\text{ °C}$), leur bonne stabilité dans le temps ainsi que leur temps de réponse très court. Chacun de ces capteurs est étalonné en usine et intègre dans sa puce des coefficients d'étalonnage ce qui évite un étalonnage avant utilisation. Ces capteurs offrent également l'avantage de rester calibrés après une exposition à des conditions extrêmes d'humidité (humidité très basse ou très élevée).

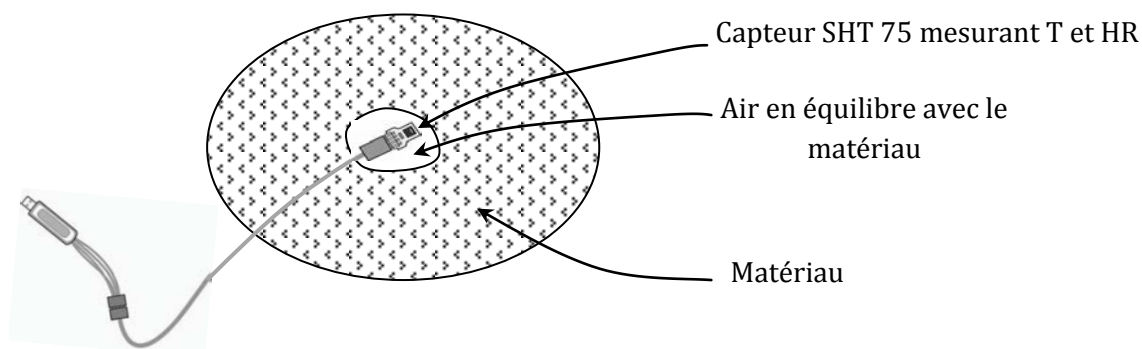


Figure 14. Méthode de mesure de l'humidité du matériau

Vitesse d'air

La mesure de la vitesse d'air, aussi bien dans l'ambiance que dans les lames d'air à l'intérieur des parois, est réalisée à l'aide d'anémomètres thermiques (Figure 15).

Dans le caisson extérieur, la vitesse d'air est mesurée à l'aide de capteurs de vitesse d'air omnidirectionnels HD 103 T-O de Delta Ohm, d'une précision de 0,04 m/s entre 0,05 et 0,99 m/s et 0,2 m/s dans la gamme 1-5 m/s. Dans la lame d'air côté froid, des anémomètres à fil chaud EE75 de-E+E Elektronik sont utilisés. Leur précision est de $\pm (0,1 + 1\%$ de la mesure) dans la gamme de vitesse de 0-10 m/s.

Dans le caisson intérieur et la lame d'air côté chaud, la mesure de la vitesse d'air est réalisée avec des capteurs de vitesse d'air omnidirectionnels HD 4V3 TS2 de Delta Ohm.

Flux de chaleur

Un sous-compteur électrique de marque FINDER (Figure 15) est branché sur le système de chauffage de la boîte chaude gardée afin de suivre la consommation électrique. On suppose que toute l'énergie électrique est convertie en chaleur. Ce compteur mesure la quantité d'énergie consommée pour maintenir la température constante dans l'ambiance lors des essais et permet ainsi de remonter au flux de chaleur traversant la paroi.



Compteurs d'énergie



Anémomètre thermique



Thermohygromètre SHT 75

Figure 15. Eléments de mesure installés dans le dispositif

Le Tableau 2 présente les capteurs et éléments de mesures utilisés en précisant leurs spécifications techniques.

Tableau 2 : Inventaire des capteurs et appareils de mesure installés sur le dispositif

| <i>Type</i> | <i>Nombre</i> | <i>Référence</i> | <i>Gamme de mesure</i> |
|--------------------------------|---------------|---------------------------|-----------------------------|
| Thermohygromètres | 120 | SHT75 (Sensirion Company) | [-40 ; 123,8] °C [0 ; 100]% |
| Thermocouples | 32 | type T (classe 1) | [-50 ; 250] °C |
| Anémomètres thermiques | 3 | HD4V3 TS2 (Delta Ohm) | [0,05 ; 5] m/s |
| Anémomètres thermiques | 1 | HD103 T0 (Delta Ohm) | [0,05 ; 5] m/s |
| Anémomètres thermiques | 2 | EE75 (E+E Elektronik) | [0; 10] m/s |
| Manomètre différentiel | 1 | CP 101-A0 (KIMO) | (-500; +1000] Pa |
| Balance de précision | 1 | SI-4001 (Denver) | [0 ; 4] Kg |
| Compteurs d'énergie électrique | 1 | Finder | - |

Les précisions de mesure des différents capteurs utilisés sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Précisions de mesures des différents capteurs

| <i>Type de capteur</i> | <i>Référence</i> | <i>Précision</i> |
|------------------------|-----------------------|---|
| Thermohygromètres | SHT75 | ± 0,3 °C (0 à 40 °C) ± 1,8% (0 à 100%) |
| Thermocouples | type T | ± 0,5 °C (-50 à 250 °C) |
| Anémomètres thermiques | HD4V3 TS2 (Delta Ohm) | ± (0,03 m/s + 2%) |
| Anémomètres thermiques | HD103 T0 (Delta Ohm) | ± 0,2 m/s |
| Anémomètres thermiques | EE75 (E+E Elektronik) | ± (0,1 m/s + 1%) |
| Manomètre différentiel | CP 101-A0 (KIMO) | ± (3 Pa + 1,5%) |
| Balance de précision | SI-4001 | ± 0,1 g |
| Compteurs d'énergie | Finder | ± 0,1 Wh |

Les capteurs SHT75 peuvent être utilisés dans un domaine de température de -40 à 123,8 °C avec une précision de $\pm 0,3$ °C entre 0 et 40°C et dans un domaine d'humidité relative de 0 à 100 % avec une précision de $\pm 1,8$ %. Les domaines d'utilisation et de précision du capteur sont donnés dans la Figure 16.

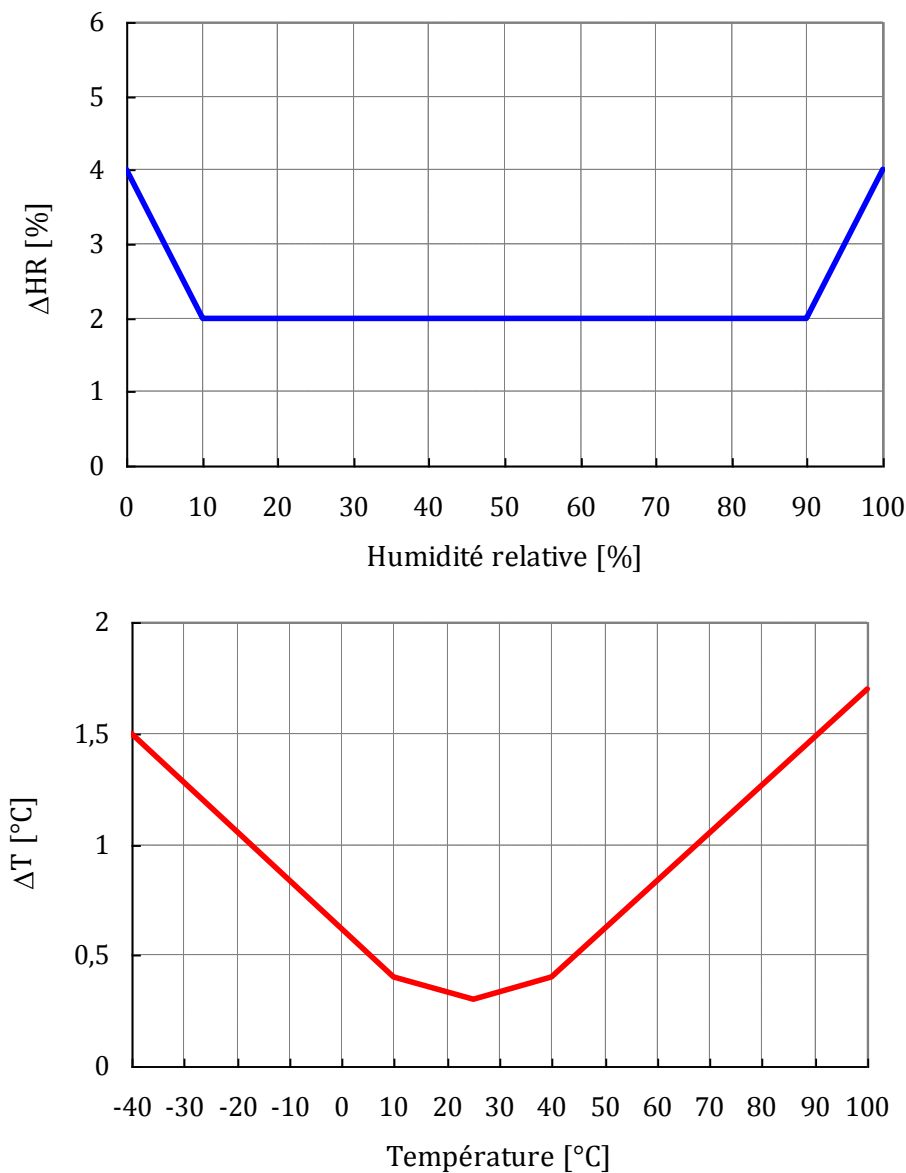


Figure 16. Précision des SHT 75 en température et humidité

II.2.2. Positionnement des points de mesures

Les différents capteurs présentés dans le paragraphe précédent sont installés comme suit au sein du dispositif expérimental :

- dans les caissons intérieur et extérieur ainsi que dans la boîte chaude gardée, conformément à la norme ISO 8990, 9 capteurs de température et d'humidité relative SHT 75 sont installés. Ces capteurs permettent de suivre l'évolution des températures et humidités relatives de l'air imposées dans ces ambiances. L'emplacement des capteurs permet également de caractériser

l'homogénéité de ces ambiances en température et en humidité relative de l'air. La répartition des points de mesures dans l'enceinte climatique est illustrée sur les Figure 17, Figure 18 et Figure 19.

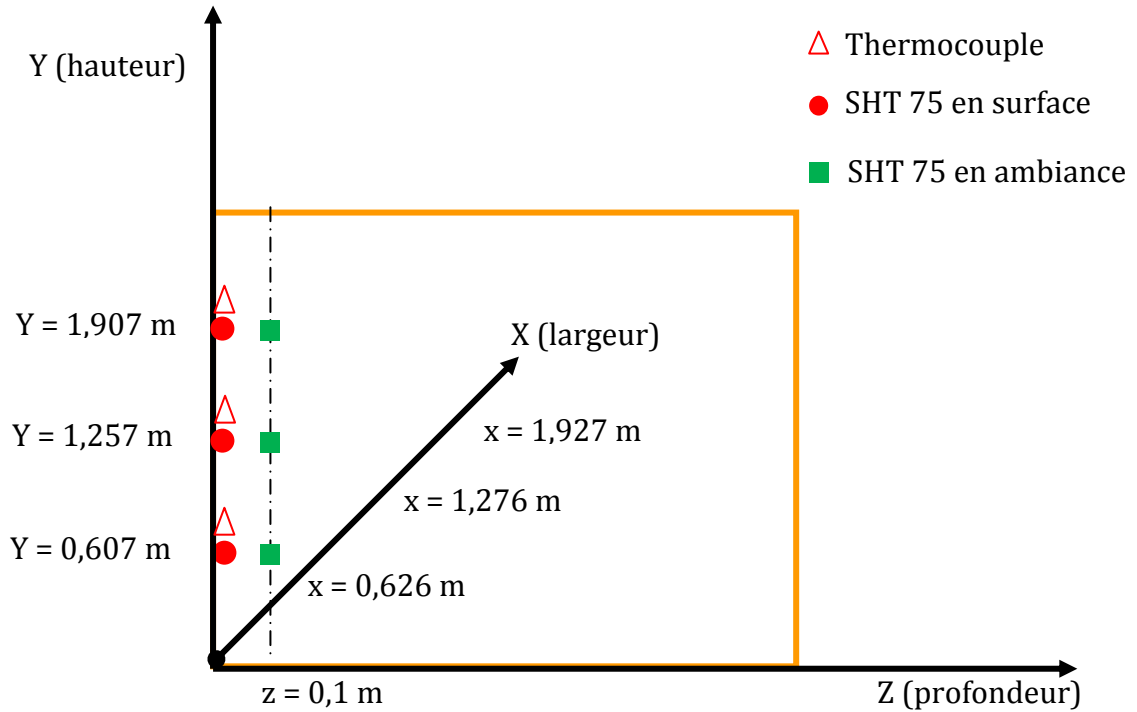


Figure 17. Vue de côté de l'instrumentation d'un caisson

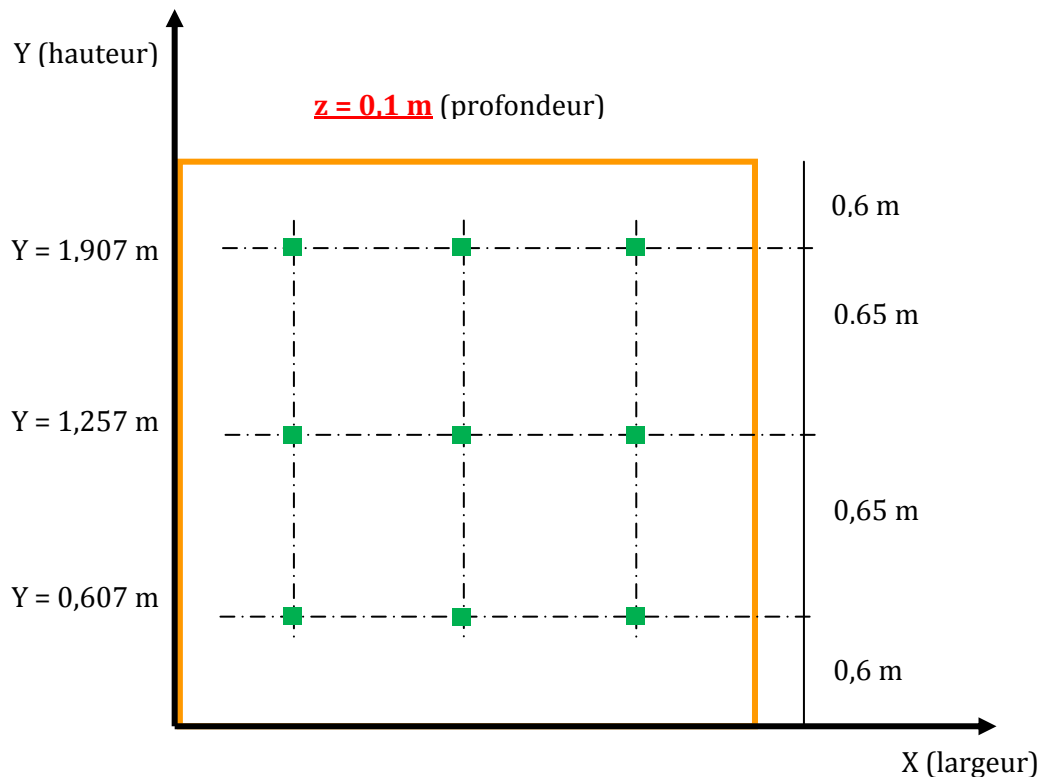


Figure 18. Emplacement des capteurs d'ambiance

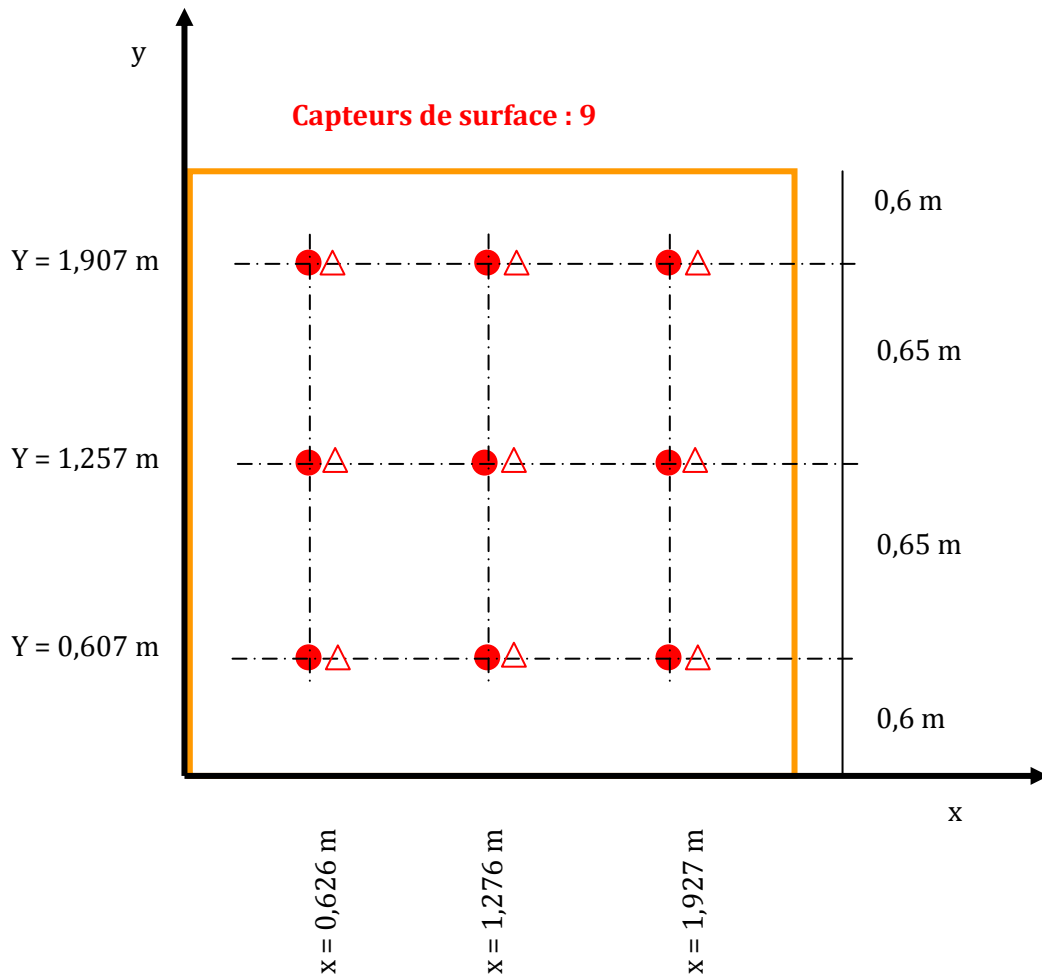


Figure 19. Emplacement des capteurs d'ambiance et de surface

- sur les surfaces côté intérieur et côté extérieur des murs testés, des thermocouples sont répartis régulièrement afin de mesurer la température de surface. Des capteurs SHT 75 sont également fixés aux mêmes endroits que ces thermocouples pour mesurer l'humidité relative de l'air à proximité de chaque surface. La connaissance des températures et humidités proches des surfaces des murs permet de déterminer les coefficients d'échange surfaciques thermique et massique pendant les essais.

- dans les différentes couches de la paroi, l'installation de thermohygromètres SHT 75 et de thermocouples permet de suivre l'évolution des profils de température et d'humidité. Le positionnement des capteurs à l'intérieur de la paroi est défini préalablement par simulation avec le logiciel Wufi.

Des capteurs de vitesses d'air sont placés dans les lames d'air ventilées ou les vides techniques.

Les profils de température et d'humidité sont obtenus grâce à des thermohygromètres placés à différentes épaisseurs dans la paroi. L'implantation des capteurs ainsi que la précision sur leur emplacement exact dans les différentes couches ont donc une influence importante sur

les résultats des essais. Afin de réduire au minimum les erreurs liées à la mise en place des capteurs installés dans la paroi, plusieurs précautions ont été prises :

- la mise en place des capteurs, aussi bien les thermocouples que les SHT 75 se fait directement dans chaque matériau au moment du montage de la paroi. Ceci permet d'avoir accès plus facilement aux « zones clés » où les capteurs doivent être installés ;
- les capteurs sont introduits dans les matériaux perpendiculairement au sens des flux selon un plan supposé isotherme afin d'éviter que les capteurs ou les câbles soient le siège de flux parasites. Après la mise en place des capteurs, les éventuelles « cavités » créées sont comblées afin d'empêcher les transferts d'air et de vapeur d'eau ;
- la mise en place des capteurs SHT 75 est réalisée avec un système spécifique développé pour installer les capteurs à une distance déterminée de la surface du matériau. Ceci permet d'éviter qu'un positionnement approximatif de capteurs induise des erreurs sur l'interprétation du comportement des parois. le système comporte une aiguille qui est guidée lorsqu'elle pénètre dans le matériau parallèlement à un plan de référence. La distance entre le plan de référence et l'aiguille est réglable et permet de définir l'épaisseur à laquelle le capteur est installé dans le matériau. Ce système est présenté sur la Figure 20.



Figure 20. Système d'implantation des capteurs dans la paroi

II.3. Protocoles expérimentaux

II.3.1. Principe général des essais

Les parois-test sont construites au laboratoire, non loin de la double enceinte climatique (Figure 21), ce qui permet de positionner et de raccorder les capteurs au moment du montage

des parois. Après la mise en place de tous les capteurs à l'intérieur de la paroi, cette dernière est installée verticalement entre les deux caissons intérieur et extérieur. Afin de limiter les transferts de chaleur et d'humidité latéraux, la paroi est isolée sur le pourtour avec un film pare-vapeur et 10 cm d'isolant. L'ensemble est ensuite recouvert d'une plaque rigide isolante de 6 cm de polyuréthane étanche à l'air et à la vapeur d'eau.

Au début de chaque type d'essai, la paroi est conditionnée dans l'enceinte climatique (côté chaud et côté froid régulés à la même ambiance) sous 20°C de température et généralement 40% d'humidité relative, ceci pendant deux jours environ. C'est le temps estimé pour atteindre l'équilibre thermique dans chaque mur échantillon, quelque soit son épaisseur et les matériaux qui le composent. Une fois l'équilibre thermique atteint, chaque paroi est soumise à l'une des conditions opératoires telles que décrites dans le paragraphe ci-après. La température initiale de chaque composant de la paroi est donc de 20°C.

L'installation de la paroi entre deux ambiances différentes en température et humidité relative crée un transfert de chaleur et d'humidité à travers la paroi. Il est alors possible grâce à la métrologie installée, dès lors que l'essai a commencé et pendant toute sa durée, de suivre le comportement hygrothermique de la paroi testée en mesurant l'évolution de la température, de l'humidité relative de l'air et de la vitesse d'air au niveau des-zones jugées intéressantes dans la paroi.

Dans les essais où le flux thermique est également mesuré, un suivi de la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir constante la température dans la boîte chaude gardée est réalisé afin de déterminer instantanément le flux de chaleur traversant la paroi testée. L'expérience est réalisée jusqu'à ce que la paroi ait atteint le régime permanent, lorsque le flux de chaleur traversant la paroi est constant. La connaissance de ce flux en régime permanent permet de déduire la résistance thermique de la paroi. Le transfert d'humidité dans la paroi, qui est un phénomène assez lent, est supposé négligeable compte tenu de la durée courte de l'essai.

La durée de chaque essai, en régime permanent, dépend du comportement thermique et hydrique de la paroi testée, plus la paroi a une conductivité thermique élevée et plus cette paroi est perméable à la vapeur d'eau, plus l'essai sera court.

Pour un essai en régime transitoire, l'état d'équilibre n'est pas nécessaire, en effet, seul importe la réponse de la paroi aux sollicitations qui lui sont imposées de part et d'autre. La durée de l'essai est imposée par le protocole et est indépendante de la nature de la paroi.

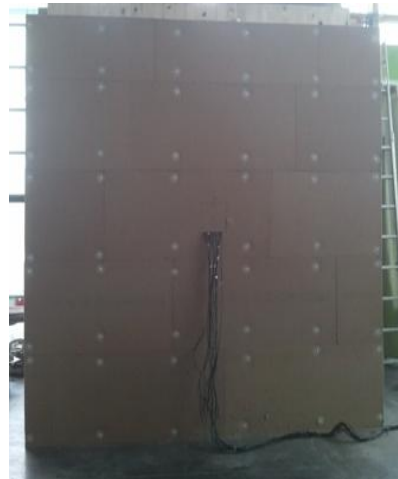


Figure 21. Montage et instrumentation des parois-test

II.3.2. Campagne expérimentale en vue de la validation de codes numériques

II.3.2.1. Modèles de transfert chaleur/masse dans les parois multicouches

Dans cette campagne expérimentale nous proposons des essais conduits spécifiquement en vue de confronter les résultats à deux codes de calculs : le code numérique BuildingPore, développé dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS, et le logiciel commercial WUFI, tous deux présentés dans le paragraphe I.1.2.1.

La première phase d'essai (étape 1) consiste à la réalisation d'un échelon en humidité relative suivi d'un échelon de température (Figure 22). Le maintien du palier durant plusieurs semaines vise à affecter les couches profondes des parois et tendre vers un équilibre. L'objectif de cette première phase est de tester la capacité des modèles numériques à prédire l'évolution des champs de température et de teneur en eau mesurés jusqu'à l'obtention de l'équilibre.

La seconde phase (étape 2) consiste à soumettre les parois à des conditions climatiques oscillantes, en température et en humidité relative (Figure 23). Cette configuration sollicite les couches périphériques des parois. Cette seconde phase vise à tester la capacité des codes numériques à prédire le comportement thermique et hydrique des parois soumises à des conditions plus complexes et plus proches des conditions climatiques réelles comparées aux conditions d'essai de la première phase.

a) Etape 1

Avant les essais, les parois sont conditionnées à 20 °C et 40% d'humidité relative pendant 48 heures afin d'obtenir un profil de température initial uniforme dans les parois.

Dans un premier temps, les parois testées ont été exposées à des conditions isothermes en maintenant la température à 20 °C de part et d'autre des parois. Un gradient d'humidité relative a été imposé aux parois pour créer un transfert de masse uniquement. Pour cela, l'humidité relative a été maintenue à 40% dans le caisson intérieur et à 80% dans le caisson extérieur pendant 36 jours.

Dans un second temps, les conditions extérieures aux parois sont brutalement changées pour créer un transfert couplé de chaleur et de masse à travers les parois testées pendant 2 mois et demi. Pour cela, les mêmes conditions stationnaires précédentes de 20°C et 40% sont maintenues dans le côté intérieur des parois tandis que des conditions d'air de 20°C avec une humidité relative à 80% sont maintenues dans le caisson extérieur. Ces conditions permettent d'obtenir un scénario avec des gradients d'humidité relative et de température opposés ainsi qu'un faible gradient de pression partielle de vapeur d'eau (≈ 200 Pa) à travers la paroi.

Les conditions aux limites imposées aux parois durant cette première phase des tests sont données dans la Figure 22 ci-dessous.

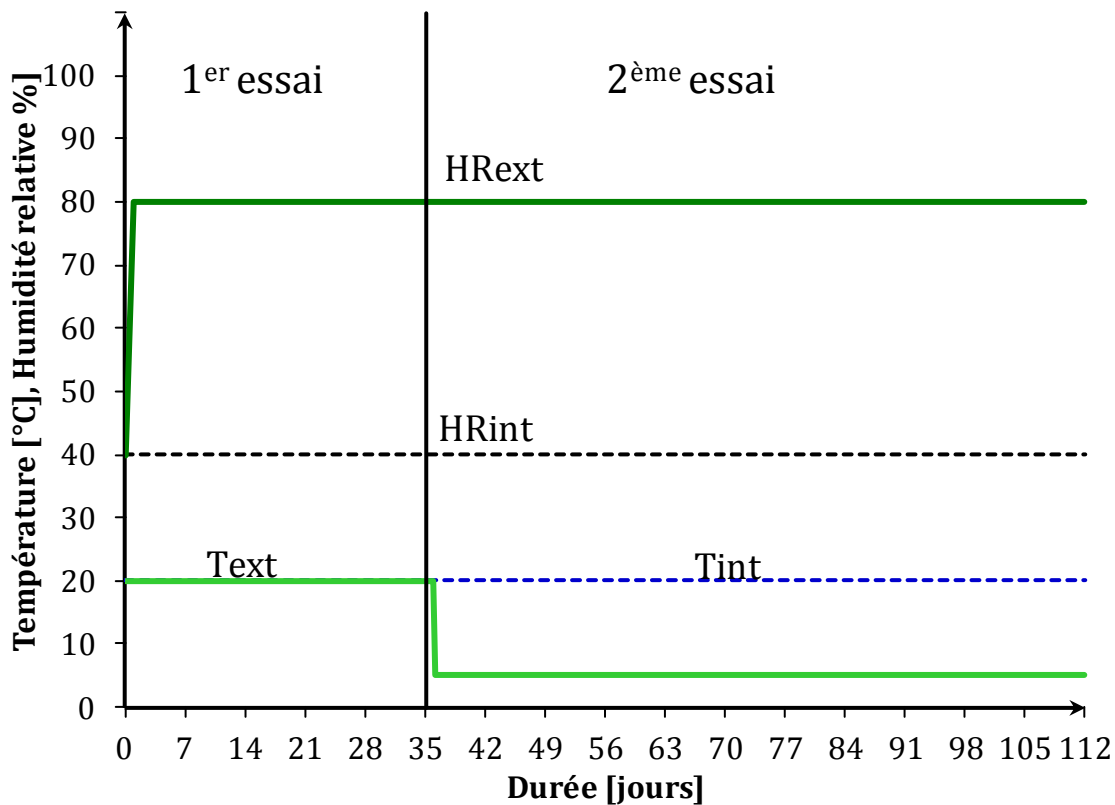


Figure 22. Conditions aux limites pour les essais de transferts couplés, 1^{ère} phase

b) Etape 2

Après la première phase expérimentale décrite précédemment, une période de stabilisation des parois en température et en humidité a été réalisée pendant quatre semaines. Pendant cette période, les deux côtés de la paroi ont été maintenus à 20°C et 40% d'humidité relative afin d'obtenir un profil de température uniforme et un profil d'humidité se rapprochant du profil à l'équilibre. Après cette période de stabilisation, une deuxième phase d'essais a été réalisée. Cette deuxième phase expérimentale a été conduite dans l'objectif de déterminer la capacité des codes numériques à prédire le comportement hygrothermique des parois soumises à des sollicitations proches des conditions climatiques réelles auxquelles les bâtiments sont exposés dans leur utilisation.

Des conditions stationnaires en température et humidité relative sont tout d'abord imposées pendant l'essai 3 en considérant une humidité ambiante intérieure élevée pour simuler la charge d'humidité d'une pièce humide. Les conditions d'air dans le caisson intérieur sont alors maintenues à 20°C et 60% d'humidité relative tandis que le caisson extérieur est réglé à 5°C et 80% d'humidité relative pendant 3 semaines. Ces conditions climatiques sont représentatives d'un climat hivernal et correspondent à la période critique en termes de transfert d'humidité dans les parois. Afin de caractériser le comportement transitoire des parois vis-à-vis des sollicitations dynamiques souvent rencontrées durant l'inter saison, des conditions cycliques simplifiées en température et humidité relative de l'air sont reproduites pendant 18 jours de part et d'autre des parois testées. Pendant les 18 jours d'essai, des

conditions d'air de 20 °C avec une variation périodique d'humidité relative (période de 48 heures et une variation entre 40% et 60%) sont maintenues dans le caisson intérieur. Le côté extérieur des parois étant soumis à une température de 20 °C avec une humidité relative périodique (période de 48 heures et une variation entre 40% et 80%) pendant les 10 premiers jours (essai 4). Au cours des 8 jours suivants, des conditions cycliques en température et en humidité relative, avec une période de 48 heures, sont imposées sur le côté extérieur des parois (essai 5).

Dans cette deuxième campagne, un dernier essai a été réalisé pendant 24 jours avec les mêmes conditions expérimentales que l'essai 5 mais dont la période des conditions cycliques en température et en humidité relative a été fixée à 6 jours. Les conditions cycliques de 48 heures sont plus proches de la réalité mais étant donné que les cycles imposés sont courts, seules les couches superficielles des parois sont atteintes par les transferts d'humidité. Une période plus longue a ainsi été choisie dans ce dernier essai afin d'observer plus en détails la dynamique des transferts dans les différentes couches des parois.

Les conditions imposées pendant cette deuxième campagne sont résumées sur la Figure 23 ci-après.

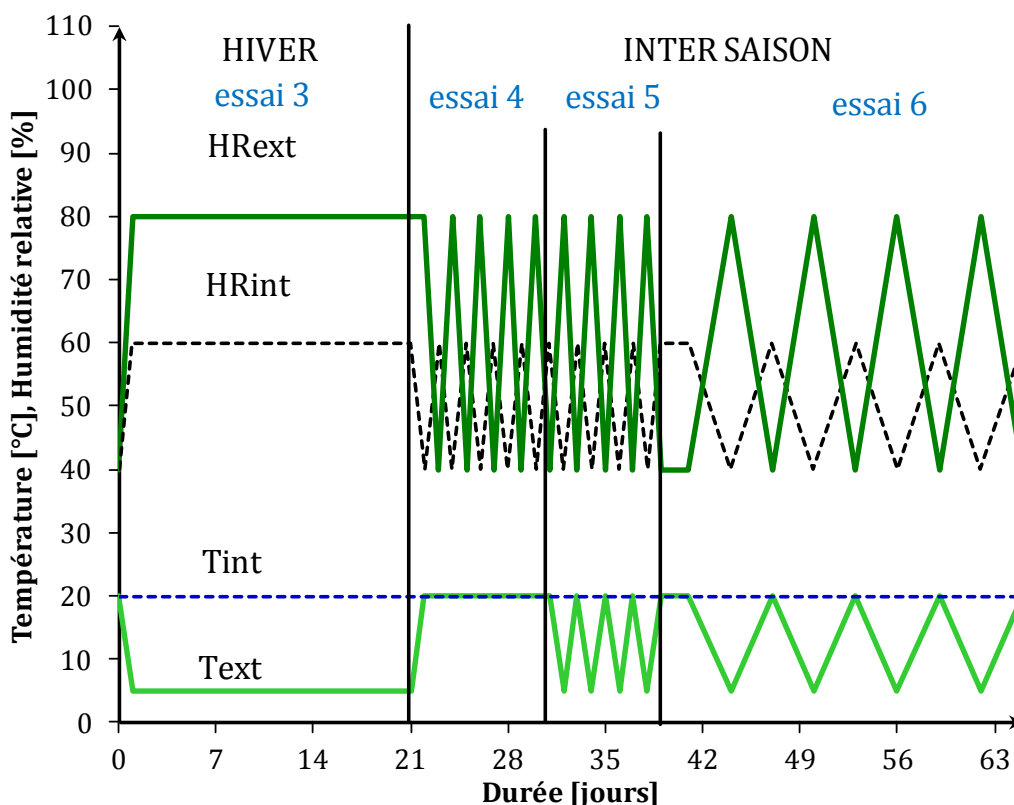


Figure 23. Conditions aux limites pour les essais en transferts couplés, 2^{ème} phase

Pour les besoins de validation du code numérique lors de la prédiction de la dynamique des transferts couplés chaleur-masse dans une paroi donnée, il a été nécessaire d'étudier expérimentalement les transferts de chaleur et d'humidité dans une première paroi très simple. Une deuxième composition de paroi plus complexe a également été testée. Ces deux parois possèdent une résistance thermique totale identique avec un agencement des couches

différent. L'objectif étant de caractériser la dynamique des transferts de chaleur et d'humidité contrastée pour ces deux parois.

Une troisième configuration, constituant la configuration de paroi complète (paroi en bois massif avec isolation par l'extérieur) a été testée pour caractériser l'influence de chaque matériau et des résistances de contact sur les transferts couplés chaleur-masse dans la paroi. Une quatrième composition de paroi, proche de la première paroi a été testée afin d'identifier la différence de comportement hygrothermique entre un matériau hygroscopique et un matériau non hygroscopique.

Pour permettre une meilleure interprétation des phénomènes mis en jeu, les quatre configurations de parois ont été construites sur un même cadre support et ainsi exposées simultanément aux mêmes sollicitations en température et humidité. Afin d'éviter tout flux parasite et d'assurer des transferts de chaleur et d'humidité monodimensionnels à travers les parois, ces dernières sont isolées thermiquement et enveloppées d'un film étanche à l'air et à la vapeur d'eau (sur leur pourtour).

Les détails sur les compositions des quatre parois testées sont donnés ci-après. Le panneau de bois massif utilisé est constitué de lames de bois collées. Le plan de collage est parallèle au flux afin de ne pas intervenir sur le flux d'humidité dans les parois. Les compositions sont données de l'intérieur vers l'extérieur de chaque paroi.

- Configuration 1 : la première paroi est un panneau en bois massif de 40 mm doublé par un panneau isolant de fibre de bois rigide de 160 kg/m^3 (120 mm) et avec une membrane pare-pluie du côté extérieur. Le pare-pluie est utilisée dans cette configuration pour limiter l'influence de la convection dans les transferts au sein de la paroi.
- Configuration 2: la deuxième paroi consiste en un panneau isolant rigide (160 kg/m^3) de 120 mm entre deux panneaux de bois massif de 20 mm d'épaisseur chacun.
- Configuration 3 : la troisième paroi testée est représentative d'une paroi complète en bois massif. Elle est constituée de 40 mm de bois massif en parement intérieur avec une isolation de 120 mm en panneau de fibre de bois rigide (160 kg/m^3). La finition extérieure est un enduit directement appliqué sur un panneau de fibres de bois rigide de 250 kg/m^3 (80 mm).
- Configuration 4 : la configuration 4 est proche de la première configuration de paroi. L'isolant est dans ce cas une laine minérale. Cette configuration est donc composée de bois massif (40 mm), d'un panneau de laine minérale de 140 kg/m^3 (120 mm), et d'un film pare-pluie.

Le positionnement des capteurs est décrit dans la Figure 24 suivante

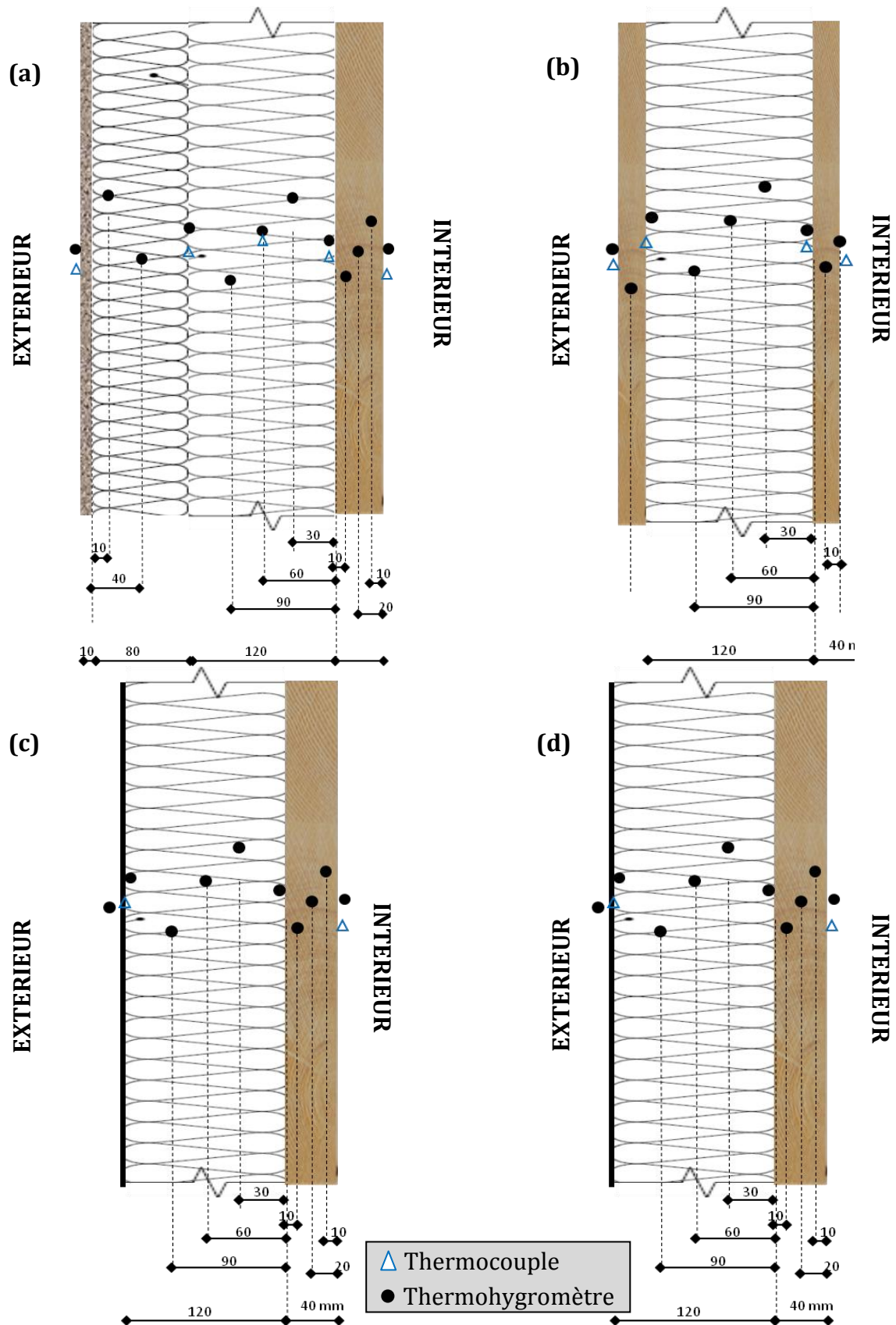


Figure 24. Coupes verticales des parois testées (a) : bois massif (40 mm), fibres de bois rigide (120 mm), fibres de bois support d'enduit (80 mm), enduit (10 mm) / (b) : bois massif (20 mm),

fibres de bois rigide (120 mm), bois massif (20 mm) (c) : bois massif (40 mm), fibres de bois rigide (120 mm), pare-pluie (d) : bois massif (40 mm), laine de roche (120 mm), pare-pluie

II.3.2.2. Modèle de transfert chaleur/masse dans une lame d'air

La lame d'air entre dans la composition de la plupart des parois d'un bâtiment. Elle permet, lorsqu'elle est ventilée, de garantir la pérennité de certains composants de la paroi en permettant l'évacuation de l'humidité. La lame d'air ventilée peut également intervenir dans la maîtrise des flux de chaleurs en façade ou en toiture par exemple. Il est donc primordial d'étudier les transferts dans ce composant particulier de la paroi.

Afin de valider le modèle de simulation des transferts dans la lame d'air développé par le LEMTA (laboratoire partenaire dans le projet TRANSBATIBOIS), des essais spécifiques ont été développés. Trois configurations de parois sont installées sur un même cadre support de façon à les soumettre aux mêmes conditions expérimentales, en température et humidité relative. Une configuration permet de reproduire la convection naturelle dans une cavité fermée, les deux autres sont en convection forcée:

- Paroi 1 : Lame d'air fermée
- Paroi 2 : Lame d'air ouverte avec une vitesse d'air verticale imposée de 1,5 m/s
- Paroi 3 : Lame d'air ouverte avec une vitesse d'air verticale imposée de 0,5 m/s

a) Conditions aux limites

Pour caractériser le comportement des parois comportant les lames d'air, deux types d'essais sont réalisés : un premier avec des conditions stationnaires en température et humidité relative et un deuxième essai avec des conditions cycliques en température du côté extérieur. La phase de conditionnement des parois est réalisée à 25°C 40% avant chaque essai.

Essai en conditions stationnaires

Pour ce premier essai, les parois sont soumises aux mêmes conditions constantes en température et humidité relative de 15°C et 40%, aussi bien du côté intérieur que du côté extérieur.

Essai en conditions cycliques

Afin de simuler le comportement des parois lors de fortes variations thermiques, notamment dans le cas d'alternances jour/nuit de température en inter saison, des conditions cycliques extérieures ont été reproduites. L'humidité relative extérieure est maintenue constante à 40% pendant toute la durée de l'essai.

Le côté intérieur est dans ce cas maintenu à 20°C et 40% d'humidité relative. La durée totale des cycles est de 4 jours tel qu'illustré sur la Figure 25.

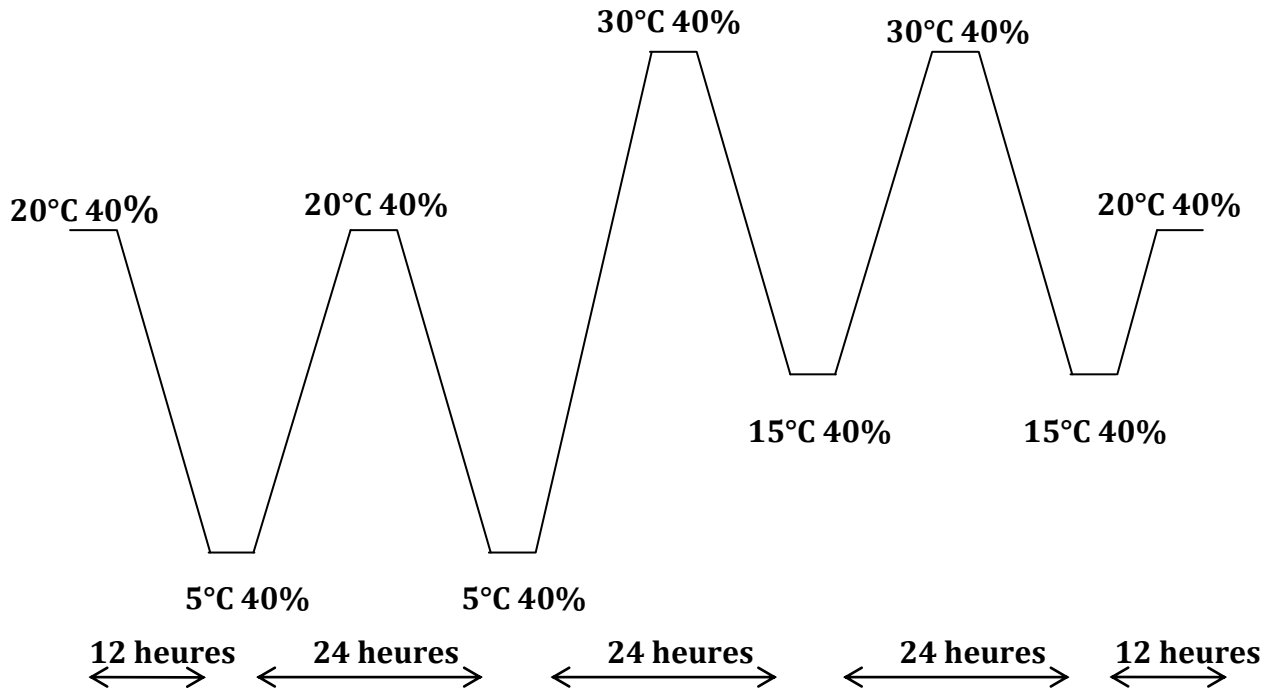


Figure 25. Cycles de température appliqués aux parois pour l'essai dans la lame d'air

b) Parois-test et instrumentation

Les compositions des trois configurations testées, de l'intérieur vers l'extérieur, sont données ci-après :

- panneau en bois massif (plan de collage parallèle au flux) de 40 mm d'épaisseur
- lame d'air de 40 mm, cette épaisseur correspond à une épaisseur type de lame d'air derrière un bardage dans une paroi ossature
- bardage de 20 mm (plan de collage parallèle au flux).

La périphérie des parois est isolée avec 10 cm de polyuréthane afin de limiter les échanges latéraux. La Figure 26 présente les coupes verticales des parois testées avec l'implantation des capteurs dans chaque paroi. Pour les parois avec lame d'air ventilée, les côtés supérieur et inférieur des parois sont ouverts pour la circulation de l'air.

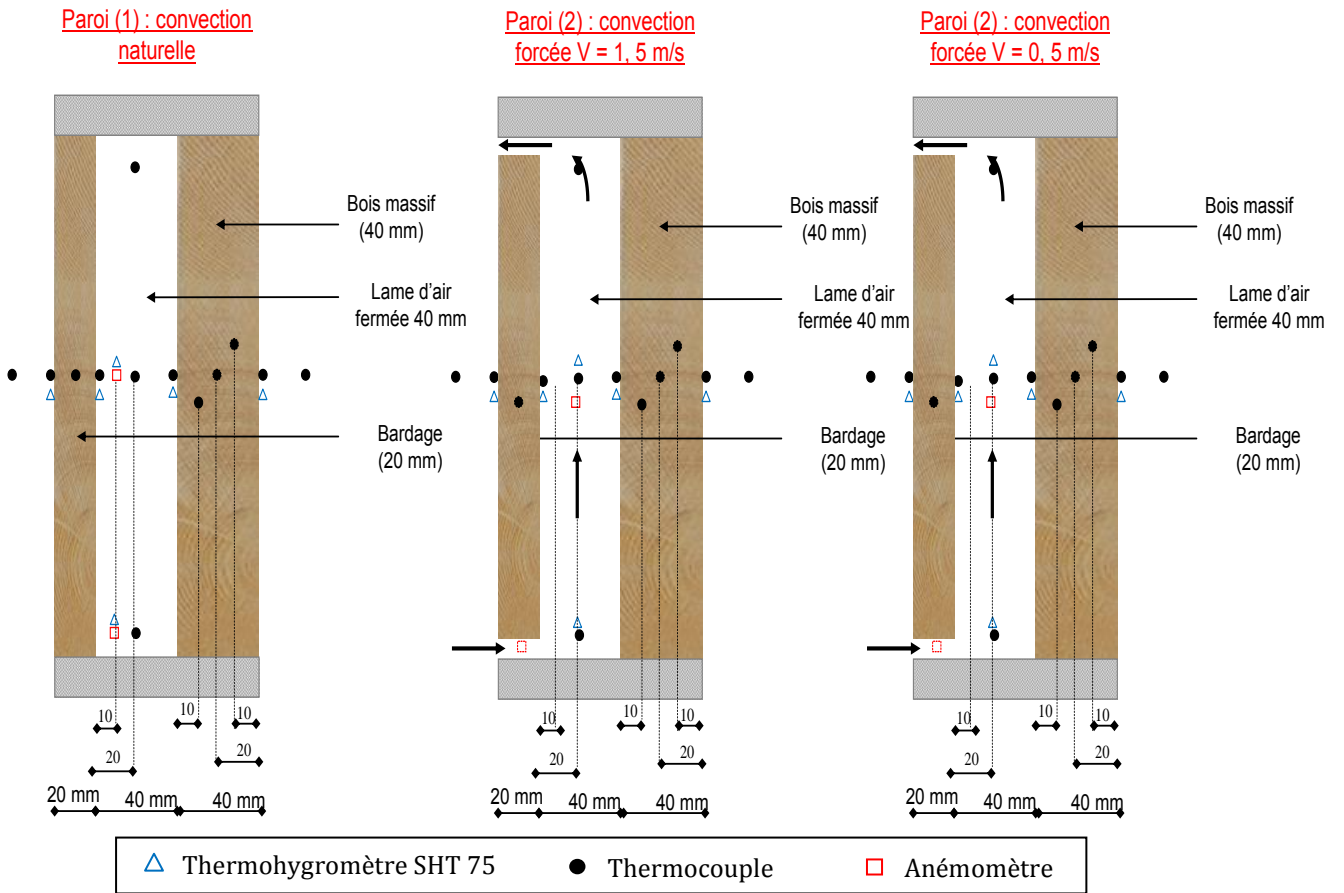


Figure 26. Coupes verticales des parois testées pour les essais "lame d'air"

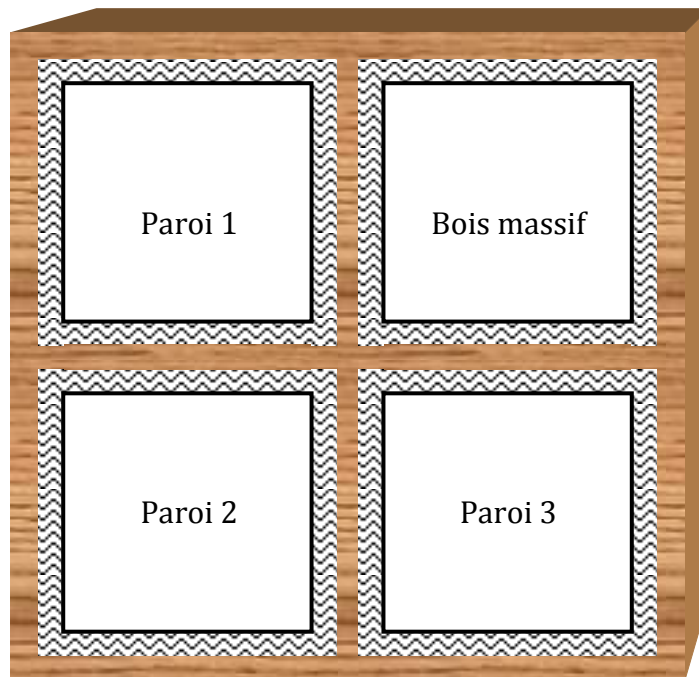


Figure 27. Parois installées sur le cadre en bois

L'exploitation des résultats expérimentaux et la confrontation avec les résultats numériques obtenus avec le modèle développé par le LEMTA ont été détaillées dans la thèse de doctorat de Monsieur Issiaka TRAORE, 2011. Un résumé de cette confrontation est donné en Annexe A.

II.3.3. Campagne expérimentale de caractérisation des parois bois courantes.

II.3.3.1. Systèmes constructifs étudiés

Les partenaires constructeurs du projet TRANSBATIBOIS mettent en œuvre les solutions courantes de constructions bois répondants aux exigences réglementaires. Il a été décidé d'étudier des solutions plus performantes répondants aux exigences des futures réglementations programmées pour 2013 ou 2020. Les compositions de parois testées ont également été choisies afin de disposer de résultats sur un panel représentatif des différents systèmes constructifs bois existants que sont l'ossature bois, le madrier empilé, le panneau contrecollé massif et la fuste (rondins empilés).

Le Tableau 4 résume les configurations de parois testées, un descriptif détaillé de ces configurations est donné dans l'Annexe E et sur la Figure 28.

Tableau 4 : Configurations des parois testées lors des essais

| <i>structure principale</i> | <i>isolation</i> | <i>parement extérieur</i> |
|-------------------------------------|--------------------------|---|
| madrier | fibres de bois + chanvre | madrier |
| panneaux contrecollés massifs (KLH) | fibres de bois rigide | crépis 3 couches sur support fibres de bois |
| ossature 45/200 | fibres de bois | bardage |
| ossature 45/145 | ouate de cellulose | crépis sur support fibres de bois |
| rondins 35 cm | - | rondins |
| panneaux contrecollés massifs (KLH) | ouate de cellulose | crépis 3 couches sur support fibres de bois |
| rondins 35 cm | ouate de cellulose | rondins |

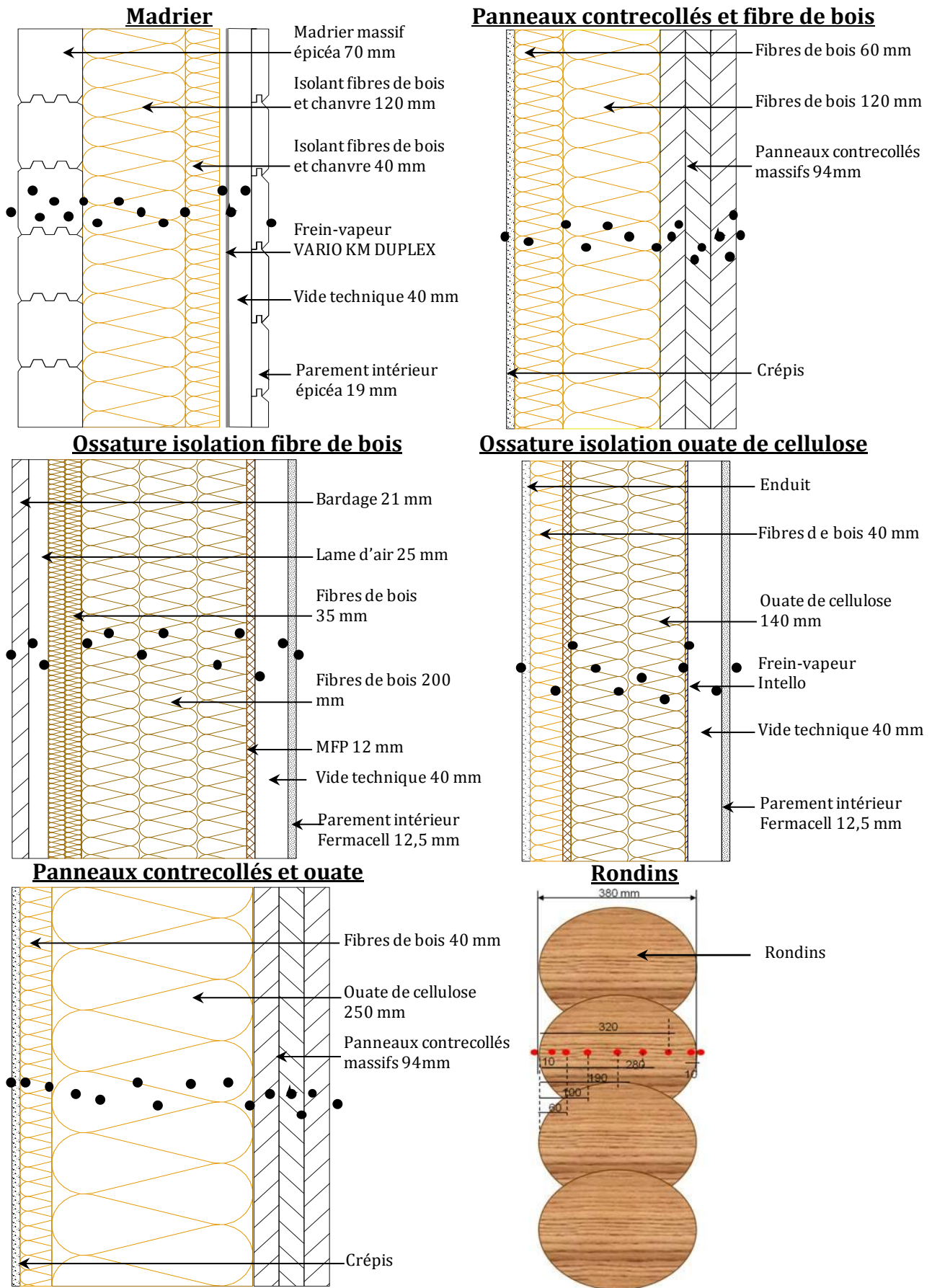


Figure 28. Coupes des parois-test et emplacement des capteurs

II.3.3.2. Résistance thermique des parois en régime permanent

Les principales propriétés thermiques caractérisées dans ce travail sont : la résistance thermique, le déphasage thermique et l'amortissement des ondes de température. Seule la résistance thermique est traitée dans ce paragraphe, les mesures du déphasage et de l'amortissement sont abordées dans le paragraphe II.3.3.3.

Les essais en régime stationnaire ont principalement comme objectif la détermination expérimentale de la résistance thermique des parois. Aussi, les conditions d'essais ont-elles été choisies suivant les exigences de la norme ISO 8990, de 1996 pour la mesure des propriétés thermiques de la paroi. Cette norme impose des conditions aux limites de façon à avoir une différence de température d'au moins 20°C de part et d'autre de la paroi. Les parois ont donc été exposées à des conditions intérieures de 25°C et 40% d'humidité relative et des conditions extérieures hivernales de 5°C et 80% d'humidité relative.

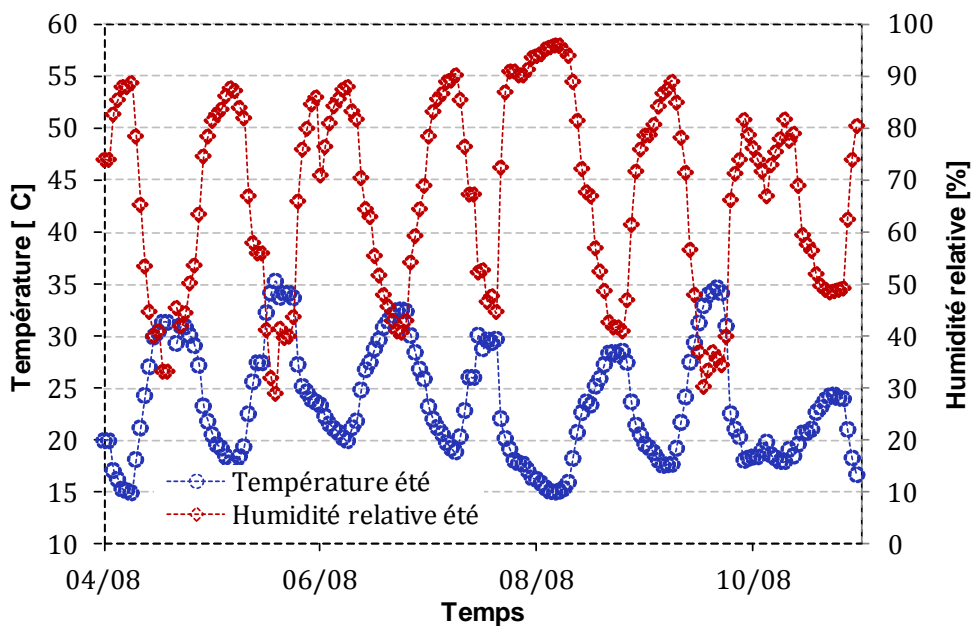
II.3.3.3. Réponse des parois aux sollicitations dynamiques

Dans cette partie, les parois ont été soumises à des conditions climatiques reproduites à partir de conditions climatiques réelles enregistrées en 2010 dans les Vosges. Nous avons choisi de reproduire une semaine d'été et une semaine d'hiver.

Chaque essai a donc duré deux semaines pendant lesquelles chaque paroi testée a été exposée du côté extérieur à 7 jours consécutifs de forte chaleur avec des amplitudes fortes de température (alternances jour/nuit) puis 7 jours avec des températures de types hivernales. Les conditions imposées du côté intérieur des parois ont été les mêmes pour les deux types de sollicitations, à savoir une température constante de 20°C et une humidité relative de 40%. Ces conditions intérieures représentent une ambiance moyenne intérieure en hiver. Les mêmes conditions ont été conservées pour les sollicitations estivales afin de bien mettre en évidence l'évolution des amplitudes et pics de température extérieure à l'intérieur de la paroi étudiée.

La Figure 29 illustre les conditions imposées aux parois durant cette campagne d'essai.

ETE



HIVER

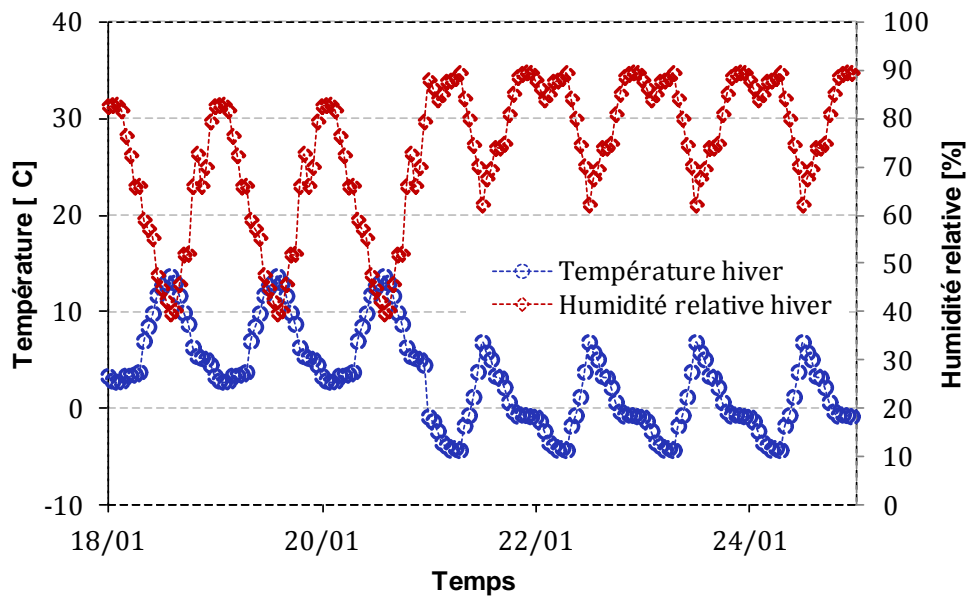


Figure 29. Conditions dynamiques estivales et hivernales imposées aux parois

II.4. Résultats et discussions

II.4.1. Confrontation des résultats expérimentaux aux codes numériques

II.4.1.1. BuildingPore, (Rémond et Perré, 2008) code développé dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS.

Pour la simulation, les conditions aux limites utilisées dans BuildingPore sont les conditions climatiques réelles (en température et humidité relative) enregistrées toutes les 15 minutes au cours des expérimentations. Etant donné que les coefficients de transfert de chaleur n'étaient pas constants pendant les essais en laboratoire, la simulation a été réalisée avec les valeurs de température et d'humidité relative mesurées aux surfaces intérieure et extérieure des parois (conditions de Dirichlet).

Les profils initiaux de teneur en eau du bois renseignés dans le code sont obtenus par double pesée d'échantillons prélevés à l'aide d'une tarière de forestier. Pour les isolants, les profils initiaux sont ceux correspondant aux valeurs de température et d'humidité relative mesurées au début de l'essai. En entrant les compositions des parois testées et les caractéristiques des matériaux préalablement caractérisés dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS et des données de la littérature, le code permet alors de prédire les variations du champ de température et de teneur en eau au sein de chaque paroi multicouche testée.

a) Impact de l'agencement des matériaux

La Figure 30 confronte les profils d'humidité relative mesurés et calculés dans l'épaisseur des parois 1 et 2 pendant toute la durée de la première campagne expérimentale. La confrontation ainsi schématisée représente les profils mesurés/simulés à plusieurs instants :

- Les résultats au 36^{ème} jour des essais représentent les profils d'humidité relative à la fin des conditions isothermes (essai 1)
- Les autres profils (39^{ème}, 45^{ème} et 72^{ème} jours) ont été échantillonnés après une chute brutale de la température, en régime non établi.
- L'arrêt du 2^{ème} essai correspond au profil mesuré au 108^{ème} jour.

Nous pouvons observer des dynamiques de transferts d'humidité très différentes pour les deux parois considérées. Ce contraste est dû à la différence d'agencement des matériaux pour les deux parois. Malgré ces dynamiques contrastées, les résultats mesurés et simulés montrent une bonne adéquation dans l'ensemble. Ceci conforte le potentiel prédictif du code pour simuler la dynamique des transferts masse-chaleur au sein d'une paroi multicouche comportant des matériaux hygroscopiques.

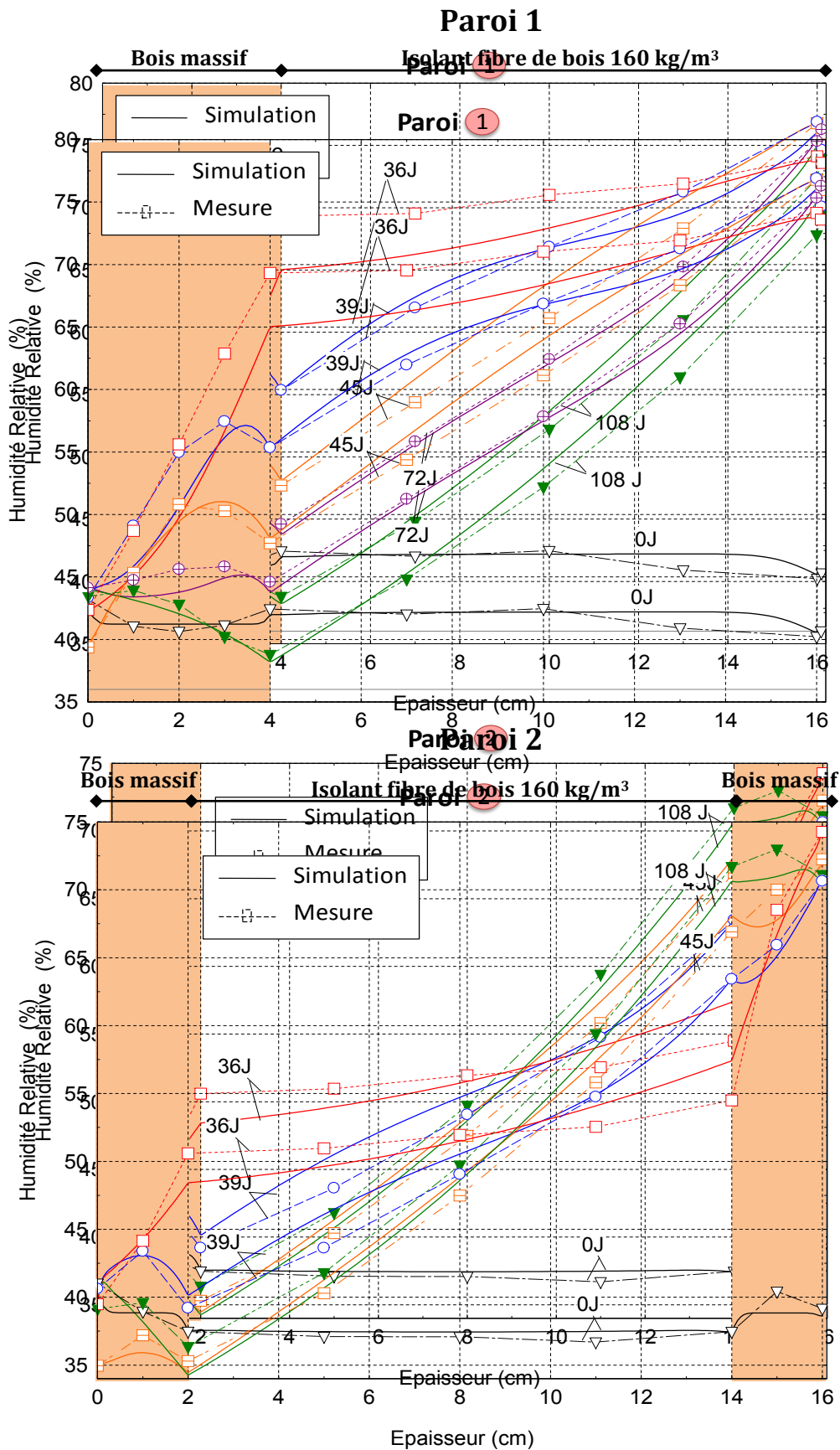


Figure 30. Profils d'humidité relative mesurés et simulés (BuildingPore) au cours de la première campagne expérimentale

b) Influence de la prise en compte de l'hystérésis de l'isotherme de sorption et sa dépendance avec la température

Dans de nombreux codes de calcul utilisés pour simuler le comportement en chaleur et en humidité des parois du bâtiment, quelques phénomènes/propriétés sont considérés comme ayant peu d'influence sur les transferts couplés chaleur/masse dans la paroi et sont ainsi négligés. Afin de caractériser l'influence du fait de négliger ou non ces paramètres, nous avons mené des simulations du comportement en humidité de la paroi 1 pendant toute la durée de la première campagne, d'une part lorsqu'on prend en compte l'hystérésis et la dépendance de l'isotherme de sorption avec la température (version actuelle du code BuildingPore) et d'autre part lorsque l'on néglige ces paramètres. Les résultats comparatifs sont représentés sur la Figure 31 par l'évolution temporelle de l'humidité relative en trois points dans l'épaisseur de la paroi. Les résultats montrent que la version actuelle du code BuildingPore, c'est-à-dire la prise en compte de l'hystérésis de l'isotherme de sorption et sa variation avec la température permet de se rapprocher au mieux des résultats expérimentaux. En effet, la pente et les amplitudes de variations simulées avec prise en compte de ces phénomènes sont plus proches de celles mesurées lors des essais que les résultats obtenus lorsque l'hystérésis et la dépendance de l'isotherme avec la température ne sont pas pris en compte. Ces résultats comparatifs permettent donc de conclure à l'importance de prendre en compte ces phénomènes pour prédire correctement la dynamique des transferts d'humidité dans les matériaux hygroscopiques comme le bois et la fibre de bois testés ici.

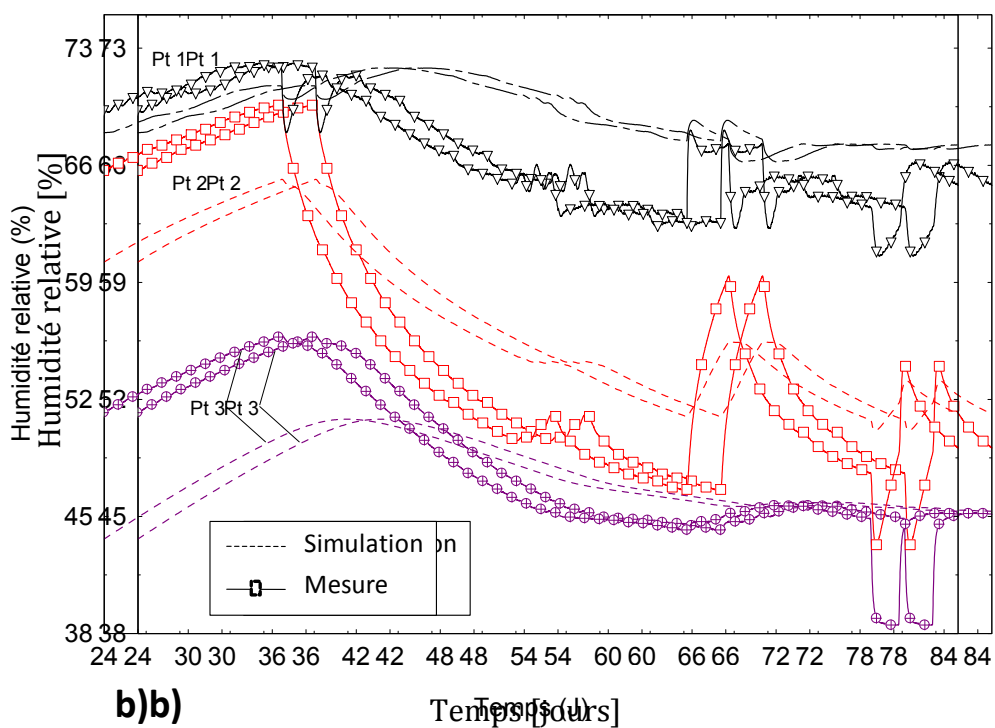
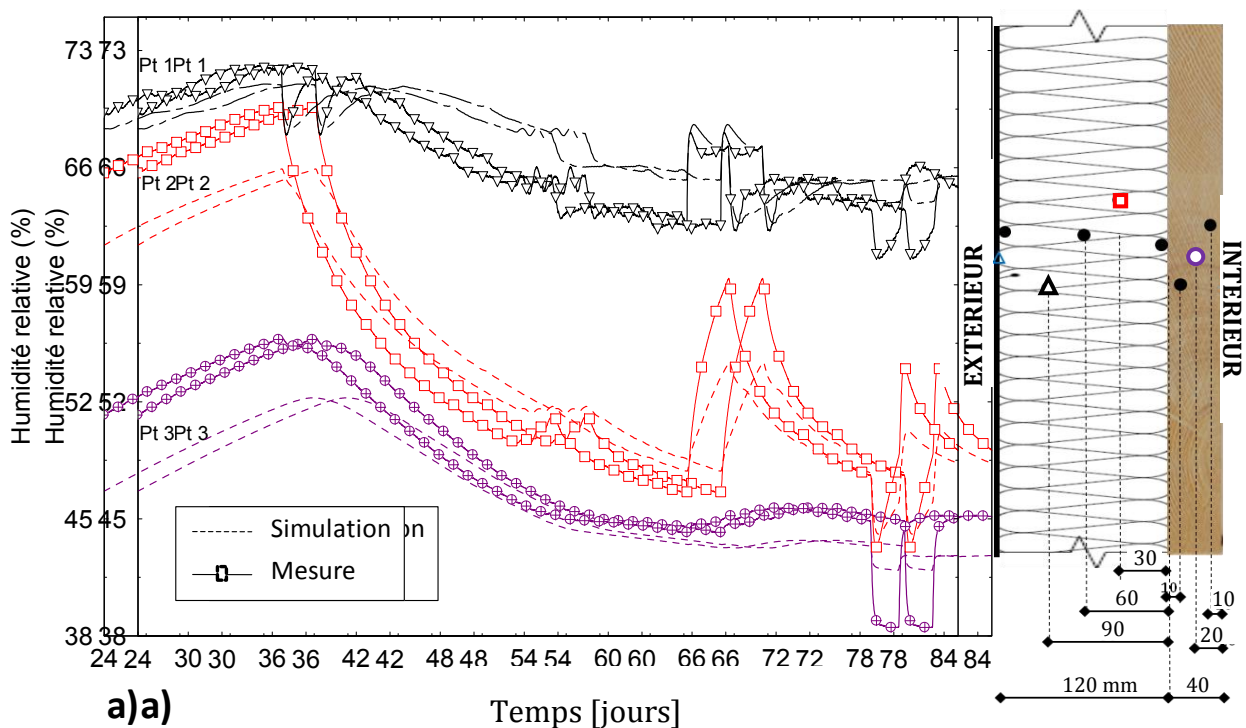


Figure 31. Evolution de l'humidité relative au sein de la paroi (1) en 3 points (Pt1 et Pt2 dans l'isolant de fibres de bois avec Pt1 : à 30 mm de la surface extérieure, Pt2 : à 90 mm de la surface extérieure, Pt3 : au cœur de la paroi bois massif). a) code actuel, b) simulation sans prise en compte de l'hystérésis de l'isotherme de sorption et sa dépendance avec la température.

c) Comportement en période hivernale

La Figure 32 donne l'évolution temporelle de la température et de l'humidité relative dans les différentes couches de la paroi 1. L'emplacement des points illustrés sur les deux figures est donné sur la coupe de la paroi. Les températures calculées sont assez proches des valeurs mesurées pour tous les points de mesure dans la paroi. Les plus grandes différences de température sont observées dans les couches extrêmes de l'isolant. L'écart maximal entre simulation et mesure y est de 0,7 °C pendant la période de stabilisation. Par ailleurs, la bonne concordance entre température mesurée et simulée lors de la chute brutale de température sur le côté extérieur montre une bonne capacité du code à reproduire la cinétique des transferts de chaleur dans la paroi.

Concernant l'évolution de l'humidité relative, les différences observées entre les valeurs mesurées et celles prédites par le code de calcul sont plus élevées. La plus grande différence est observée au point situé dans le bois massif à 10 mm de la surface intérieure de la paroi avec un écart d'environ 5% en humidité relative. Malgré les températures mesurée et simulée identiques en ce point, l'humidité relative mesurée y est beaucoup plus élevée que la valeur donnée par le calcul. Le transfert d'humidité dans le bois est donc en réalité plus rapide que le code le prédit. Il semblerait donc que le coefficient de diffusion du bois mesuré soit plus élevé que celui pris en compte dans le code de calcul. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet écart :

- Rappelons que le bois étant un matériau biologique, des différences intra spécifiques et inter-spécifiques peuvent être observées. En effet, d'un arbre à un autre ou bien au sein du même arbre selon la position de la planche dans la section de la grume, les propriétés du matériau peuvent varier.
- D'autre part, les propriétés de transfert étant pour le bois orthotropes, le flux d'humidité dépend de la direction matérielle dans laquelle il a lieu. Par exemple, le coefficient de diffusion de l'Epicéa est environ 30% supérieur dans la direction tangentielle à celui mesuré dans la direction radiale (Kouchade, 2004). Le débit des planches constituant la paroi pourrait également expliquer l'écart observé entre la simulation et la mesure.

L'écart entre l'humidité relative mesurée et calculée à mi-épaisseur du bois massif est plus faible que celui observé à proximité de la surface intérieure. La durée des essais en conditions hivernales étant de 3 semaines, le délai est trop court pour que la diffusion d'humidité atteigne une épaisseur de 20 mm dans le bois. L'influence du coefficient de diffusion est donc peu perceptible à cet endroit.

Dans l'isolant en fibre de bois, les valeurs mesurées et simulées proches de la surface extérieure de la paroi sont quasi identiques. Par contre, un écart jusqu'à 2% existe entre simulation et mesure dans les couches d'isolant plus profondes. Les résultats montrent également une diffusion de l'humidité plus rapide dans les mesures comparées aux prédictions.

Par ailleurs, la tendance de l'évolution de l'humidité relative aux différents points mesurés montre que les courbes des valeurs simulées et mesurées semblent ne pas converger vers la

même teneur en eau d'équilibre. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence de teneur en eau d'équilibre:

- L'isotherme de sorption des matériaux de l'essai diffère légèrement de celle utilisée pour alimenter le code numérique. L'histoire des variations de teneur en eau avant le début de l'essai n'a pas été considéré dans le modèle. Or, les isothermes de sorption des matériaux présentent une hystérésis. Cette hypothèse d'état initial vierge pourrait entraîner une différence de la teneur en eau d'équilibre.

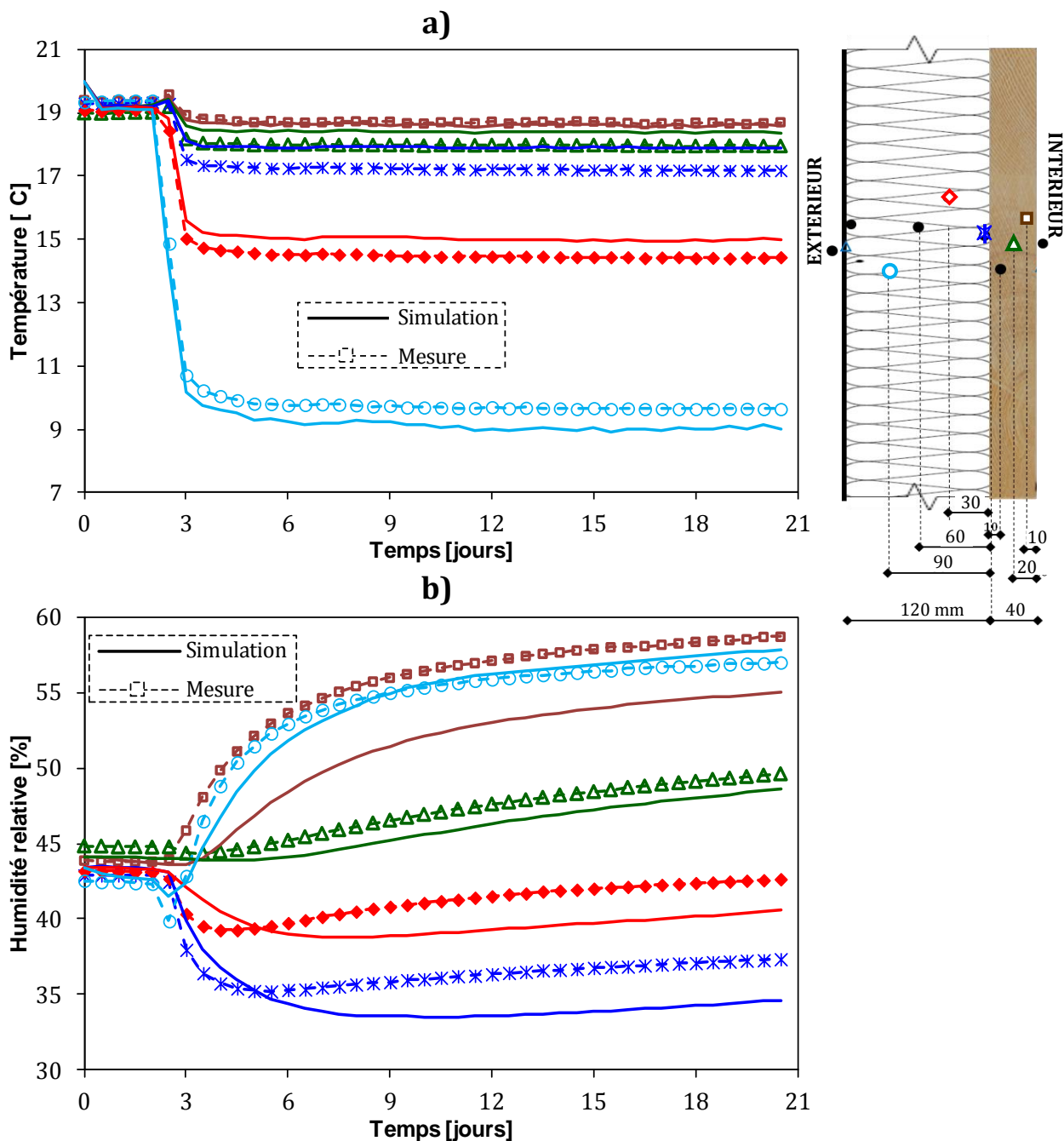


Figure 32. Evolution de la température (a) et de l'humidité relative (b) à plusieurs endroits au sein de la paroi 1 au cours de l'essai en conditions hivernales (emplacements définis sur la coupe ci-dessus)

La Figure 33 donne l'évolution temporelle de la température et de l'humidité relative dans les différentes couches de la paroi 2. L'emplacement des points illustrés sur les deux figures est donné sur la coupe de la paroi. Comme attendu, le comparatif des profils de température confirme la capacité du code BuildingPore à reproduire l'évolution de la température dans les différentes couches de la paroi ainsi que la cinétique des transferts de chaleur dans la paroi lors d'une variation brutale de la température.

Concernant l'évolution de l'humidité relative, les résultats nous montrent les mêmes tendances que la paroi 1 au niveau de l'écart observé entre la mesure et le calcul : la diffusion d'humidité observée expérimentalement semble plus rapide dans les couches de bois intérieure et extérieure à la paroi comparée aux prédictions du code. L'écart le plus important entre les valeurs d'humidité relative mesurées et calculées se trouve dans le bois massif côté extérieur où la variation brutale de température a été imposée. Cet écart pour le bois massif atteint une valeur maximale de 6,5 %. L'écart d'humidité relative entre mesure et calcul est beaucoup plus faible dans les couches d'isolant en fibre de bois.

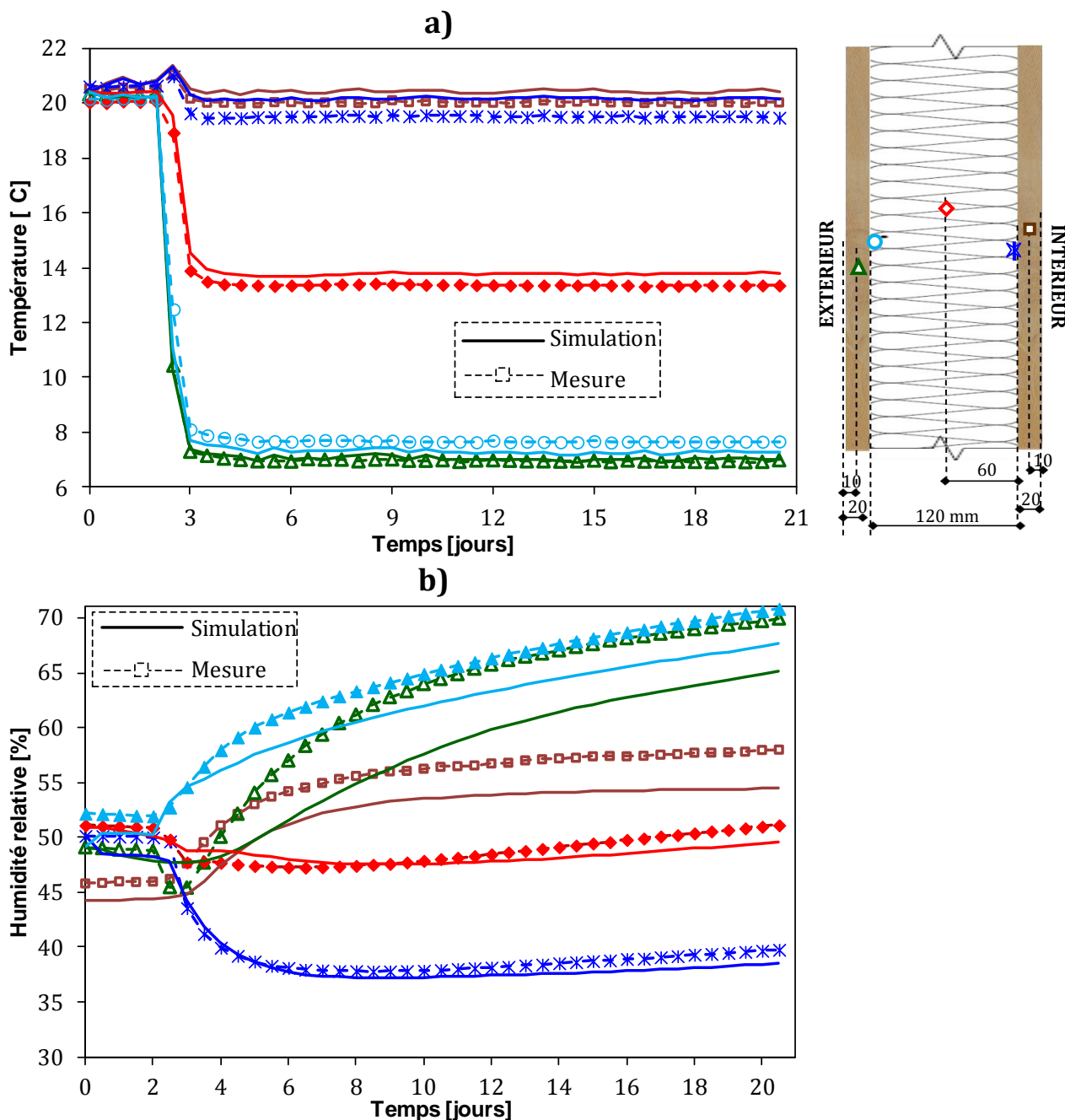


Figure 33. Evolution de la température (a) et de l'humidité relative (b) au sein de la paroi 2 au cours de l'essai en conditions hivernales (emplacements définis sur la coupe ci-dessus)

Les résultats comparatifs entre les valeurs de température et d'humidité relative sont donnés sur la Figure 34 pour la paroi 3 qui représente la composition type d'une paroi complète. La bonne capacité du code à reproduire les variations de température aussi bien en régime dynamique qu'en régime stationnaire est encore confirmée pour la paroi complète. L'écart moyen de température le plus élevé entre la mesure et le calcul est enregistré à l'interface entre le bois massif intérieur et l'isolant. L'écart maximal à cet endroit est de 0,7 °C.

La dynamique des transferts d'humidité à l'intérieur de la paroi est assez contrastée entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées par le code. Il semblerait que la prévision de l'humidité relative derrière l'enduit soit loin de la réalité. En effet, à la fin de l'essai on enregistre un écart de plus de 7 % entre la valeur mesurée et celle calculée à cet endroit alors que les valeurs de température sont très proches. Le transfert d'humidité mesuré semble plus rapide que celui prédit par le code. Comme l'enduit utilisé n'a pas été caractérisé et que les valeurs de propriétés rentrées dans le code pour ce matériau sont ceux trouvés dans la littérature, il est possible que l'enduit utilisé pour la mesure soit largement plus perméable que celui pris en compte par le code et que cette différence de propriété ait conduit à une telle différence entre l'humidité relative mesurée dans l'isolant rigide et celle calculée. Il est donc primordiale, pour prédire correctement le comportement d'une paroi, de renseigner les valeurs mesurées des principales propriétés de transfert pour chaque matériau utilisé dans la paroi. Dans ce cas nous ne disposons que des données du fabricant pour l'enduit.

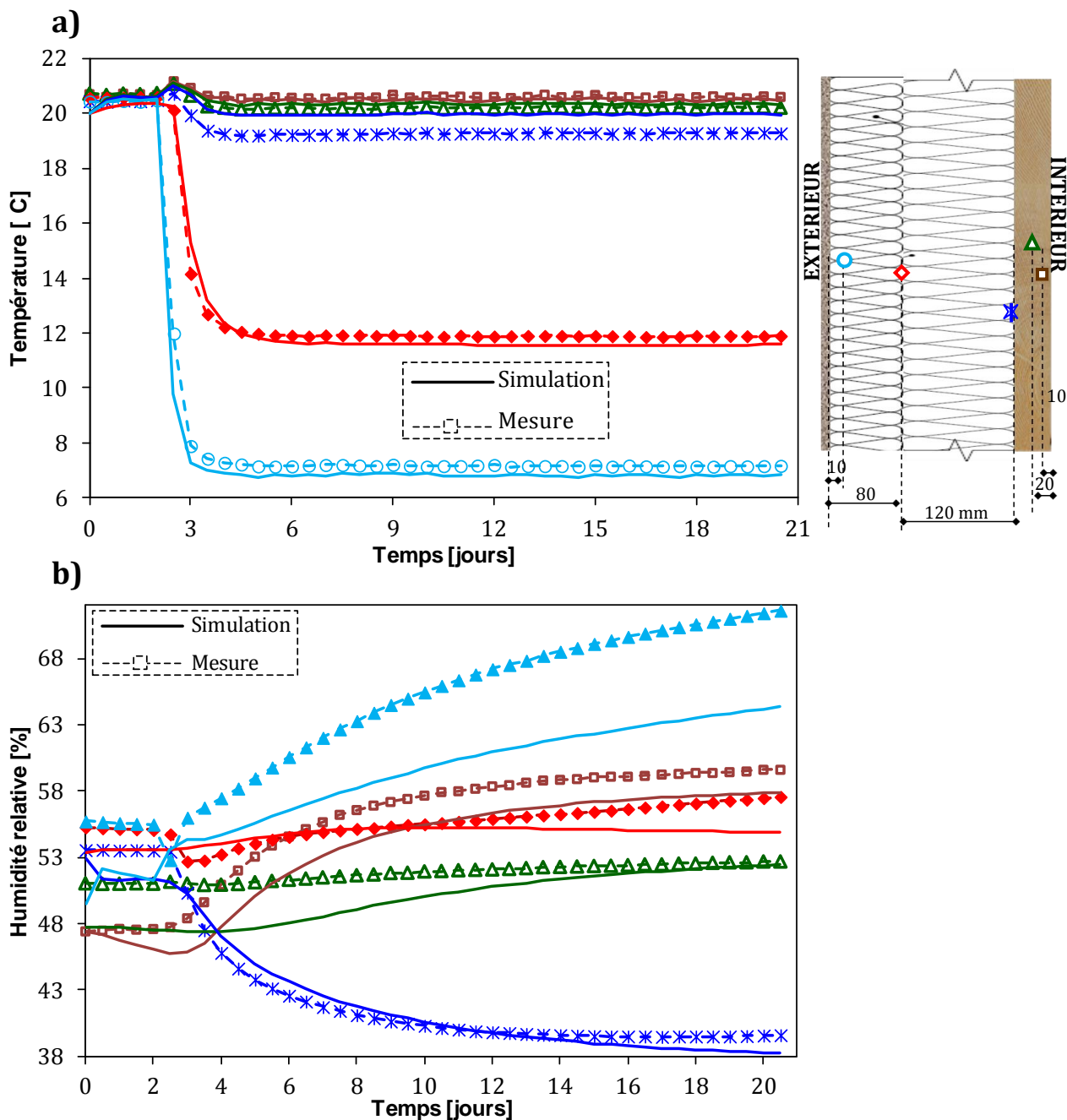


Figure 34. Evolution de la température (a) et de l'humidité relative (b) à plusieurs endroits au sein de la paroi 3 au cours de l'essai en conditions hivernales (emplacements définis sur la coupe ci-dessus)

d) Comportement dynamique des parois

Etant donné les écarts assez importants observés dans le bois massif de la paroi 2 et pour l'enduit de parement extérieur de la paroi 3, nous avons jugé plus pertinent de concentrer la confrontation sur les résultats obtenus avec la paroi 1.

Pour obtenir une meilleure lisibilité des résultats, nous avons séparé les résultats illustrant la réponse des parois aux oscillations de température et d'humidité relative avec une période de

48 heures (essais 4 et 5) des résultats obtenus lorsque les parois sont soumises aux mêmes amplitudes de variations mais avec une période de 6 jours (essai 6).

Les résultats de la première série d'essai en dynamique réalisée dans des conditions isothermes de part et d'autre des parois testées, montrent une oscillation de la température dans l'isolant en fibre de bois (j0 à j10 sur la Figure 35). Ces oscillations pourraient être la conséquence de l'effet de la régulation de l'humidité relative extérieure sur la température de l'air ambiant. Etant donné qu'une variation de la teneur en eau du matériau est accompagnée d'un changement de phase et génère donc une modification locale de la température, une autre explication de ces variations de température observées pourrait être la chaleur latente liée au changement d'humidité du matériau.

La bonne cohérence entre les mesures de température et les valeurs simulées en réponse aux différentes sollicitations climatiques dynamiques imposées (Figure 35 et Figure 37) conforte la capacité du code numérique BuildingPore à prédire le comportement thermique dynamique des matériaux hygroscopiques testés.

Sur la Figure 36 illustrant pour les essais en conditions dynamiques 4 et 5 l'évolution de l'humidité relative de l'air mesurée et celle prédite par le code à plusieurs endroits au sein de la paroi, on peut remarquer une différence des valeurs d'humidité relative initiale (à températures identiques) mesurées et calculées au début de l'essai 4 du fait de l'effet cumulé de la mauvaise prise en compte de certains paramètres dans le code qui a déjà été à l'origine des différences observées lors des essais en conditions hivernales expliquées précédemment. Les résultats expérimentaux permettent de montrer que pour des variations d'humidité avec une période de 48 heures, seules les couches superficielles de bois et d'isolant sont impactées par la diffusion d'humidité. Les valeurs mesurées semblent également être plus sensibles aux variations d'humidité comparées aux prédictions du code. Les résultats prédits par le code donnent des amplitudes de variations de l'humidité relative beaucoup plus faibles pour tous les points comparés alors que la valeur mesurée dans le bois massif à 10 mm de la surface intérieure montre des variations d'humidité relative.

La Figure 38 donne un comparatif de l'évolution de l'humidité relative de l'air mesurée et celle prédite par le code au sein de la paroi, au cours de l'essai en conditions dynamiques avec une période de variation de la température et de l'humidité relative de 6 jours. Les résultats montrent que la diffusion d'humidité mesurée est plus importante que celle calculée : on observe effectivement des amplitudes de variation d'humidité relative mesurées plus importantes que celles calculées. Par ailleurs, comparées aux mesures, les variations prédites par le calcul présentent un déphasage plus élevé par rapport aux variations imposées de part et d'autre de la paroi. L'hypothèse d'un coefficient de diffusion plus important aussi bien pour le bois massif que pour la fibre de bois est donc confortée. En effet :

- L'amplitude de variation de la teneur en eau dépend et évolue dans le même sens que coefficient de diffusion. L'utilisation d'un coefficient de diffusion plus faible dans le code induit donc une amplitude de variation plus faible. Etant donné que les températures mesurées et calculées sont quasi-identiques, les amplitudes de variations d'humidité relative calculées qui sont plus faibles que celles mesurées confortent l'hypothèse d'un coefficient de diffusion plus faible en expérimental qu'en simulation.

- Par ailleurs, nous observons un déphasage plus important des oscillations d'humidité relative calculées comparé aux résultats de mesure. De la même façon, le déphasage dépend du coefficient de diffusion et ils évoluent en sens inverse, ce dernier est donc plus faible pour le calcul.

Dans le code, la dépendance du coefficient de diffusion de l'isolant fibreux avec sa teneur en eau n'est pas prise en compte. Le fait de négliger cet effet pourrait également entraîner une mauvaise estimation de la redistribution d'humidité dans la paroi.

L'écart le plus important entre les pics d'humidité relative mesurés et calculés est de 2,7 %. Cet écart est observé dans le bois massif, à 10 mm de la surface intérieure. Les résultats présentés ici semblent affirmer qu'une épaisseur de 10 mm de bois massif est impactée par la diffusion d'humidité dans la paroi suite à des variations à court terme alors que les codes de calcul prédisent que pour des variations d'humidité ambiantes journalières, la diffusion d'humidité n'affecte qu'une épaisseur de 3 mm de bois massif.

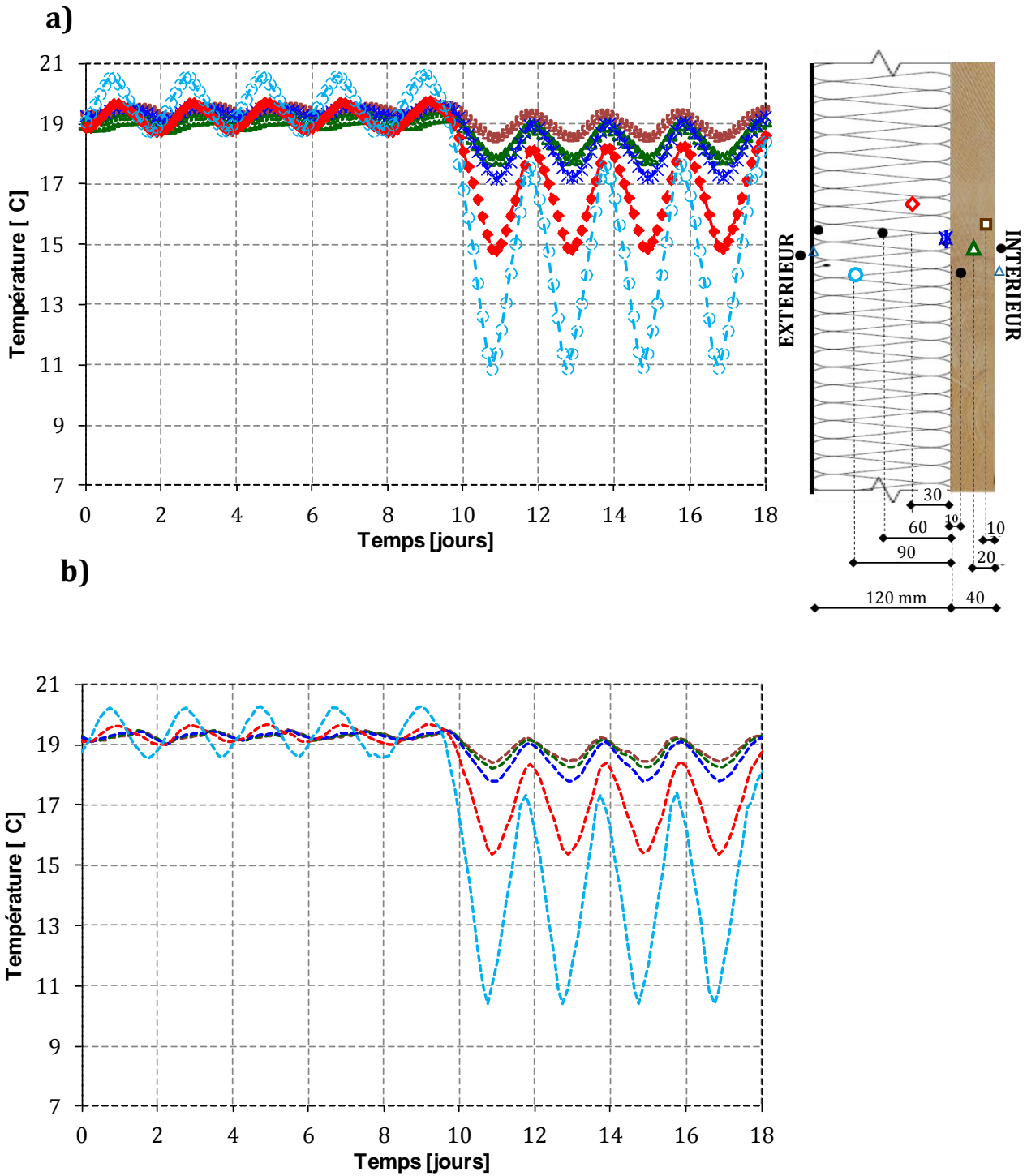


Figure 35. Evolution de la température mesurée (a) et simulée (b) à plusieurs endroits au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5

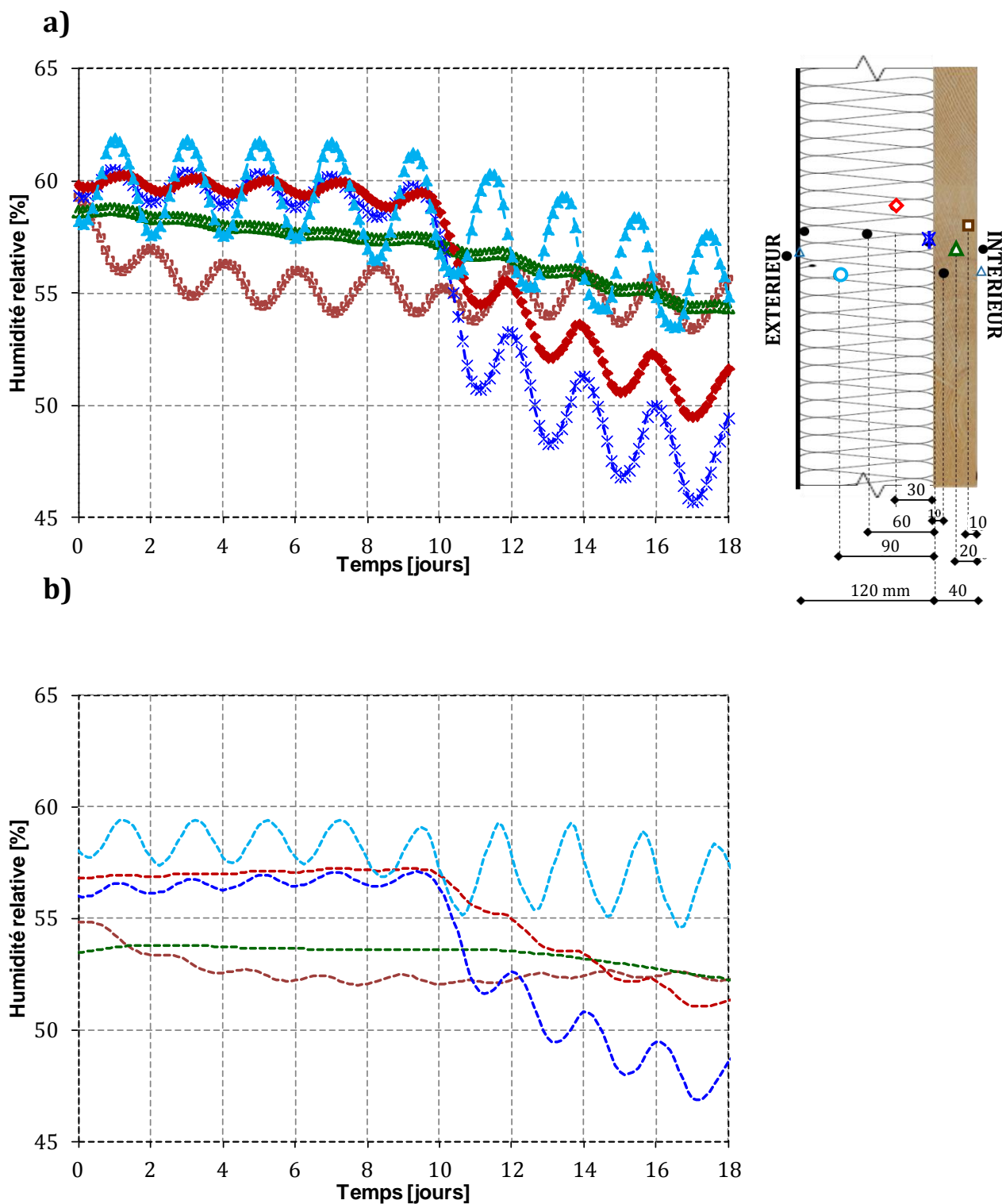


Figure 36. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée (a) et simulée (b) à plusieurs endroits au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5

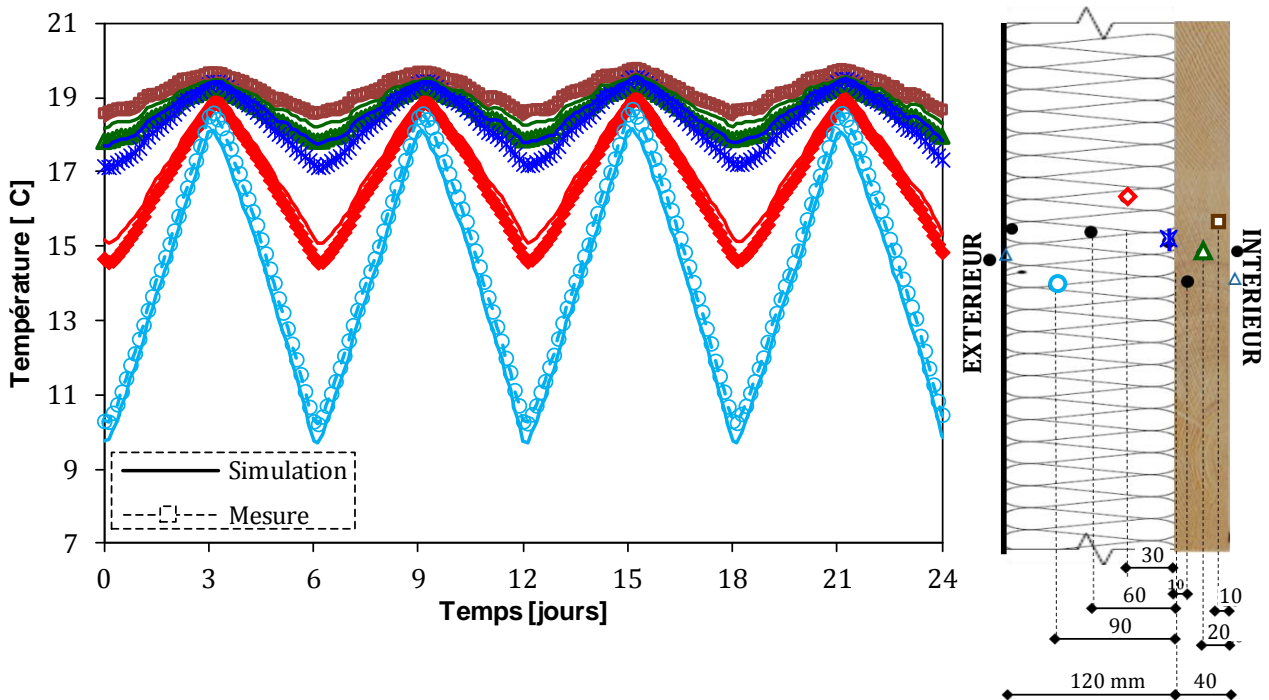


Figure 37. Evolution de la température mesurée et simulée au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6

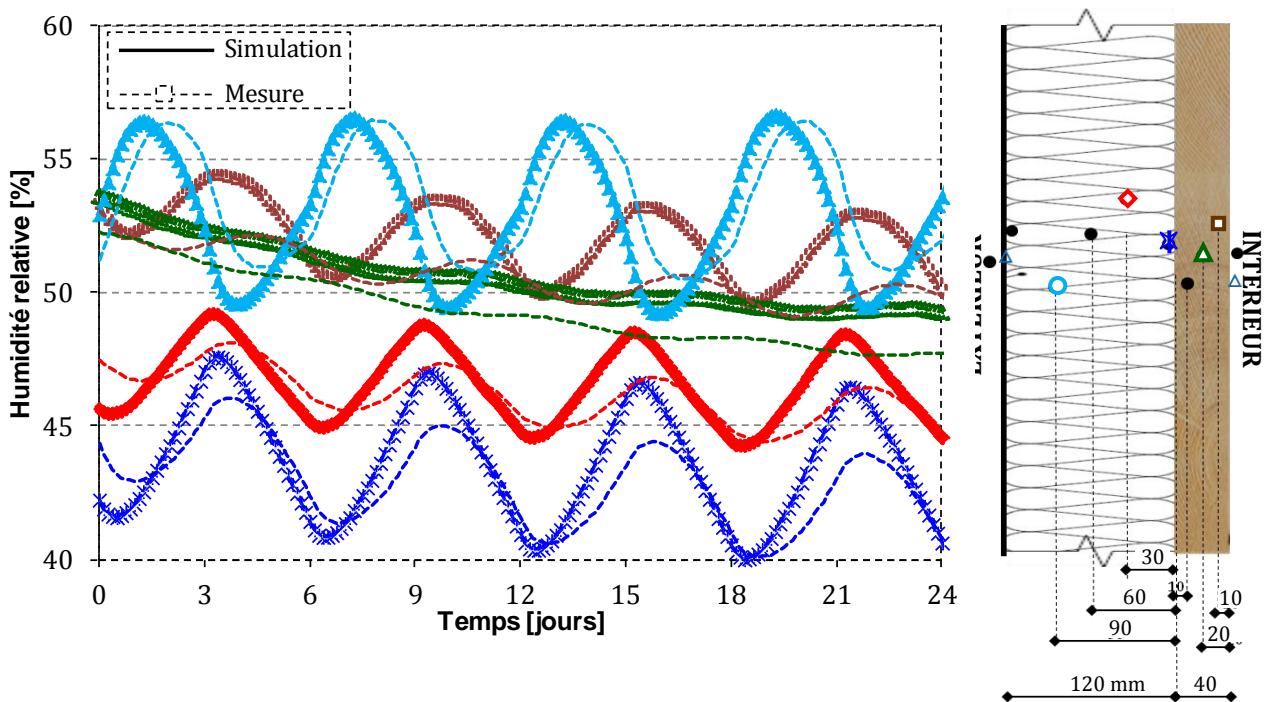


Figure 38. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée et simulée au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6

II.4.1.2. WUFI, logiciel commercial (Fraunhofer IBP).

Nous avons utilisé les mêmes conditions aux limites (sur la base des données expérimentales) que celles saisies dans BuildingPore pour simuler le comportement des parois testées avec le

logiciel WUFI. Les propriétés de matériaux utilisées pour la modélisation du comportement des parois sont également les mêmes que celles renseignées dans BuildingPore. Par ailleurs, les conditions initiales saisies sont également les conditions expérimentales utilisées dans la modélisation avec BuildingPore.

Pour la confrontation de la prédiction de WUFI avec les résultats expérimentaux, nous avons essayé de reproduire les essais de la seconde phase expérimentale (Figure 23).

a) Comportement en période hivernale

La Figure 39 donne l'évolution temporelle de la température et de l'humidité relative dans les différentes couches de la paroi 1 durant le 3^{ème} essai (Figure 23). L'emplacement des points illustrés sur les deux figures est donné sur la coupe de la paroi.

Les résultats montrent une bonne cohérence entre les températures calculées et mesurées pour les points de mesure considérés. Les plus grandes différences de température sont observées à l'interface entre l'isolant et le bois massif. L'écart maximal entre simulation et mesure y est de 1 °C. En régime dynamique, lorsque la température extérieure chute brutalement, WUFI montre une très bonne réactivité et une bonne capacité à reproduire le comportement thermique dynamique de la paroi 1.

La différence entre simulation et mesures est par contre plus accentuée sur les profils d'humidité relative. Dans le bois massif, les résultats numériques prédisent une humidité relative beaucoup plus faible que les mesures. En effet, au point situé dans le bois massif à 10 mm de la surface intérieure de la paroi, un écart maximal de 7,4 % est observé entre l'humidité relative calculée et celle mesurée durant l'essai. Par ailleurs, selon les résultats numériques, la courbe d'évolution temporelle d'humidité relative au point situé au milieu du bois massif reste quasi plate au cours de l'essai. Il semblerait donc que WUFI prédisent que ce point qui est situé à 20 mm de la surface intérieure de la paroi n'est pas sollicité par le transfert d'humidité, contrairement à ce qui est observé expérimentalement.

Des différences entre mesures et calcul, plus faibles que pour le bois massif, sont également observées dans l'isolant en fibre de bois. L'écart le plus élevé (4 % d'humidité relative) est enregistré à l'interface entre l'isolant et le bois massif.

Si nous comparons les résultats illustrés sur la Figure 32 avec ceux de la Figure 39, nous remarquons que le code BuildingPore et WUFI prédisent un transfert d'humidité plus lent que la réalité. Cette tendance est logique dans la mesure où les propriétés des matériaux utilisées (à l'origine de l'écart comme expliqué en II.4.1.1) pour la simulation sont les mêmes pour les deux codes. Cependant, la différence avec les valeurs d'humidité relative mesurées dans le bois massif à 10 mm de la surface intérieure de la paroi est plus importante pour les résultats de simulation avec WUFI (7,4 %) que pour les valeurs données par BuildingPore (5%). Par ailleurs, au milieu du bois massif, nous observons peu de différence entre l'humidité relative mesurée et celle calculée par BuildingPore alors que la différence est plus importante avec les valeurs données par WUFI, où l'humidité relative reste quasi constante dans le temps.

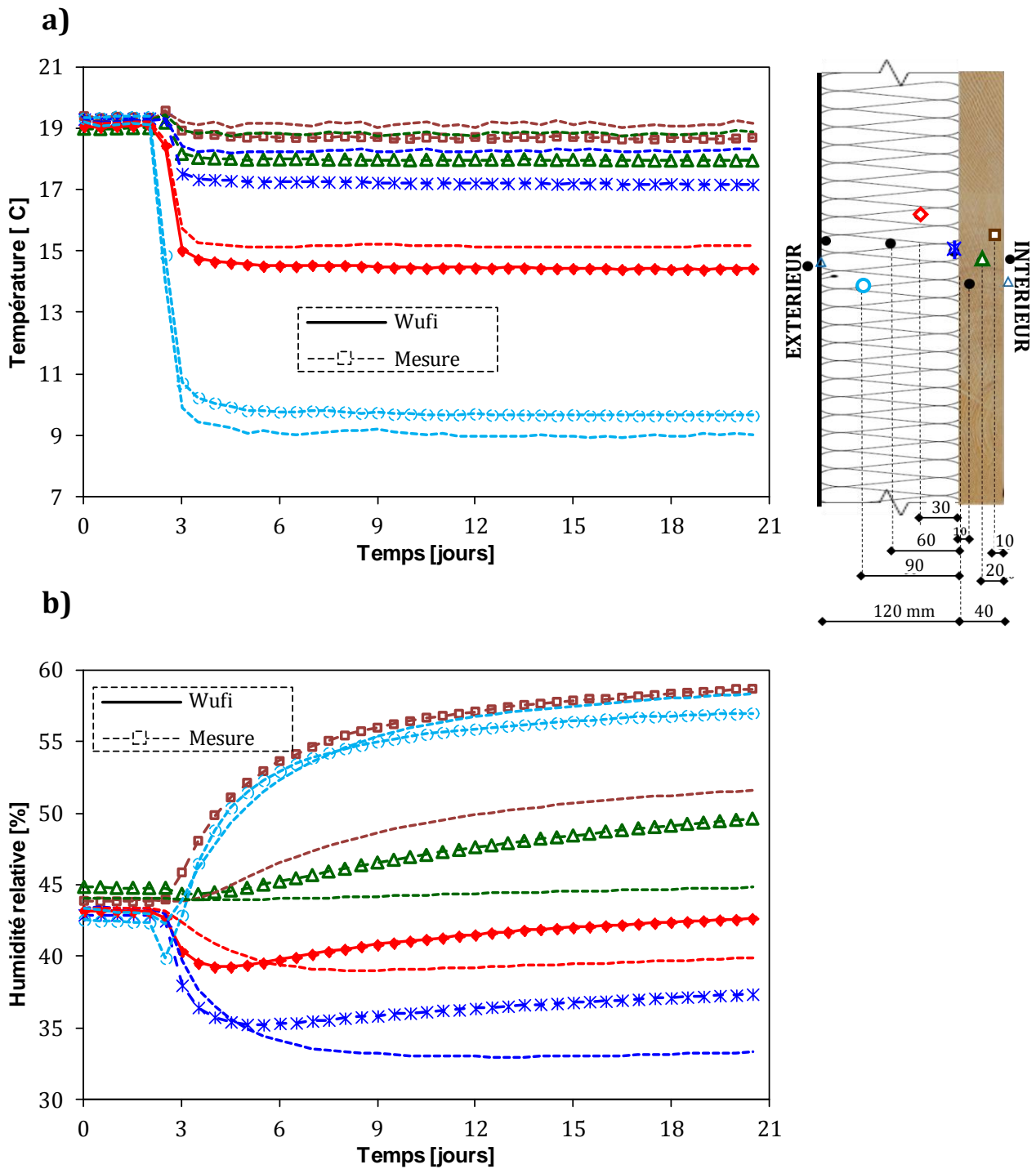


Figure 39. Evolution de la température (a) et de l'humidité relative (b) mesurées et simulées avec WUFI au sein de la paroi 1 au cours de l'essai 3 en conditions hivernales (emplacements définis sur la coupe ci-dessus)

b) Comportement dynamique des parois

La Figure 40 donne l'évolution temporelle de la température mesurée (a) et simulée (b) au sein de la paroi en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5. Nous pouvons observer que l'amplitude de variation des températures simulées est sensiblement plus faible

que celle mesurée. Néanmoins, les résultats comparatifs entre mesures et simulation montrent en général une bonne capacité du logiciel WUFI à prédire le comportement thermique dynamique des matériaux hygroscopiques testés.

Un comparatif des valeurs d'humidité relative mesurées avec les résultats numériques donnés par WUFI pour les essais 4 et 5 est donné sur la Figure 41. Une différence des valeurs d'humidité relative initiale (à températures identiques) mesurées et calculées est observée au début de l'essai 4 du fait de l'effet cumulé de la mauvaise prise en compte de certains paramètres dans le code. Les valeurs calculées avec WUFI pour l'isolant en fibre de bois semblent suivre la tendance de l'évolution des valeurs mesurées, excepté dans la couche située à 30 mm de la surface extérieure de la paroi. A cet endroit, contrairement à la mesure, l'humidité relative calculée au cours de l'essai 5 est plus élevée que celle calculée au cours de l'essai 4. Pour tous les points dans l'isolant, les amplitudes de variations d'humidité relative prédites par WUFI sont plus faibles comparés aux valeurs mesurées. Par ailleurs, les prédictions du code semblent éloignées des valeurs d'humidité relative mesurées dans le bois massif. En effet, durant les essais 4 et 5, l'humidité relative calculée dans le bois massif varie très peu alors que les mesures donnent des variations oscillantes de l'humidité relative. Le même constat a également été observé sur les résultats comparatifs entre mesures et calcul avec le code BuildingPore.

La Figure 42 donne un comparatif de l'évolution de l'humidité relative de l'air mesurée et celle prédite par le code au sein de la paroi, au cours de l'essai en conditions dynamiques avec une période de variation de la température et de l'humidité relative de 6 jours (essai 6). Les résultats comparatifs confortent notre constatation selon laquelle la diffusion d'humidité mesurée est plus importante que celle prédite par le calcul. En effet, les amplitudes de variation d'humidité relative mesurées sont plus importantes que celles calculées avec le logiciel WUFI. La différence d'amplitude est importante dans le bois massif où de faibles variations de l'humidité relative calculée avec WUFI sont observées alors que les variations mesurées sont plus importantes. Un déphasage entre les variations d'humidité relative prédites par le calcul et celles mesurées est également observé aussi bien dans le bois massif que dans l'isolant en fibres de bois. Nous observons donc les mêmes tendances entre la prédiction du code numérique BuildingPore et celle du logiciel WUFI.

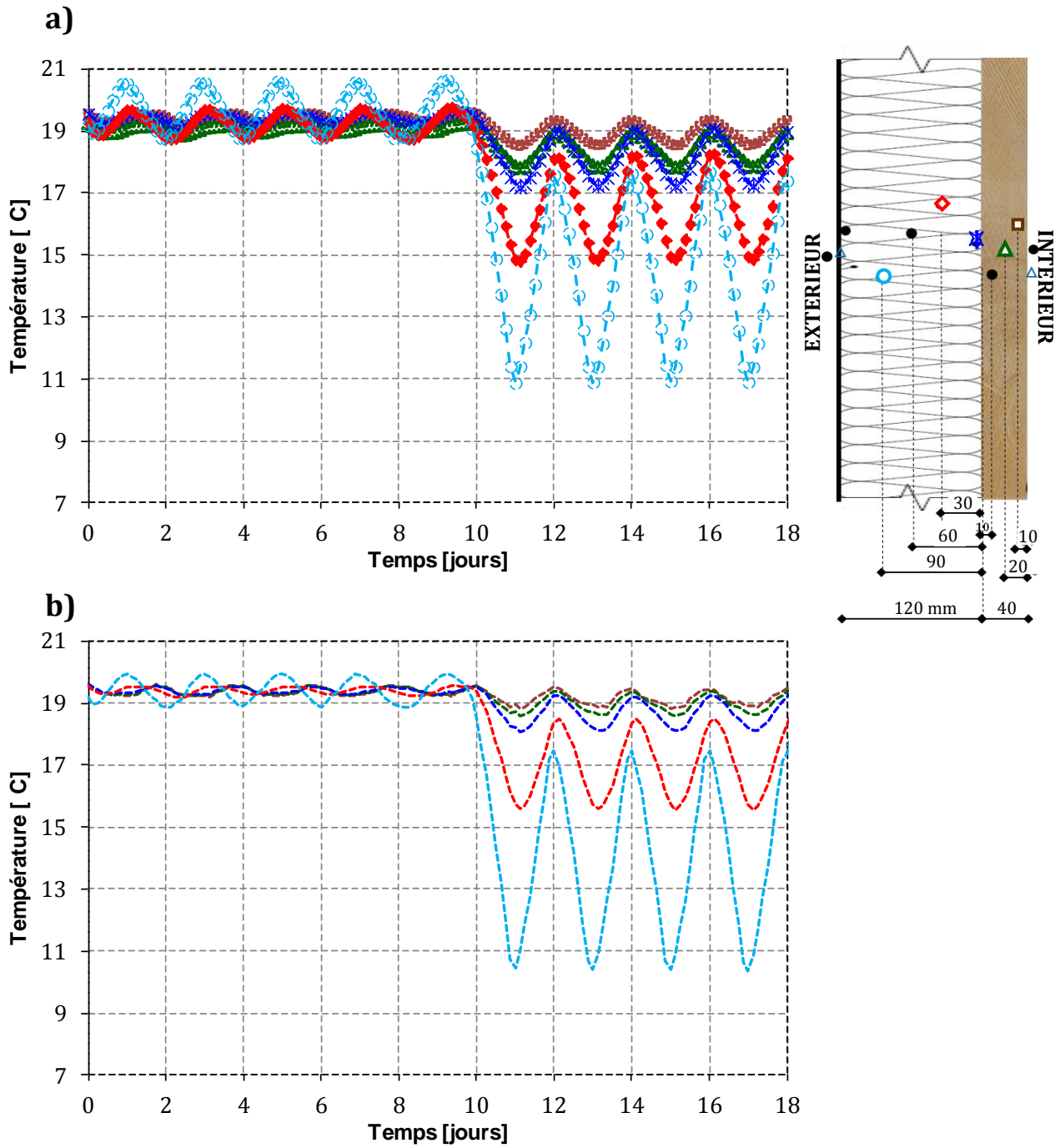


Figure 40. Evolution de la température mesurée (a) et simulée avec WUFI (b) au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5

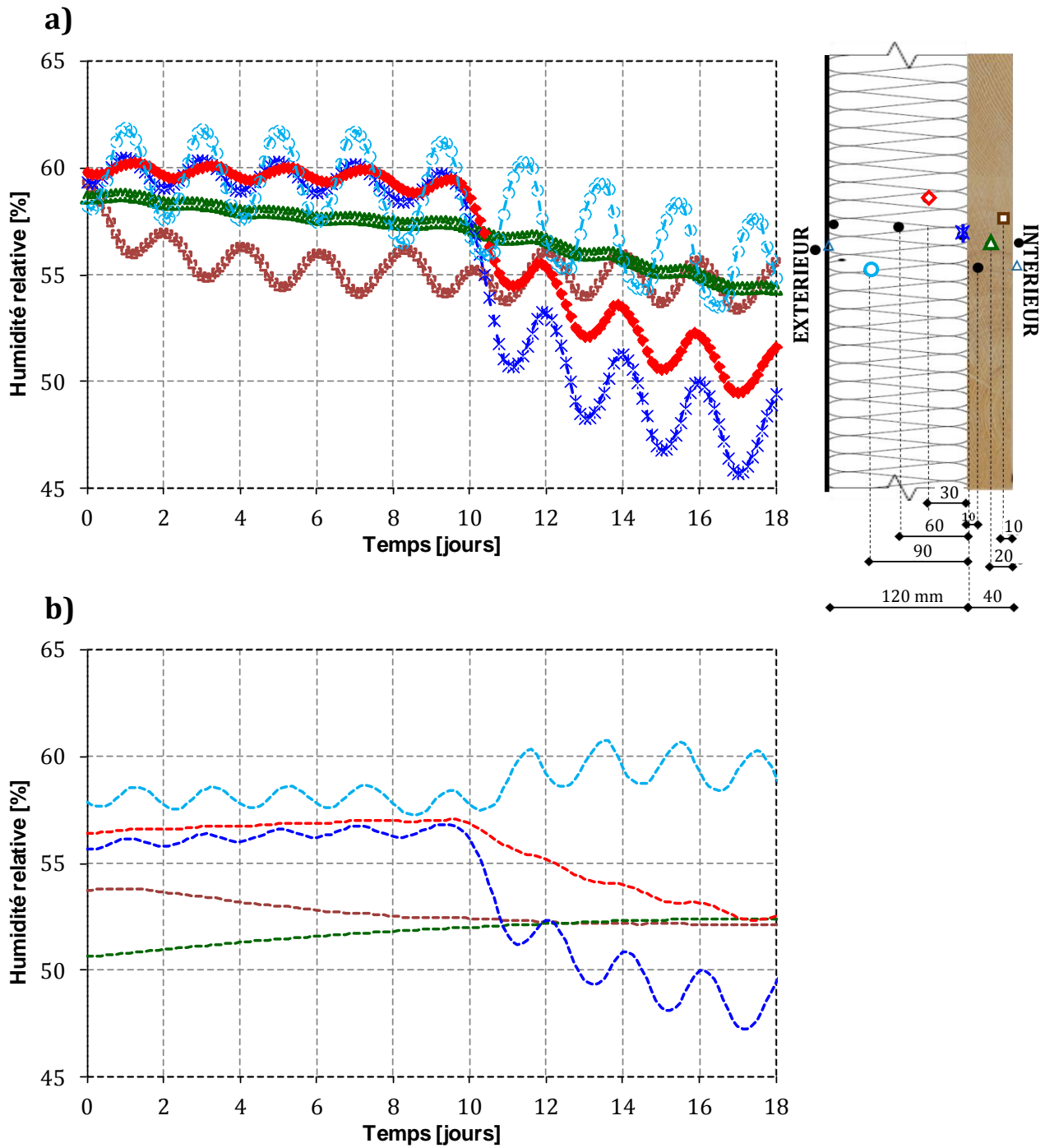


Figure 41. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée (a) et simulée avec WUFI (b) au sein de la paroi 1 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5

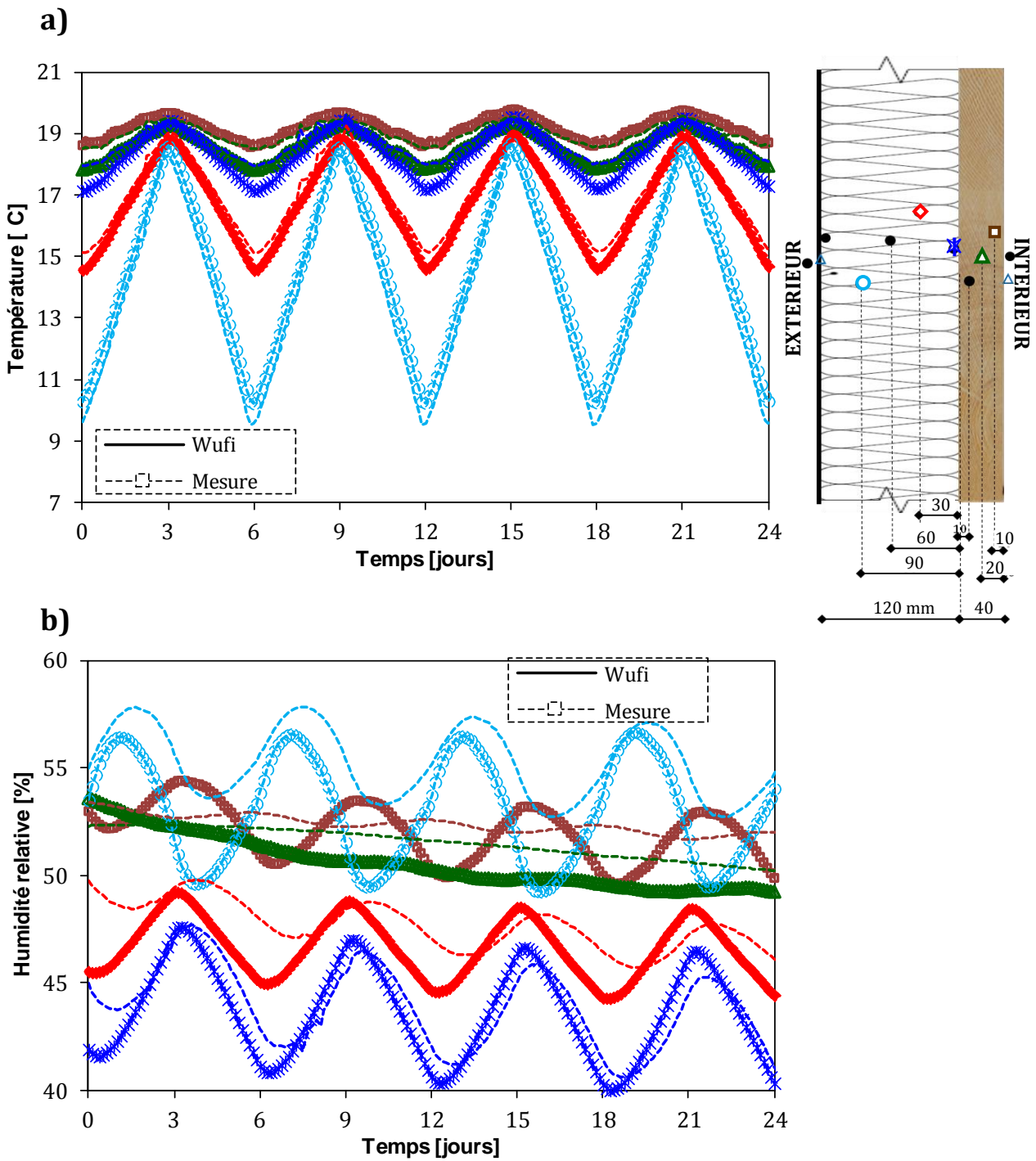


Figure 42. Evolution de la température (a) et de l'humidité relative (b) mesurées et simulées avec WUFI au sein de la paroi en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6

II.4.2. Caractéristiques des parois bois courantes

II.4.2.1. Résistance thermique en régime permanent

Dans le domaine de la construction, le comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment et plus précisément des parois est le plus souvent caractérisé par des propriétés telles que la résistance thermique des parois, le déphasage thermique apporté par ces mêmes parois ou leur capacité à amortir l'amplitude des fluctuations de température extérieure. Bien que ces propriétés soient importantes, leur évaluation se fait le plus souvent analytiquement et les relations utilisées dans les calculs sont basées uniquement sur la conduction. En négligeant ainsi les transferts par rayonnement ou par convection, une mauvaise estimation de ces propriétés thermiques pourrait apparaître, d'où la nécessité de recourir à des mesures expérimentales.

Un écart entre les valeurs réelles mesurées et les valeurs calculées analytiquement est observé parmi tous les résultats obtenus, plusieurs raisons pourraient expliquer cet écart :

- Rappelons que le calcul utilisé pour l'estimation de la résistance thermique d'une paroi est réalisé en additionnant les résistances thermiques de toutes les couches de matériaux de la

paroi. Le calcul de chaque résistance thermique utilise la relation $R = \frac{d}{\lambda}$ (m².K.W⁻¹) (1. 4 et ne prend donc en compte ni la convection au sein de la paroi, ni les résistances aux interfaces, ce mode de calcul est donc susceptible de créer des écarts entre la mesure et le calcul.

- Par ailleurs, les propriétés des matériaux utilisées dans le calcul (propriétés données dans l'Annexe E) proviennent des fiches techniques de ces matériaux. Pour la conductivité thermique, la valeur annoncée est une valeur moyenne généralement mesurée à un taux d'humidité donné (conditions normales d'essai : 23 °C 50% HR ou 20 °C 65% HR). Cette valeur ne prend donc pas en compte la dépendance de la conductivité thermique avec l'humidité et la température, ce qui peut créer un écart entre la mesure et le calcul. En effet, les mesures réalisées par le LEMTA dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS (Traoré, 2011) ont montré que la conductivité thermique de l'isolant en fibre de bois de 160 kg.m⁻³ (utilisé dans la paroi en panneaux contrecollés, Annexe E) peut varier de 0,039 à 0,04 W.m⁻¹.K⁻¹ pour une température moyenne de 15 et 25°C respectivement. D'autre part, la conductivité thermique de cet isolant à 15 °C (température moyenne utilisée dans nos mesures) est de 0,039 W.m⁻¹.K⁻¹ pour un échantillon laissé en humidité ambiante et 0,037 W.m⁻¹.K⁻¹ pour un échantillon anhydre.
- Dans le cas de la paroi en rondins non isolés, un écart de 21,9 % est observé entre mesure et prévision. Rappelons que les calculs sont basés sur un diamètre moyen des rondins, ce qui pourrait induire une erreur dans l'évaluation du flux de chaleur traversant la paroi. D'autre part, l'impact de l'étanchéité entre chaque rondin ne peut être pris en compte lors des calculs. Le transfert d'air est pourtant un facteur affectant de manière importante ce flux de chaleur, ce qui pourrait affecter également le calcul prévisionnel pour ce genre de paroi.

Le Tableau 5 donne les valeurs de résistances thermiques mesurées comparées aux valeurs calculées par la méthode analytique.

Tableau 5 : Résistances thermiques mesurées (en régime permanent) et calculées de plusieurs compositions de parois

| <i>Type de structure</i> | <i>Composition de paroi</i> | <i>R mesurée [m².K/W]</i> | <i>R calculée [m².K/W]</i> | <i>Ecart mesure/calcul</i> |
|--------------------------|---|--|---|--------------------------------|
| madrier | madrier 70 mm / 160 mm isolant / 40 mm air immobile / 19 mm frise | 5 | 4,7 | 7,3% |
| KLH | panneaux contrecollés 94 mm / 180 mm fibres de bois rigide / crépis 3 couches | 5,8 | 5,3 | 11% |
| KLH | panneaux contrecollés 94 mm / 250 mm cellulose / crépis 3 couches | 5,7 | 7,6 | - 24,3% |
| ossature bois | bardage 21 mm / lattage 25 mm / fibres de bois rigides 35 mm / fibres de bois souples 200 mm / MFP 12 mm / vide technique 40 mm / fermacell 13 mm | 5,6 | 6,2 | -10% |
| ossature bois | crépis / fibres de bois rigides 40 mm / ouate de cellulose 140 mm / vide technique 40 mm / fermacell 13 mm | 5,6 | 5,1 | 9% |
| rondins | rondins 35 mm d'épaisseur moyenne | 2,1 | 2,7 | -21,9% |
| rondins | rondins 35 mm d'épaisseur moyenne / ouate de cellulose 120 mm d'épaisseur moyenne | 5,4 | 5,6 | -3% |

II.4.2.2. Déphasage et amortissement

Les résultats obtenus en période estivale (essais détaillés en II.3.3.3) ont pu mettre en évidence le comportement thermique de chaque paroi en période de forte chaleur, notamment en réponse à des oscillations de température de fortes amplitudes. Le Tableau 6 donne pour chaque matériau les valeurs mesurées et calculées des déphasages et amortissements des ondes de chaleur extérieures. Les valeurs calculées ont été obtenues en utilisant les relations 1.22 et 1.23 et les propriétés des matériaux données en Annexe E.

Pour le cas du bois massif en particulier, une paroi en madriers empilés et doublée par l'intérieur avec un mélange fibre de bois-laine de chanvre a été testée. Le suivi de la température dans les différentes couches de la paroi a pu montrer que le bois massif de 70 mm d'épaisseur apporte en moyenne un déphasage de 4 heures, des oscillations de températures extérieures (Figure 43). Ceci est d'autant plus intéressant que le matériau provoque une atténuation significative des amplitudes de températures, ce qui réduirait le risque d'inconfort thermique à l'intérieur de l'habitat. Les valeurs de déphasage calculées par Asan & Sancaktar (1998) donnent un déphasage de 14 heures pour une épaisseur de 200 mm de bois massif. Un autre travail (Asan, 2006) de détermination des déphasages et amortissements de différents matériaux donne un déphasage de 2,27 h et 5,89 h pour respectivement 50 et 100 mm de bois. Ces résultats concordent avec ceux obtenus dans le travail présenté ici.

Concernant le comportement thermique des isolants hygroscopiques testés, le déphasage moyen apporté par ces isolants est largement en dessous des valeurs obtenues par les calculs standards et annoncées par les fabricants pour ces mêmes produits. Pour le cas de la paroi en madrier, le panneau souple de 120 mm d'isolant fibreux (bois + chanvre) n'apporte que 1 heure 30 min de déphasage (Figure 43) au lieu des 4 heures estimées par le calcul. Le même type d'écart est observé sur un isolant en fibres de bois souples, où 100 mm d'isolant n'apporte que 2 heures de déphasage (Figure 45) alors que le calcul en prévoit 4 heures. L'écart est par contre plus faible, lorsque l'isolant est rigide et donc plus dense. En effet, l'isolant rigide en fibre de bois de 60 mm d'épaisseur (steico protect : 265 kg/m^3) apporte en moyenne un déphasage de 3 heures (Figure 44) alors que la valeur calculée est de 4h 45 minutes. Pour un autre isolant en fibre de bois (steico therm : 160 kg/m^3), le déphasage mesuré est de 1 heure 45 min et celui calculé de 4 heures. Ces écarts entre mesures et calculs pourraient provenir du fait que les isolants fibreux de faible densité ont une porosité plus élevée, et pourraient donc être le siège de phénomènes de convection, qui ne sont pas pris en compte dans les calculs classiques couramment utilisés pour les caractérisations commerciales des matériaux. L'effet de la convection est moins important sur les isolants plus denses ce qui pourrait expliquer le plus faible écart entre mesures et calculs. Par ailleurs, en mesurant la chaleur spécifique anhydre de certains matériaux étudiés dans ce travail, le LEMTA (Traoré, 2011) a obtenu des valeurs moyennes de chaleur spécifique de $1250 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Les fabricants donnent une valeur de $1600 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ce qui correspondrait à une valeur de

13,5% d'humidité sur masse sèche. L'humidité du matériau a donc une forte influence sur sa chaleur spécifique et donc sur le déphasage mesuré.

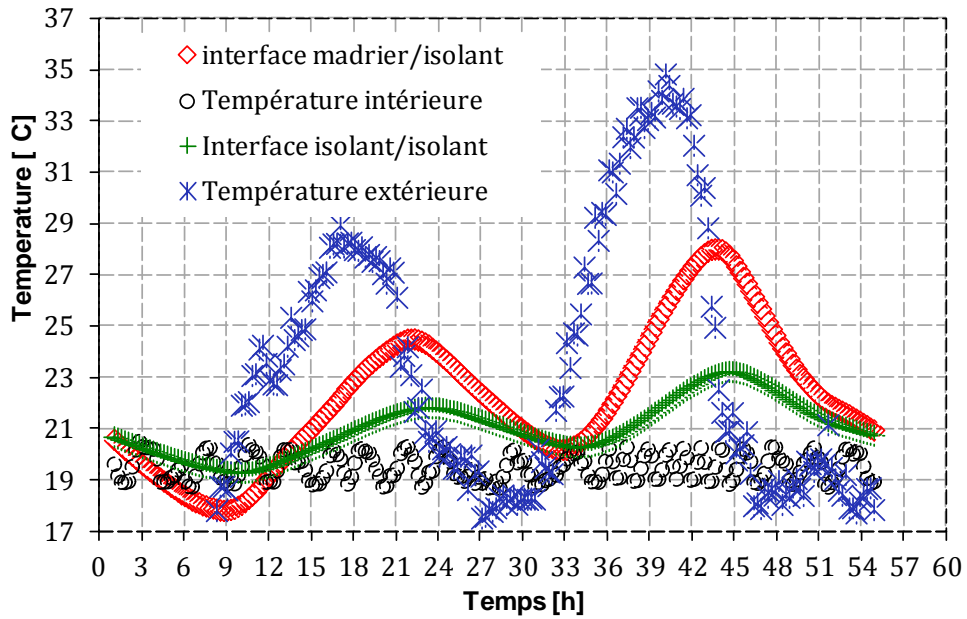


Figure 43. Evolution de la température dans les couches de la paroi madrier

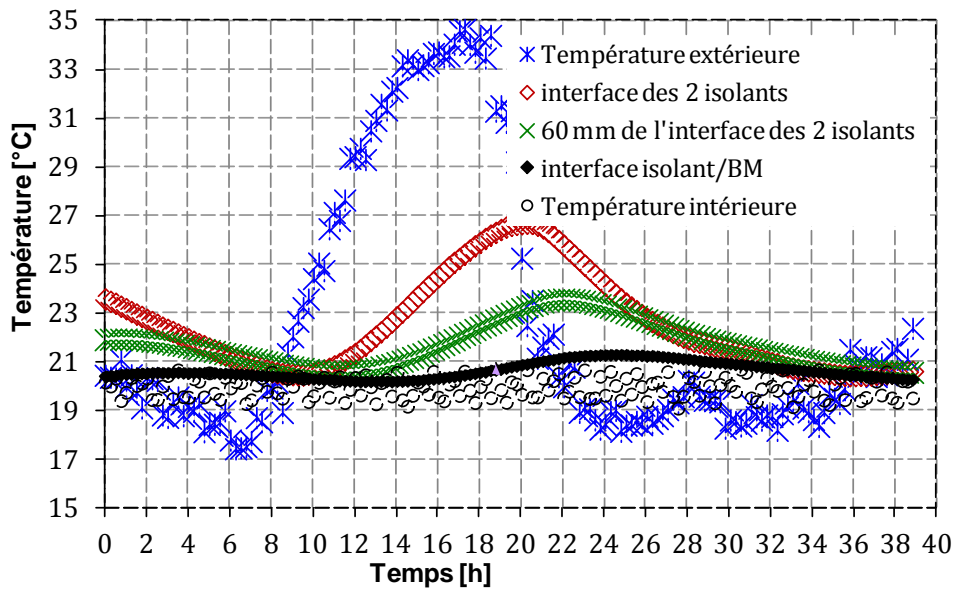


Figure 44. Evolution de la température dans les couches de la paroi en panneaux contrecollés avec isolation en fibres de bois rigide

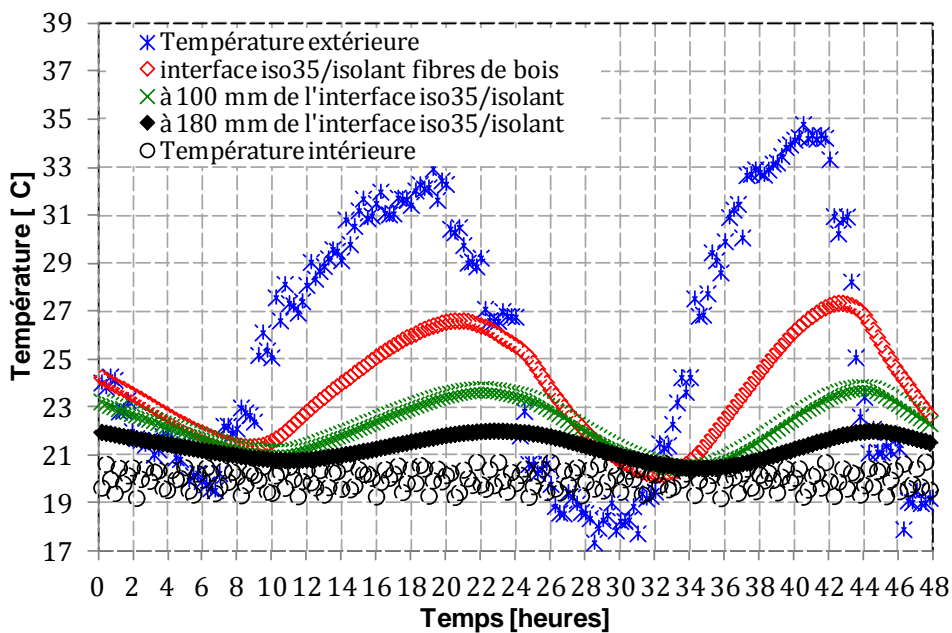


Figure 45. Evolution de la température dans les couches de la paroi ossature avec isolation fibres de bois souples

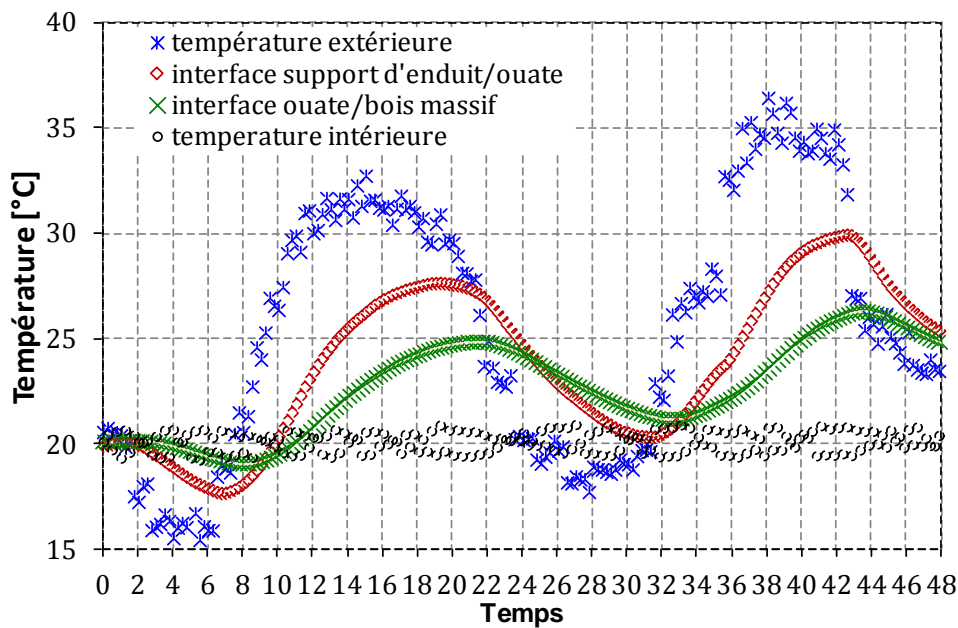


Figure 46. Evolution de la température dans les couches de la paroi en panneaux contrecollés avec isolation en ouate de cellulose

Tableau 6 : Déphasages thermiques et amortissements mesurés et calculés de différents matériaux

| Type de matériau | Matériau | Masse volumique | Epaisseur [mm] | Déphasage mesuré [h] | Déphasage calculé [h] | Amortissement mesuré [%] | Amortissement calculé [%] |
|------------------|--------------------|-----------------|----------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| Bois massif | Madrier épicéa | 450 | 70 | 4 | 3,8 | 56 | 37 |
| | Rondins épicéa | 450 | 190 | 9 | 10,3 | 9 | 7 |
| Isolants rigides | Steico protect | 265 | 60 | 3 | 4,7 | 40 | 29 |
| | Homatherm UD35 | 270 | 35 | 2 | 2,8 | 44 | 48 |
| | Steico therm | 160 | 60 | 1,7 | 4 | 50 | 35 |
| | Hofatex Systherm | 210 | 40 | 2 | 2,9 | 53 | 47 |
| Isolants souples | Sylvactis FX55 | 50 | 100 | 2 | 4 | 57 | 35 |
| | Isonat Plus 45 | 45 | 120 | 1,5 | 4,3 | 50 | 32 |
| Isolant en vrac | Ouate de cellulose | 65 | 90 | 2 | 3,7 | 25 | 38 |

II.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le dispositif expérimental de laboratoire permettant d'étudier les transferts de chaleurs et d'humidité au sein d'une paroi. Le dispositif permet d'imposer des conditions en température et en humidité stationnaires ou dynamiques aux parois. La réponse des parois à ces sollicitations hygrothermiques est relevée grâce à la métrologie mise en place, et qui permet de suivre l'évolution des profils de température et d'humidité dans les différentes couches de matériaux composant les parois-test.

Des campagnes d'essai ont été menées afin de valider le code numérique BuildingPore, développé dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS. La confrontation des résultats expérimentaux avec la prédiction de BuildingPore a montré une bonne capacité du code à prédire le comportement thermique et hydrique des parois. Cependant, les résultats comparatifs entre mesures et simulation montrent des différences de profils d'humidité dans certaines zones de la paroi. Les plus grands écarts ayant été observés dans le bois massif. Compte tenu de la variabilité naturelle de ce matériau, il est possible que les grandeurs moyennes entrées dans le code aient conduit à sous-estimer les transferts d'humidité observés dans ces essais. La confrontation des résultats expérimentaux avec la prédiction du logiciel commercial WUFI a également montré le potentiel prédictif de ce code qui a déjà été validé. Dans les essais réalisés, nous avons remarqué que les résultats numériques donnés par BuildingPore étaient plus proches des valeurs expérimentales que celles prédites par WUFI. BuildingPore possède donc un potentiel intéressant quant à la prédiction des transferts couplés chaleur-masse dans les parois des constructions bois.

Des essais de caractérisation du comportement thermique de parois représentatives des solutions constructives les plus courantes ont également été menés. Ces essais ont permis de mesurer la résistance thermique, le déphasage thermique et l'amortissement de ces solutions constructives. La comparaison des valeurs mesurées avec les valeurs obtenues par le calcul et souvent utilisées par les fabricants, a montré que les valeurs de déphasage thermique des matériaux de faible densité étaient plus faibles que celles annoncées par les fabricants.

CHAPITRE III.

III. Etude expérimentale des transferts chaleur-masse à l'échelle de l'enveloppe : Approche simplifiée sur modules

L'objectif du travail présenté dans ce chapitre est d'une part de présenter les dispositifs expérimentaux développés à l'échelle enveloppe, puis de proposer les résultats obtenus dans les premières campagnes d'essai. Les données rassemblées pour cette échelle enveloppe n'ont pas été confrontées à des modèles.

Initialement, le projet n'envisageait l'étude expérimentale des transferts de chaleur et de d'humidité que sur les bâtiments dits réels. Les premières campagnes d'instrumentation sur des bâtiments mis à disposition par les constructeurs partenaires et l'étude bibliographique ont vite montré la difficulté de réaliser une expérimentation complète et fiable sur une construction existante. Il a donc été rapidement envisagé de développer un dispositif expérimental supplémentaire à une échelle intermédiaire. La solution retenue est une cellule cubique de 3 m d'arrête environ sur laquelle seules les parois verticales seraient sollicitées. Cinq cellules ont été construites sur un même site (ENSTIB) ce qui permet d'étudier et de comparer cinq constructions, soit cinq systèmes constructifs différents, exposés à des conditions climatiques parfaitement identiques. Par la suite nous utiliserons le terme de module.

Les conditions de sollicitation intérieures sont contrôlées sur les cinq modules qui ne sont pas occupés. La confrontation des résultats des modèles numériques dédiés à l'enveloppe du bâtiment aux résultats expérimentaux à l'échelle des modules permettra donc de valider préalablement le potentiel prédictif de ces codes numériques avant la phase de validation finale sur des bâtiments en conditions d'utilisation réelle.

III.1. Descriptif technique des modules

III.1.1. Principe général des modules

Au cours de cette étude, nous avons fixé comme objectifs principaux la caractérisation de la performance hygrothermique de chaque système constructif étudié ainsi que du confort thermique et hydrique intérieur. La métrologie utilisée dans les différents modules a donc été choisie afin de permettre le suivi du comportement en température et en humidité de différents modules soumis aux mêmes sollicitations climatiques.

Les modules développés dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS ont été conçus pour répondre au cahier des charges suivant:

- Permettre un suivi détaillé du comportement thermique et hydrique de parois verticales en limitant les sources d'influence
- Contrôler l'ambiance intérieure en température et humidité de manière à permettre la simulation de différentes conditions d'occupation
- Pouvoir comparer dans des conditions identiques les différents systèmes constructifs bois mis en œuvre

Pour les besoins de l'étude, les cinq modules ont été construits sur le site de l'ENSTIB à Epinal. Leur exposition aux mêmes conditions climatiques (orientation identique) permet d'obtenir des résultats comparables du comportement thermique et hydrique des différents systèmes constructifs étudiés. Tous les modules sont construits sur terre-plein et possèdent la même forme et les mêmes dimensions intérieures. Ils ont une surface intérieure de $3 * 3 \text{ m}^2$ et une hauteur sous plafond de 2,4 m. Chaque module possède donc un volume intérieur de $21,6 \text{ m}^3$. Les dimensions extérieures varient en fonction de l'épaisseur des parois installées. Le suivi du comportement des modules a été principalement concentré sur les parois verticales. Aussi, les planchers bas et haut ont-ils été conçus étanches à l'air et à la vapeur d'eau. L'isolation de ces parties a également été renforcée. La porte ($0,85 \text{ m} * 2,15 \text{ m}$) est installée sur la paroi Nord et a été conçue pour être étanche aux transferts d'air, d'humidité et de vapeur d'eau. Afin de simplifier l'établissement du bilan énergétique pour les besoins du code numérique, les modules ne possèdent pas de fenêtre.

Le Tableau 7 récapitule les caractéristiques des composants mis en œuvre, hors parois verticales.

L'implantation des modules a été choisie pour que chaque paroi soit orientée suivant une direction cardinale. Les modules sont donc orientés d'Est en Ouest et du Nord au Sud. Les parois des cinq modules ont été fournies par les constructeurs partenaires du projet TRANSBATIBOIS sur la base des parois testées sur le banc expérimental lors de la campagne de mesure détaillée dans le chapitre II. Une vue d'ensemble ainsi que des photos illustrant la phase de construction des modules sont données sur la Figure 47. La Figure 48 donne une coupe verticale des modules.

Tableau 7. Composition détaillée de chaque module et caractéristiques thermiques

| Partie | Composition (intérieur vers l'extérieur) | Conductivité thermique [W/m.K] | Epaisseur [m] | Epaisseur d'air équivalente Sd [m] | Coefficient U global [W/m ² .K] |
|---------------|--|--------------------------------|---------------|------------------------------------|--|
| Porte | Pare-vapeur | - | - | 1500 | 0,11 |
| | Polyuréthane | 0,022 | 0,2 | | |
| Plancher bas | Pare-vapeur | - | - | 1500 | 0,1 |
| | KLH | 0,1 | 0,06 | | |
| | Polyuréthane | 0,022 | 0,2 | | |
| Plancher haut | Pare-vapeur | - | - | 1500 | 0,07 |
| | KLH | 0,1 | 0,06 | | |
| | Ouate de cellulose | 0,043 | 0,6 | | |



Figure 47. Construction et vue d'ensemble des modules

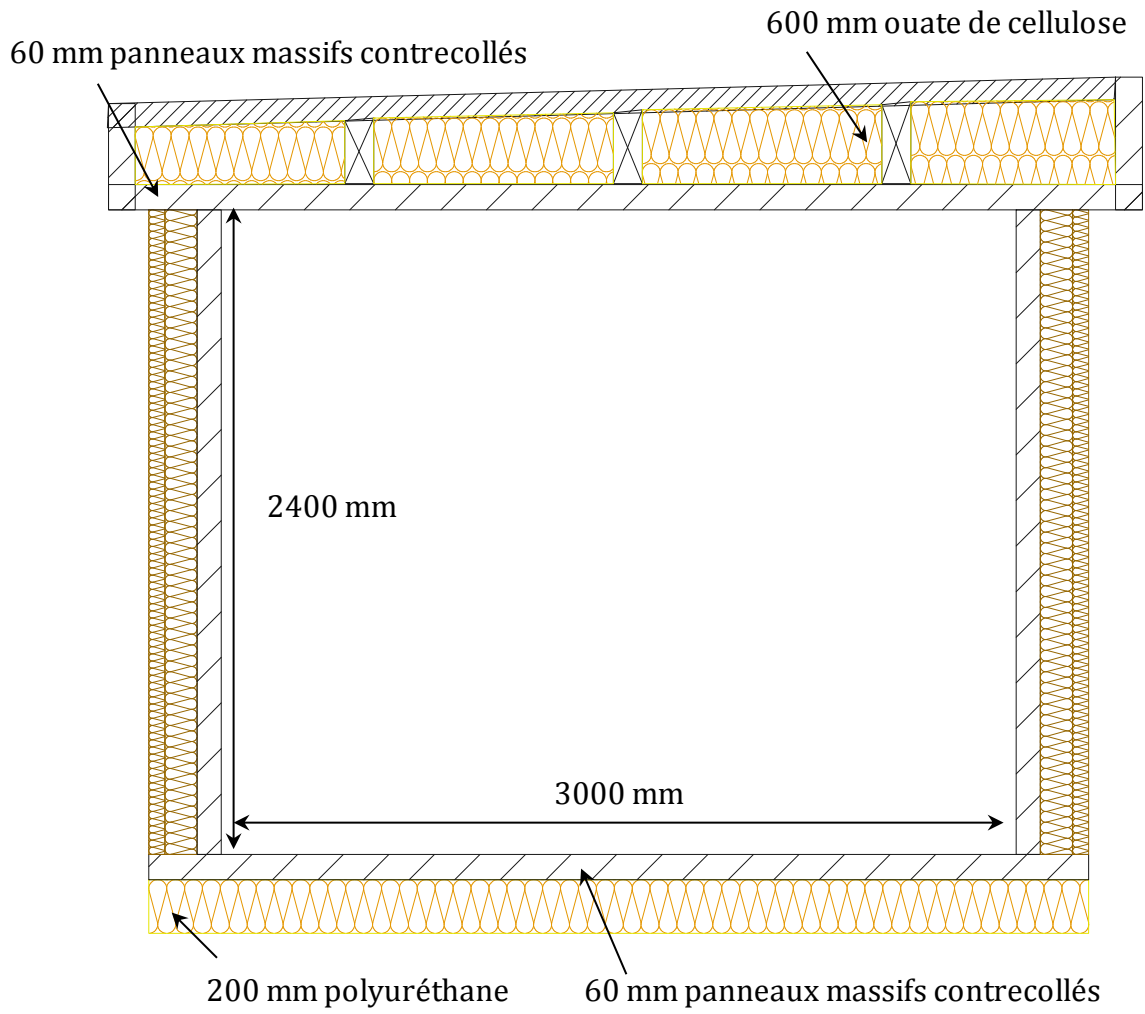


Figure 48. Coupe verticale d'un module

III.1.2. Description détaillée des parois verticales des cinq modules

Les cinq modules caractérisés diffèrent principalement par la composition de leurs parois verticales. Chaque module correspond à une composition type de paroi utilisée par chaque constructeur. Ainsi, parmi les 5 modules, on retrouve :

- Un module en panneaux contrecollés massifs (de marque KLH) avec une isolation par l'extérieur en fibres de bois rigide et un revêtement extérieur en crépis. Ce module a été fourni par l'entreprise LIGNATEC
- Un module en madriers massifs empilés, fourni par l'entreprise POIROT Construction, avec une isolation intérieure en fibres de bois et de chanvre souple
- Un module en ossature bois : bardage extérieur bois et isolation en fibres de bois souple, que l'on désignera par la suite par ossature fibres de bois. Ce module a été proposé et livré par l'entreprise ACMB.
- Un module en ossature bois fourni par l'entreprise ECOLOGGIA. Le parement extérieur est en crépis sur panneau de fibres de bois. L'isolation entre montants d'ossature est en ouate de cellulose insufflée. Pour la suite de l'étude, ce module sera désigné par ossature ouate de cellulose
- Un module en ossature bois fourni par l'entreprise ECOLOGGIA, avec crépis extérieur sur PSE, que l'on désignera par la suite par ossature laine de verre. L'isolation entre montants est en laine de verre,.

La plupart des matériaux testés sont des matériaux hygroscopiques et ouverts à la diffusion de vapeur sauf ceux utilisés dans le module en ossature avec isolation en laine de verre. Nous avons choisi de tester également ce dernier module afin de comparer nos solutions ouvertes à la diffusion de vapeur d'eau à cette solution courante fermée à la vapeur d'eau.

La composition détaillée de chaque paroi de module ainsi que l'emplacement des capteurs de suivi du comportement hygrothermique des parois orientées à l'Est sont illustrés sur les Figure 49 à Figure 53.

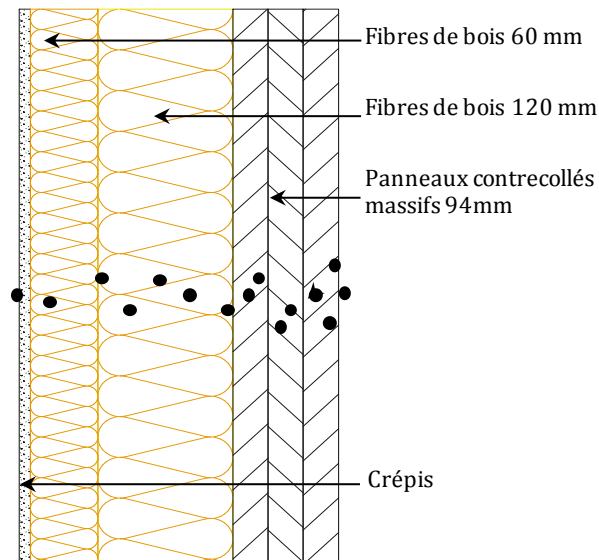


Figure 49: Coupe de la paroi du module KLH

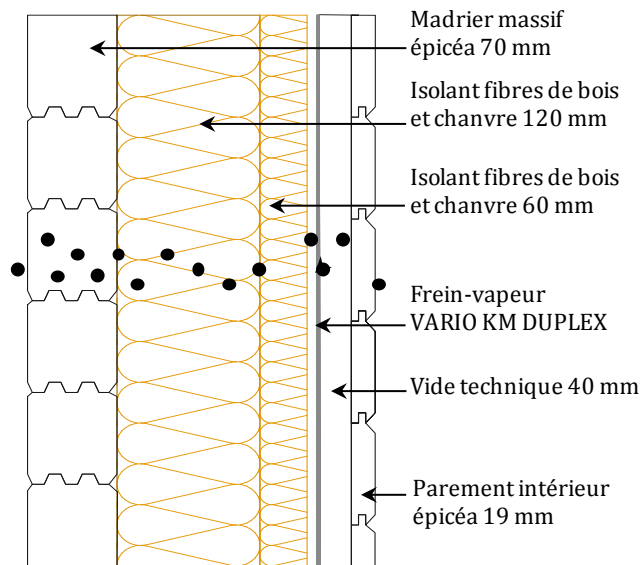


Figure 50 : Coupe de la paroi du module en madriers massifs

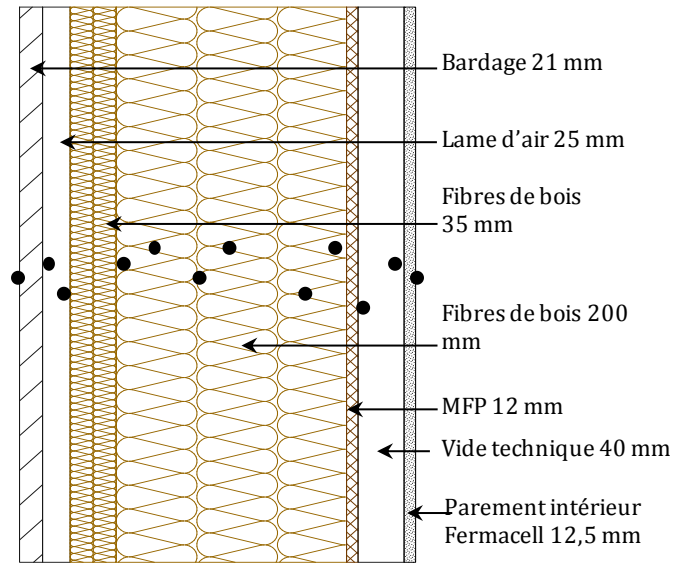


Figure 51 : Coupe de la paroi du module en ossature isolation fibres de bois

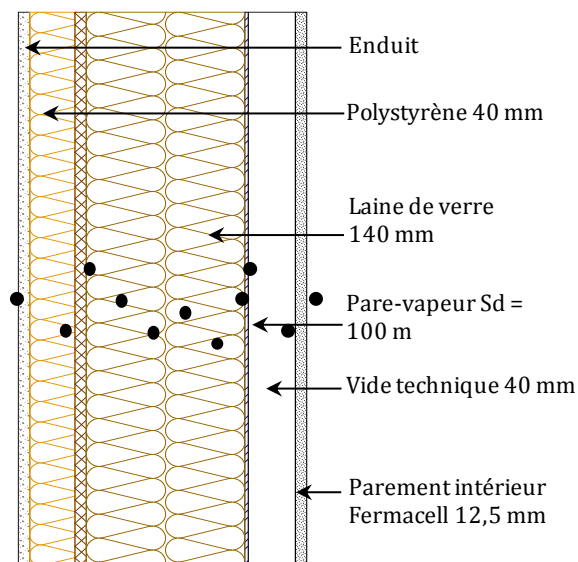


Figure 52 : Coupe de la paroi du module en ossature avec isolation en laine de verre

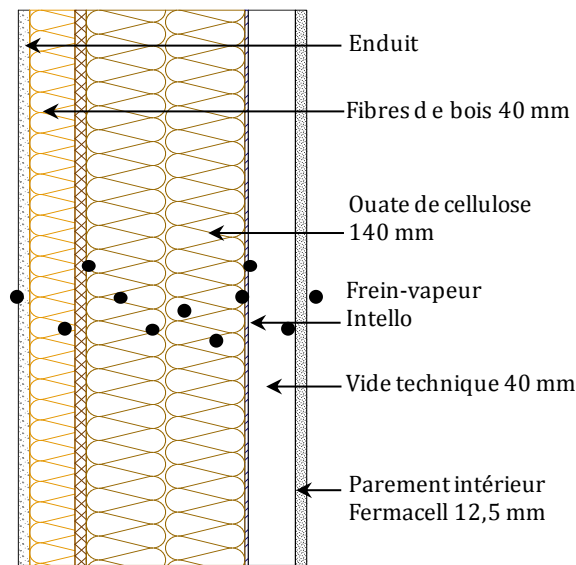


Figure 53 : Coupe de la paroi du module en ossature avec isolation en ouate de cellulose

III.1.3. Perméabilité à l'air des modules

Différents équipements permettent de mesurer la perméabilité à l'air d'un bâtiment, les plus couramment utilisés selon le débit de fuite du bâtiment sont : la technique de la porte soufflante (volume inférieur à 4000 m³/h), le perméascope (volume inférieur à 1000 m³/h) et banc grand volume (volume jusqu'à 30000 m³/h).

Les valeurs de perméabilité à l'air des modules ont été mesurées à l'aide du dispositif de la porte soufflante (fausse porte) dénommé Minneapolis Blower Door (Figure 54), selon la technique de mesure décrite dans la norme NF EN 13829. Cette méthode consiste à installer une porte étanche munie d'un ventilateur calibrée à la place de la porte du module. On impose une différence de pression entre l'intérieur du module et l'extérieur à l'aide du ventilateur. Des diaphragmes installés sur le ventilateur permettent de mesurer le débit d'air entre l'intérieur et l'extérieur. Les valeurs du débit d'air extrait sont mesurées pour différentes valeurs d'écart de pression. Les résultats permettent ensuite d'établir la relation entre le débit d'air Q_v et l'écart de pression ΔP entre l'intérieur et l'extérieur :

$$Q_v = C \Delta P^n \quad 1.28$$

Où C (m³.h⁻¹.Pa⁻ⁿ) est le coefficient de débit d'air et n l'exposant de l'écoulement.

La mesure permet de déduire les valeurs de perméabilité couramment utilisées pour caractériser l'étanchéité à l'air d'un bâtiment et comparer les bâtiments entre eux, à savoir le taux de renouvellement d'air lorsque la différence de pression est de 50 Pa (n_{50}) et le débit de fuite obtenu avec une différence de pression de 4 Pa (Q_4 en m³.m⁻².h⁻¹). Les valeurs de n_{50} pour les cinq modules sont données dans le Tableau 8. Une fois les mesures réalisées, les modules

ont été mis en surpression avec le même dispositif. Un générateur de fumée a ensuite été utilisé afin de détecter les sources de fuite d'air dans les modules. La visualisation des fuites a permis de détecter un débit d'air important passant par le dispositif de mesure Blower Door, et particulièrement au niveau du ventilateur. Comme le volume des modules est particulièrement petit, les fuites par la porte soufflante ne sont pas négligeables et induisent une surestimation des valeurs de renouvellement d'air des modules. Les valeurs données dans le tableau suivant sont juste indicatives car elles ne permettent pas de distinguer la part de fuite due à la porte soufflante. Par ailleurs, nous pensons qu'une partie des fuites d'air à travers les modules provient des portes. Etant donné que la porte soufflante est installée à l'emplacement de la porte, les fuites par la porte ne sont donc pas prises en compte dans le taux de renouvellement d'air mesuré, d'où la nécessité de recourir à un autre dispositif de mesure. Ce dispositif est actuellement en cours de conception. Il sera installé directement sur la porte du module pour mesurer toutes les fuites d'air. Sa conception permet de mesurer des débits de fuite très faibles.

Tableau 8. Valeurs de perméabilité à l'air des modules

| Modules | n_{50} (h ⁻¹) |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Panneaux contrecollés | 0,73 |
| Ossature fibre de bois | 1,4 |
| Madrier | 2,4 |
| Ossature ouate de cellulose | 0,89 |
| Ossature laine de verre | 1,1 |



Figure 54. Mesure de perméabilité à l'air sur un module

III.2. Equipement des modules

III.2.1. Contrôle du climat intérieur

Afin de reproduire les sollicitations internes liées à l'occupation des bâtiments, différents scénarios simples de production de chaleur et d'humidité doivent pouvoir être générés dans les modules. Ces scénarios ont été mis en œuvre à l'aide d'équipements de chauffage et d'humidification installés dans chaque module. Pour le chauffage, deux résistances électriques chauffantes d'une puissance totale de 500 Watts accompagnées d'un ventilateur pour le brassage de l'air sont installés. Un humidificateur à ultrason de faible consommation (50 Watts) permettant de générer de la vapeur d'eau froide avec un débit maximal de 400 g/h est utilisé pour reproduire les scénarios de charge d'humidité interne. L'humidificateur est placé sur une balance afin de mesurer le débit de vapeur généré. Tous ces équipements sont reliés et pilotés par le système central de pilotage des modules.

III.2.2. Instrumentation

Le Tableau 9 donne un récapitulatif des grandeurs mesurées ainsi que des capteurs et autres appareils de mesure utilisés pour le suivi du comportement hygrothermique des modules.

L'outil utilisé pour les mesures et les acquisitions des données sur les modules est le même que celui détaillé dans le paragraphe II.1.1.2 et développé pour les essais paroi. Un système de pilotage des éléments de chauffage et d'humidification des modules a été ajouté.

III.2.2.1. Suivi des conditions météorologiques

Un suivi des conditions climatiques extérieures du site sur lequel les modules sont implantés est réalisé. Pour cela, une station météorologique Davis Pro 2 6152FR est installée et permet la mesure des paramètres suivants :

- température et de l'humidité relative de l'air,
- pression atmosphérique,
- vitesse et de la direction du vent,
- rayonnement solaire global sur une surface horizontale
- taux de précipitations.

III.2.2.2. Suivi des profils de température et d'humidité dans les parois

Lors de la construction des modules, des capteurs de température et d'humidité ont été installés à différentes épaisseurs dans les couches de matériaux constituant les parois. Les capteurs ont été principalement installés à mi-largeur et à mi-hauteur de chaque paroi.

L'objectif est le suivi des profils de température et d'humidité dans les différentes couches de matériaux constituant les parois verticales. Pour une plus grande précision des bilans thermiques et hydriques réalisés sur les modules et afin d'identifier l'effet du rayonnement et du vent sur les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les parois, les quatre parois verticales orientées sud, nord, est et ouest de chaque module ont été instrumentées.

L'instrumentation des parois consiste essentiellement au suivi des grandeurs suivantes :

- Température et humidité des matériaux constituant les différentes couches des parois : le principe adopté pour la mesure de la température et de l'humidité du matériau consiste à insérer des capteurs de température et d'humidité relative de l'air dans l'épaisseur des matériaux. Le capteur mesure la température et l'humidité relative de l'air qui l'entoure. Le volume d'air autour du capteur est supposé en équilibre avec le matériau environnant, ceci permet de remonter à la teneur en eau du matériau environnant lorsqu'il est en équilibre avec l'air. Pour ce type de mesure, notre choix s'est porté sur les sondes capacitives SHT75 de Sensirion Company.
- Température de surfaces intérieure et extérieure : la mesure de la température de surface est toujours délicate car les capteurs modifient localement la température. Nous avons choisi d'utiliser des thermocouples de type T et de classe 1 dont le point de soudure est de petite taille et modifie donc très peu la température locale. Ces thermocouples ont été collés sur les surfaces des parois à l'aide d'un adhésif ayant les mêmes propriétés radiatives que la surface. Le choix de cette mesure de la

température de surface a été fait suivant les recommandations de la Norme NF EN ISO 8990.

- Pression différentielle : la mesure est réalisée avec un manomètre différentiel qui mesure la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de chaque module sur la face la plus exposée au vent (paroi Ouest).

III.2.2.3. Suivi de l'ambiance intérieure

Neuf capteurs SHT 75 de Sensirion sont installés dans le volume de la pièce pour le suivi de la température et de l'humidité relative de l'air. Ces capteurs sont installés :

- Dans le plan vertical : à 0,35 m, à 0,7 m (mi-hauteur) et à 1,05 m du plancher bas
- Dans le plan horizontal : à 0,75 m et à 1,5 m (centre de la pièce) de la surface intérieure des parois sud et ouest.

Un thermocouple installé dans une boule noire au centre et à mi-hauteur dans chaque module permet la mesure de la température résultante intérieure

III.2.2.4. Suivi de la consommation

Des compteurs d'énergie électrique relèvent les consommations des résistances électriques, des ventilateurs et de l'humidificateur. La connaissance de ces paramètres permet d'évaluer la production de chaleur dans chaque module.



Résistances électriques



SHT 75, capteur CO₂ et boule noire



Humidificateur à ultrason



Station météorologique

Figure 55. Equipements de mesures et de régulation dans les modules

Tableau 9 : Capteurs utilisés et grandeurs mesurées sur les modules

| Type de mesures | Grandeurs mesurées | Type de capteurs | Référence | Précision | Gamme de mesures |
|------------------------|--|----------------------------|----------------------------|--|---|
| Suivi conditions météo | T, HR, vent, rayonnement et précipitations | Station météo | Davis Pro 2 6152FR | - | - |
| Mesures Paroi | Température et Humidité relative | Thermo hygromètre | SHT 75 | $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\pm 1,8\%$ | $[-40 ; 123,8] \text{ }^\circ\text{C}$ $[0 ; 100]\%$ |
| | Température de surface | Thermocouple type T | B11- Tx-IEC 584.3-Classe 1 | $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ | $[-50 ; 250] \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | Pression différentielle | Manomètre différentiel | CP101-A0 | $\pm (3 \text{ Pa} + 1,5\%)$ | $[-500; +1000] \text{ Pa}$ |
| Mesures Confort | Température et Humidité relative | Thermo hygromètre | SHT 75 | $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\pm 1,8\%$ | $[-40 ; 123,8] \text{ }^\circ\text{C}$ $[0 ; 100]\%$ |
| | Température résultante | Thermocouple + Boule noire | B11- Tx-IEC 584.3-Classe 1 | $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ | $[-50 ; 250] \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | Taux de CO ₂ | Capteur CO ₂ | EE80-2CT3D04T31 | $\pm (50 \text{ ppm} + 2\%)$ | $[0 ; 2000] \text{ ppm}$ |
| Suivi consommation | Consommation en eau | Balance électronique | DENVER SI-6002 | $\pm 0,01 \text{ g}$ | $[0 ; 6] \text{ Kg}$ |
| | Consommation | Sous compteur électrique | FIN7E2382300 000 | - | - |

III.3. Descriptif des essais réalisés

Les modules ne sont opérationnels que depuis quelques mois. Nous présentons les résultats des premiers essais réalisés.

Dans un premier temps, les mêmes consignes que celles utilisées pour la caractérisation thermique et hydrique des parois des constructeurs (paragraphe II.3.3.2) ont été reproduites dans les modules. Pour cela, une température de 20°C et une humidité relative de 40% ont été maintenues pendant la première phase des essais.

Par la suite, l'humidité relative de consigne a été fixée à 60% pendant 4 semaines tandis que la température est maintenue à 20 °C. Ces consignes, représentatives des conditions intérieures d'une pièce humide permettent de créer un flux d'humidité plus important à travers la paroi. Ces conditions intérieures humides couplées à des conditions hivernales (froides et sèches) vont induire un transfert d'humidité important de l'intérieur vers l'extérieur et constituer une situation critique pour l'enveloppe du bâtiment vis à vis de l'humidité et qui peut conduire à des phénomènes tels que la condensation ou la formation de moisissures. D'une part, Les couches des parois proches de l'ambiance intérieure risquent d'être exposées à une humidité élevée couplée à une température proche de 20 °C, ce qui constitue des conditions favorables au développement des moisissures. D'autre part, les couches extérieures se retrouveront à une température très faible avec un taux d'humidité élevé et seront alors exposées aux phénomènes de condensation/gel/dégel.

III.4. Résultats et discussion

III.4.1. Performance énergétique des parois bois – Evaluation du comportement thermique des modules

Pendant toute la durée des essais, une température constante de 20°C a été maintenue à l'intérieur de chaque module. Pendant les périodes de chauffe, la consommation des résistances électriques a été enregistrée afin de pouvoir faire un bilan du comportement énergétique de chaque système constructif.

III.4.1.1. Répartition des déperditions thermiques de l'enveloppe

Rappelons que l'objectif principal de cette partie du travail est le suivi du comportement des parois verticales uniquement : pour cela, les modes d'assemblage et les compositions des modules ont été choisis afin de limiter les déperditions thermiques transitant à travers les autres composantes de l'enveloppe. Aussi, afin de vérifier la part des déperditions thermiques dans chaque module, une étude a été réalisée avec le logiciel de simulation thermique dynamique Pléiades-Comfie (Izuba-Energie) afin de quantifier les flux de chaleur passant par le plancher, le plafond et la porte ainsi que les flux engendrés par les ponts thermiques linéiques existant entre les différentes parois.

Hypothèses de calcul

Pour les besoins de la modélisation des modules avec Pléiades-Comfie, les ponts thermiques linéiques de jonction entre les différentes parties de chaque enveloppe, notamment les liaisons mur/mur et mur/planchers bas et haut ont été calculés avec le logiciel Therm (Therm) selon la norme EN 10211. Les valeurs calculées pour les ponts thermiques sont résumées dans le Tableau 10.

Tableau 10. Coefficients de transmission thermique linéiques calculés pour les liaisons entre les éléments de parois des modules

| Type de liaison | Coefficients de transmission linéique ψ (W/m.K) | | | | |
|------------------|--|------------------------|----------|-----------------------------|-------------------------|
| | Panneaux contrecollés | Ossature fibre de bois | madriers | Ossature ouate de cellulose | Ossature laine de verre |
| Mur/mur | 0,039 | 0,056 | 0,042 | 0,055 | 0,056 |
| Mur/toiture | 0,038 | 0,056 | 0,039 | 0,049 | 0,046 |
| Mur/plancher bas | 0,168 | 0,179 | 0,173 | 0,181 | 0,181 |

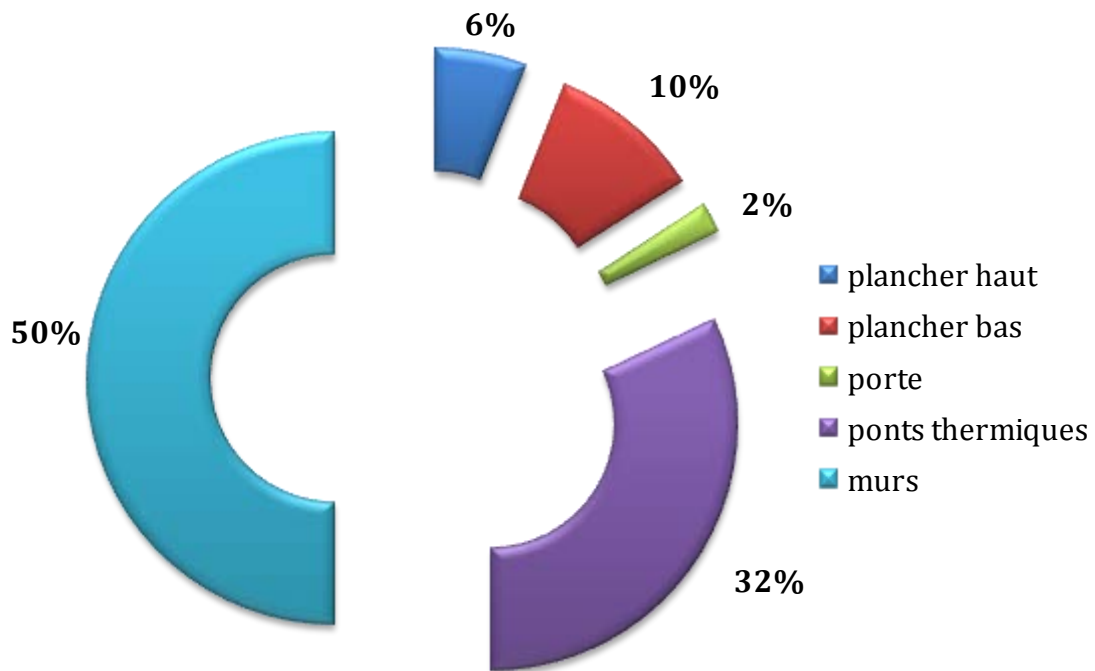
Les apports d'énergie internes dus au fonctionnement des différents éléments de mesure et d'acquisition dans les modules ont également été estimés. Pour cela, la puissance totale appelée sur l'alimentation générale de chaque module a été mesurée à l'aide d'une pince ampèremétrique. En faisant l'hypothèse que toute l'énergie électrique consommée est restituée en énergie thermique, la puissance dissipée à l'intérieur des modules par les différents appareils et capteurs qui y sont installés a été estimée. Le Tableau 11 donne les valeurs de puissance dissipée mesurées pour tous les modules.

Tableau 11. Puissances dissipées dans les cinq modules

| Puissance dissipée (Watts) | | | | |
|-----------------------------------|------------------------|----------|-----------------------------|-------------------------|
| Panneaux contrecollés | Ossature fibre de bois | madriers | Ossature ouate de cellulose | Ossature laine de verre |
| 14,9 | 15,2 | 14,6 | 14,4 | 14,4 |

Calcul des déperditions

Afin d'estimer la part des déperditions passant par chaque partie de l'enveloppe, une estimation des besoins énergétiques pour le chauffage de chaque module a été réalisée pendant 2 mois de la période hivernale 2011/2012. Un calcul des besoins énergétiques totaux (E_{total}) des modules a tout d'abord été effectué. Différentes simulations ont ensuite été réalisées pour déterminer la part des déperditions passant par chaque partie de l'enveloppe (plancher, plafond et portes). Pour calculer les déperditions passant par le plancher, les nouveaux besoins énergétiques ($E_{sansplancher}$) de chaque module ont été calculés en supposant que le plancher est adiabatique. La différence entre les besoins énergétiques totaux (E_{total}) et les déperditions énergétiques sans le plancher ($E_{sansplancher}$) permet d'obtenir la part des déperditions passant par le plancher. La même démarche a été effectuée pour calculer les déperditions thermiques par le plafond, les portes et les ponts thermiques de chaque module. La répartition des flux passant par le plancher, le plafond et les portes ainsi que les flux engendrés par les ponts thermiques linéiques ainsi obtenue est donnée dans la Figure 56. Nous pouvons constater que dans notre configuration 50% des déperditions passent par les parois et que plus de 30% sont dues aux déperditions par les liaisons. Etant donné que les parois des modules sont très performantes thermiquement, la part de déperdition par les ponts thermiques est devenue importante. Ceci montre bien qu'il convient de traiter avec précaution les ponts thermiques dans les constructions à isolation performante pour limiter au maximum les déperditions par les liaisons.



III.4.1.2. Comparaison des besoins de chauffage avec Pléiades-Comfie

Pendant deux mois de chauffe (Décembre et Janvier) où les modules ont été dans les mêmes conditions d'utilisation, un comparatif des besoins de chauffage mesurés et calculés avec le logiciel de simulation thermique dynamique Pléiades-Comfie a été réalisé.

Les besoins énergétiques pour maintenir une consigne de température intérieure de 20°C dans les modules ont été calculés avec le logiciel Pléiades-Comfie. Pour les besoins du calcul, toutes les données réelles de construction, climatiques et d'ambiance intérieure ont été utilisées.

La Figure 57 illustre les besoins calculés et mesurés pour le chauffage des cinq modules pendant la période considérée. Pour les cinq modules, l'estimation des besoins en chauffage par le calcul est supérieure aux résultats réels mesurés. Dans le cas des modules instrumentés, les écarts ne sont pas négligeables car le logiciel surestime d'au moins 14 % les besoins réels tel qu'il est détaillé dans le Tableau 12. Raji (2006) a observé une surestimation des prévisions du logiciel de calcul réglementaire lors d'un comparatif des consommations en chauffage de 20 maisons en bois massif. Les maisons étudiées étant habitées et les données d'entrée du logiciel réglementaire n'étant pas représentatives des données d'utilisation réelle des maisons, il était plus difficile d'imputer les écarts observés au comportement de l'enveloppe. Ces incertitudes sur les occupants n'existent pas dans notre étude. D'autre part, les données d'entrée utilisées sont les données réelles des modules. Mis à part des hypothèses de calcul intégrées au logiciel, les écarts observés entre les besoins en chauffage mesurés et calculés peuvent donc être liés à une sous-estimation de la performance énergétique des

enveloppes par le logiciel de calcul. Ce logiciel étant un logiciel thermique, les flux de chaleur liés au transfert d'humidité dans l'enveloppe ne sont donc pas pris en compte dans le calcul. En effet, le comportement en humidité est susceptible de modifier la conductivité thermique du matériau et donc la quantité de chaleur traversant la paroi. Par ailleurs, une migration d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment engendre également un flux de chaleur latente dans la paroi. Ces phénomènes non pris en compte dans les logiciels de simulation thermique du bâtiment pourraient être à l'origine de la surestimation des besoins réels en chauffage des constructions en bois. La confrontation des mesures avec le code numérique de simulation des transferts couplés de chaleur et d'humidité à l'échelle du bâtiment permettra de conforter ou non ces hypothèses.

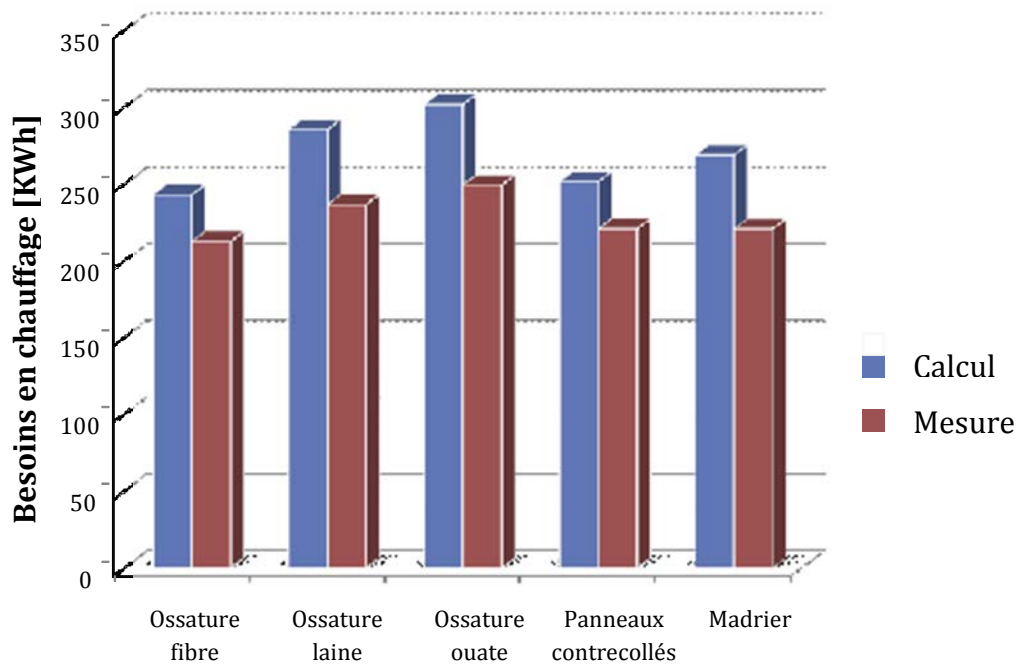


Figure 57. Besoins en chauffage mesurés et calculés pour les modules

Tableau 12. Ecart entre besoins en chauffage calculés et mesurés pour les modules

| Ecart calcul/mesure (%) | | | | |
|-------------------------|------------------------|----------|-----------------------------|-------------------------|
| Panneaux contrecollés | Ossature fibre de bois | madriers | Ossature ouate de cellulose | Ossature laine de verre |
| 14,0 | 14,3 | 21,7 | 21,1 | 20,7 |

III.4.1.3. Comparatif des consommations énergétiques des modules

Les résistances thermiques en régime permanent des parois installées sur les modules (excepté l'ossature avec isolation en laine de verre) ont été déterminées selon la norme ISO 8990, et rapportées dans le chapitre II. Notons que pour le module en madrier, la paroi dont la résistance thermique a été mesurée contient 160 mm d'isolant tandis que celle installée sur le

module possède une isolation de 180 mm d'épaisseur. En faisant la correction pour cette paroi, les résistances thermiques des quatre parois installées sur les modules sont donc :

$R_{\text{Panneaux contrecollés}} : 5,85 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$

$R_{\text{Ossature fibre de bois}} : 5,56 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$

$R_{\text{Madriers}} : 5,54 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$

$R_{\text{Ossature ouate de cellulose}} : 5,61 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$

La Figure 58 donne l'évolution du flux moyen quotidien calculé à partir des valeurs de consommation énergétique enregistrées toutes les 15 minutes pour les cinq modules. Les résultats de la Figure 58 montrent un flux de chaleur plus important pour le module en ouate de cellulose comparé aux autres modules, malgré le fait que la valeur de la résistance thermique mesurée pour les parois verticales de ce module soit proche de celle des autres.

Comme montré dans le paragraphe précédent, les flux thermiques par les liaisons entre les parois sont différents pour les modules. Ces flux ont également une forte influence sur le flux total passant par l'enveloppe.

Si l'on ne prend pas en compte la chaleur latente liée au transfert d'humidité dans les parois, le bilan énergétique d'un bâtiment et donc ses besoins en chauffage dépendent principalement des facteurs suivants :

- Coefficient de transmission thermique de l'enveloppe (dépend des ponts thermiques et de la résistance thermique des parois)
- Flux par renouvellement d'air
- Apports internes
- Inertie du bâtiment

Les résultats de la Figure 58 permettent d'établir le classement suivant selon la performance énergétique des modules :

1° Ossature avec isolation en fibre de bois

2° Panneaux contrecollés

3° Madriers

4° Ossature avec isolation en laine de verre

5° Ossature avec isolation en ouate de cellulose.

En faisant un classement des valeurs de résistances thermiques mesurées en régime permanent des parois des modules, le résultat obtenu n'est pas cohérent avec la tendance du flux de chaleur traversant les modules. Il en est de même concernant les ponts thermiques. En effet, les ponts thermiques estimés pour le module ossature avec isolation en fibres de bois sont plus élevés comparés à ceux des modules en panneaux contrecollés et en madriers. Par contre, en considérant les résultats des besoins en chauffage calculés par le logiciel Pléiades-Comfie illustrés sur la Figure 57, nous retrouvons le même classement pour les cinq modules. Etant donné que la modélisation sous Pléiades-Comfie ne tient pas compte du taux de

renouvellement d'air des modules et que les apports internes mesurés sont quasi-égaux, nous pouvons conclure que la tendance observée sur le classement des modules dépend du comportement dynamique des parois des modules.

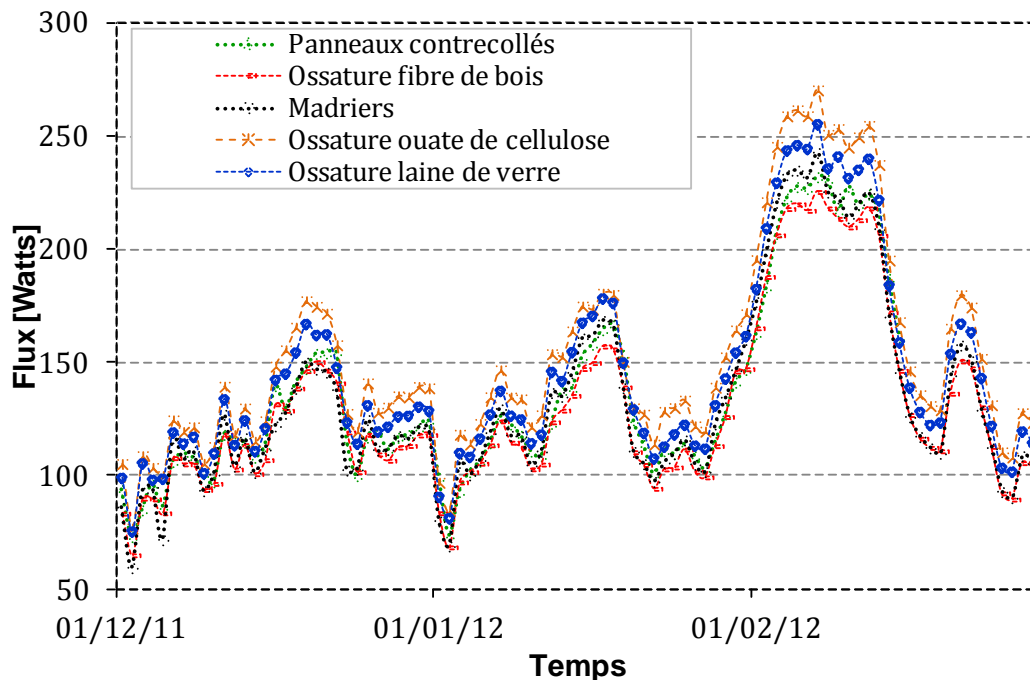


Figure 58. Flux de chaleur moyen journalier des modules pendant la période de chauffe

III.4.2. Contribution de la paroi au confort intérieur

Selon les différentes études rapportées dans le paragraphe I.2.2.2, différents paramètres peuvent être pris en compte pour caractériser le niveau de confort de l'environnement intérieur. Néanmoins, le confort thermique est le paramètre considéré comme le plus sensible pour l'occupant. Cette notion de confort thermique est en étroite relation avec l'enveloppe du bâtiment car elle dépend notamment de la température d'air, de la température moyenne rayonnante, des mouvements d'air et de l'humidité intérieure de l'habitat, qui sont des facteurs dépendant des propriétés et du comportement de l'enveloppe.

Dans cette partie, nous étudierons les transferts couplés chaleur-masse dans l'enveloppe et l'influence de ceux-ci sur l'environnement intérieur, principalement sur l'évolution de la température et de l'humidité intérieures.

III.4.2.1. Confort thermique intérieur

Dans le bâtiment, la sensation de confort thermique dépend particulièrement des propriétés de la surface intérieure des parois. En effet, la température ressentie par l'occupant est fortement liée à la température de surface du parement intérieur et à celle de l'air. Dans le cas des bâtiments performants, l'absence de parois froides fait que l'inconfort thermique se limite essentiellement au problème de surchauffe. Les températures élevées et les fortes amplitudes thermiques extérieures sont susceptibles de perturber le niveau et la stabilité de la

température intérieure. Dans les modules, l'évaluation du confort thermique concerne surtout cette problématique de surchauffe et de stabilité de la température intérieure. Le comportement des parois des cinq modules au printemps et en été a donc été analysé afin d'identifier l'influence de l'enveloppe sur la température intérieure de chaque module.

Le comportement thermique dynamique d'une enveloppe d'un bâtiment en réponse aux variations de température extérieure est caractérisé entre autres par le déphasage thermique et l'amortissement. Ces paramètres dépendent de plusieurs facteurs tels que les propriétés et la position des matériaux, l'orientation et le facteur d'absorptivité de la surface extérieure de la paroi (Asan (1998), Kontoleon et Eumorfopoulou (2008), Ulgen (2002)).

La Figure 59 donne l'évolution de la température aux interfaces des matériaux dans les quatre parois (nord, sud, est et ouest) du module en panneaux contrecollés, pendant trois jours d'été avec une amplitude thermique forte et des températures élevées à l'extérieur.

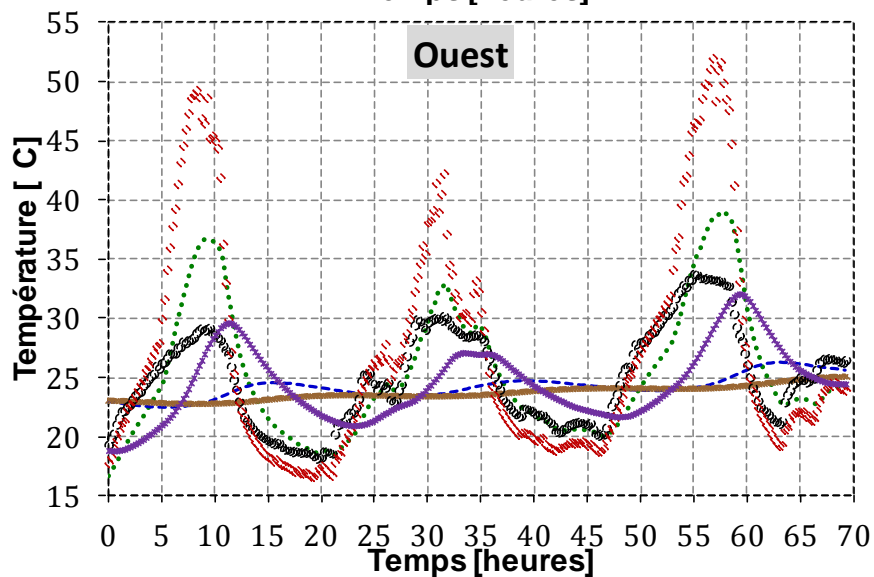
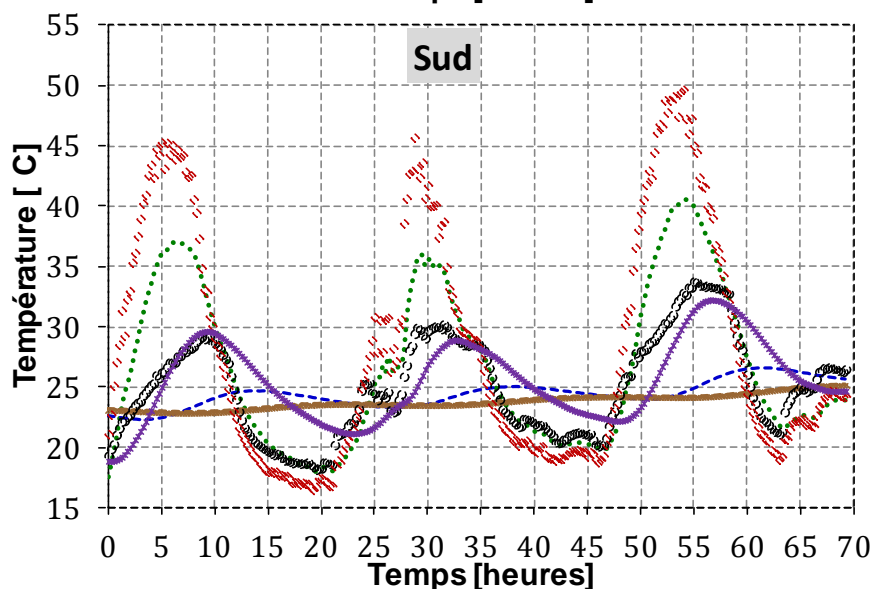
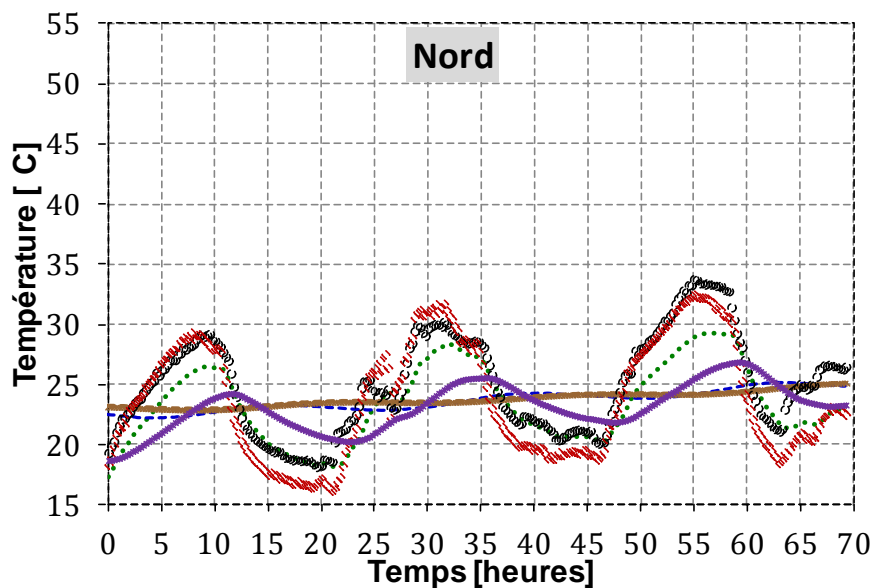
Les évolutions des profils de températures sur les quatre orientations montrent une différence de la dynamique des transferts de chaleur dans les différentes parois. En effet, l'intensité et la vitesse de propagation de l'onde de chaleur à travers chaque paroi de l'extérieur vers l'intérieur est différente d'une orientation à une autre. Cette différence proviendrait de l'effet du rayonnement solaire : l'intensité de l'énergie solaire arrivant sur la surface de la paroi ainsi que le changement périodique de cette intensité affectent la vitesse de propagation de l'onde de chaleur à travers la paroi. Le même comportement a déjà été observé par Ulgen (2002) et Kontoleon et Eumorfopoulou (2008). L'évolution de la température à l'interface des deux isolants pour les quatre parois du même module, illustrée sur la Figure 60, montre les instants où l'onde de chaleur extérieure arrive à l'interface des deux isolants sur les parois Nord, Sud, Ouest et Est du module en panneaux contrecollés. La paroi Est est celle qui « voit » le rayonnement solaire le plus tôt ce qui explique que le pic de température sur cette paroi arrive plus rapidement à l'interface des isolants par rapport aux autres orientations. C'est donc la première paroi qui va imposer la variation de température intérieure. D'autre part, selon la quantité d'énergie solaire absorbée par chaque paroi, l'amplitude de température est également différente pour les quatre parois. La paroi Sud étant celle qui présente l'amplitude la plus élevée.

Sur la paroi Est, nous pouvons distinguer deux pics de température : le premier correspondant à l'augmentation de la température de surface dû au rayonnement solaire incident et le second à l'augmentation de la température de l'air. Ces deux pics se retrouvent dans les premières couches de la paroi. L'absorption d'une partie de l'énergie solaire par la surface de la paroi peut se distinguer par le premier pic de température observé derrière l'enduit.

Les différents matériaux composant chaque paroi apportent un amortissement important des ondes de chaleur conduisant à une amplitude de variation quotidienne de la température intérieure de 1°C. Le déphasage moyen observé sur le module en panneaux contrecollés est de 14 heures environ. Dans la pratique, si l'on ne considère que l'effet des parois opaques, la forte chaleur extérieure de l'après-midi ne se répercutera à l'intérieur du bâtiment que très tôt le lendemain, au moment où l'extérieur redescend en température, garantissant une

température acceptable pour les occupants. L'utilisation d'une telle enveloppe permettrait donc de faire une économie sur les dépenses énergétiques liées à la climatisation du bâtiment.

La connaissance du déphasage thermique des parois constitue un des différents facteurs affectant le comportement thermique d'un bâtiment. D'autres paramètres tels que l'étanchéité à l'air du bâtiment, les vitrages et leur facteur solaire, l'utilisation ou non de ventilation contrôlée, etc. sont à prendre en compte pour bien optimiser le déphasage thermique de l'enveloppe.



- Température extérieure
- ◇ Surface extérieure
- à 10 mm derrière l'enduit
- ★ Interface isolant 60 mm/Isolant 120 mm
- - - Interface Isolant 120 mm/Bois massif
- Surface intérieure

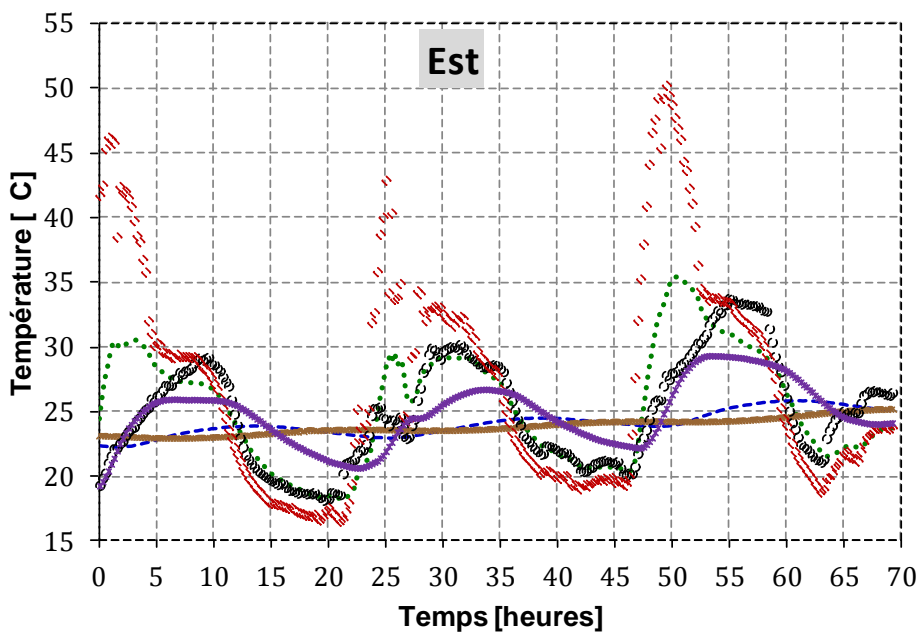


Figure 59. Profils de température dans les parois Nord, Sud, Ouest et Est du module en panneaux contrecollés

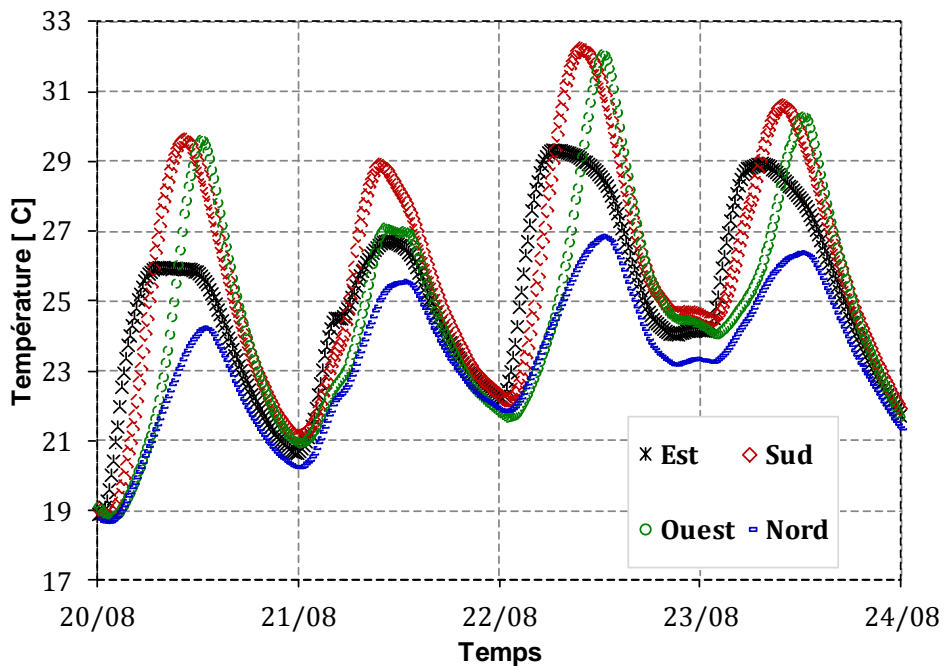


Figure 60. Température à l'interface des deux isolants dans les parois Nord, Sud, Ouest et Est du module en panneaux contrecollés

Le Tableau 13 résume les déphasages thermiques apportés par chaque paroi nord des cinq modules étudiés. La paroi en panneaux contrecollés présente le déphasage le plus important. Les propriétés des matériaux qui la composent (faible conductivité thermique et masse volumique élevée) assurent une faible diffusivité thermique pour la paroi et donc une faible vitesse de transmission de la chaleur. A l'inverse, l'épaisseur et la faible masse volumique de l'isolant entraîne un déphasage moins important pour la paroi en ossature avec isolation en laine de verre.

Nous avons décidé de présenter le déphasage pour les parois nord car l'influence du rayonnement solaire y est le plus faible, les valeurs sont donc plus proches de celles mesurées sur le dispositif expérimental en laboratoire. En faisant un comparatif des valeurs mesurées en laboratoire (II.4.2.2) et celles mesurées sur les modules, nous pouvons observer des écarts plus ou moins faibles selon le matériau. Les écarts les plus importants concernent les isolants en fibre de bois rigide et le bois massif en madrier. En moyenne, un écart de $\pm 30\%$ est observé entre la mesure en laboratoire et la mesure sur site pour ces matériaux.

Tableau 13. Déphasages thermiques apportés par les parois nord des modules

| Paroi | Matériau | Epaisseur (mm) | Déphasage (h) |
|--------------------------------|---|----------------|---------------|
| Panneaux contrecollés | Crépis 1 | 10 | 3,9 |
| | Isolant fibres de bois 265 kg/m ³ | 60 | |
| | Isolant fibres de bois 160 kg/m ³ | 120 | 4,9 |
| | Bois massif | 94 | 5 |
| | Total | | 13,8 |
| Ossature fibres de bois | Bardage | 21 | |
| | Air ventilé | 25 | 1 |
| | Fibres de bois 270 kg/m ³ | 35 | 1,3 |
| | Fibres de bois 50 kg/m ³ | 200 | 4,7 |
| | Panneau multifonction 700 kg/m ³ | 12 | 3,1 |
| | Total | | 10,1 |
| Madriers | Bois massif | 70 | 2,7 |
| | Isolant fibres de bois/chanvre 45 kg/m ³ | 180 | 4,1 |
| | Air immobile | 40 | 2,2 |
| | Bois massif | 19 | |
| | Total | | 9 |
| Ossature ouate de cellulose | Crépis 2 | 5 | 1,8 |
| | Fibre de bois 210 kg/m ³ | 40 | |
| | OSB | 9 | 1,3 |
| | Ouate de cellulose 65 kg/m ³ | 140 | 3,7 |
| | Air immobile | 40 | 0,7 |
| | Fermacell | 12,5 | 0,7 |
| | Total | | 8,1 |
| Ossature laine de verre | Crépis 3 | 5 | 1,6 |
| | Polystyrène | 40 | |
| | OSB | 9 | 0,9 |
| | Laine de verre | 140 | 2,7 |
| | Air immobile | 40 | 0,8 |
| | Fermacell | 12,5 | 1,2 |
| | Total | | 7,2 |

III.4.2.2. Confort hydrique intérieur

L'influence de l'humidité de l'air intérieur est un facteur important dans la perception du confort intérieur. De nombreuses études ont montré l'impact de l'hygroscopicité des parements intérieurs sur la régulation de l'humidité ambiante (Hameury 2005, Kunzel et al 2004, Osanyintola *et al* 2006, Osanyintola & Simonson 2006, Simonson *et al* 2004, James *et al* 2010). Cependant, peu d'études se sont intéressées à l'influence du couplage parement intérieur/composition de la paroi sur l'évolution de l'humidité intérieure de l'habitat. Afin d'identifier l'impact des parements intérieurs et des compositions des enveloppes des systèmes constructifs étudiés sur le taux et la variation de l'humidité intérieure des modules, des tests ont été menés sur les cinq modules exposés aux mêmes conditions climatiques. Les modules ne sont pas équipés de ventilation. Notons que parmi les cinq modules testés, trois possèdent un parement intérieur en Fermacell, qui est une plaque de plâtre et de fibres de cellulose. Les deux autres modules ont des parements intérieurs en bois massif d'épaisseurs différentes (19 et 94 mm).

Importance du parement intérieur et de l'enveloppe

Le premier test a été réalisé à une température de consigne de 20 °C dans les modules. Ces derniers ont été préalablement maintenus à une température de 20°C et une humidité relative de 55%. Un échelon d'humidité a été réalisé en produisant 150 g de vapeur d'eau à l'intérieur de chaque module sur une période de 50 minutes. Ensuite, tous les modules ont été laissés en évolution libre. La production d'humidité réalisée correspond au pic de charge en humidité de 8 g/m³.h d'une maison le matin de 6h à 8h (Kunzel, 2004).

La Figure 61 et la Figure 62 donnent respectivement les évolutions d'humidité relative intérieure et d'humidité absolue intérieure de chaque module pendant le test. L'humidité intérieure initiale du module en madrier est sensiblement inférieure à celle des autres modules, ce qui explique le pic plus faible lors de l'humidification.

Nous pouvons remarquer une différence de comportement en humidité intérieure des cinq modules pendant la phase d'évolution libre. Pendant les premières heures suivant l'humidification, le flux passant dans les parois est élevé pour tous les modules. Cette phase correspond à l'adsorption d'humidité par le parement intérieur, que ce soit du Fermacell ou du bois massif. Nous observons par la suite un flux d'humidité plus ou moins important selon le module : le module ossature fibre de bois est celui dont le flux d'humidité est le plus important tandis que dans le module en panneaux contrecollés, la descente en humidité est la plus lente. En calculant la quantité d'humidité produite avant la phase d'humidification pour maintenir les consignes de 20 °C et 55%, nous obtenons les valeurs présentées dans le Tableau 14. Nous remarquons que la tendance des flux d'humidité mesurés à l'intérieur des modules (déduits de la Figure 62) après la phase d'humidification reprend la même évolution des flux observés avant l'humidification : le module ossature fibre de bois est le module qui voit son humidité intérieure diminuer le plus rapidement et c'est également le module dont le flux avant humidification était le plus élevé. De même, le module en panneaux contrecollés est celui dont l'humidité intérieure varie le moins après humidification, son flux d'humidité étant le plus faible avant humidification.

Tableau 14. Flux d'humidité avant et après humidification

| Modules | Flux avant humidification (g.h ⁻¹) |
|-----------------------------|--|
| Panneaux contrecollés | 0,14 |
| Ossature fibre de bois | 9,31 |
| Madrier | 0,23 |
| Ossature ouate de cellulose | 2,51 |
| Ossature laine de verre | 2,28 |

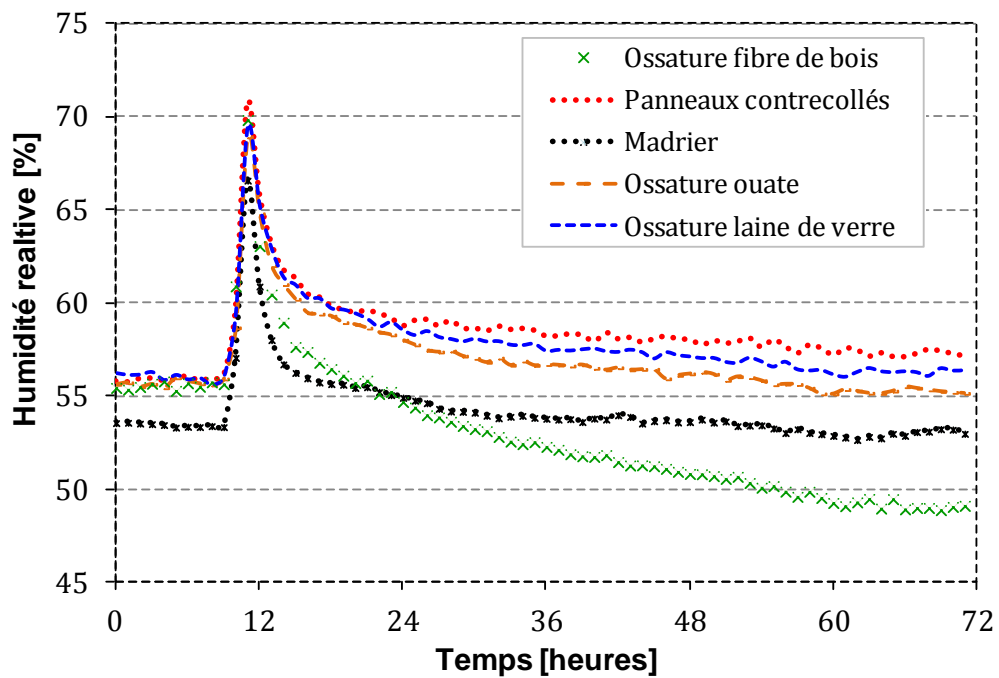


Figure 61. Evolution de l'humidité relative intérieure de chaque module pendant la production d'humidité

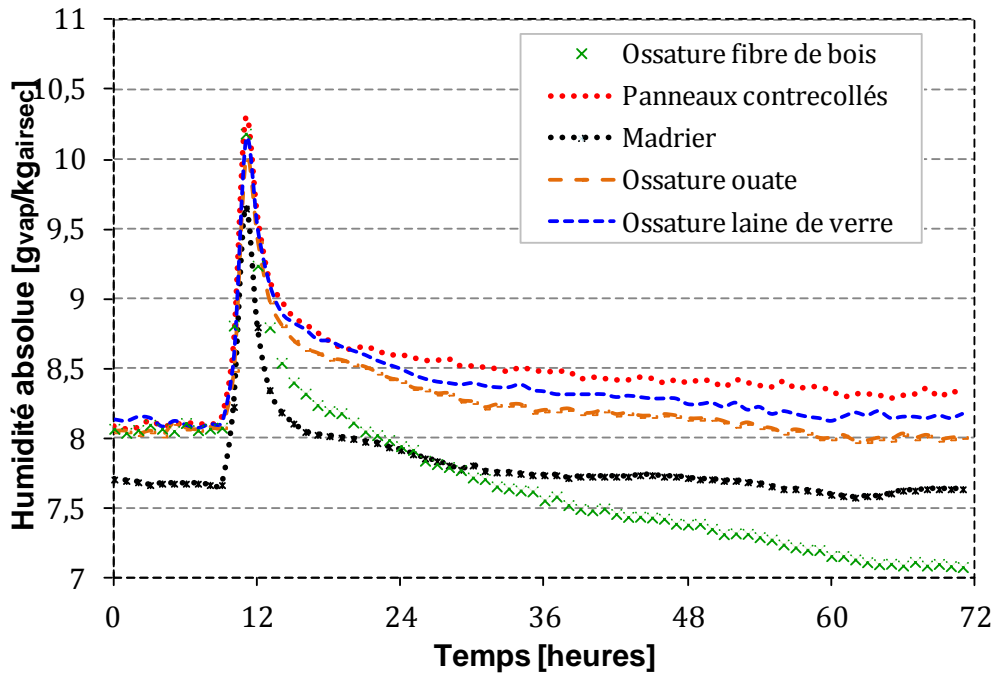


Figure 62. Evolution de l'humidité absolue intérieure de chaque module pendant la production d'humidité

Comparatif du flux d'humidité dans les modules

Afin de quantifier la part d'humidité qui passe dans les parois, une deuxième phase de production interne de vapeur a été réalisée à partir du 25 janvier 2012. Une température de 20 °C et une humidité relative de 60% ont été maintenues dans chaque module pendant 5 semaines. Le débit de vapeur d'eau restant dans l'ambiance après une production d'humidité est donné par la relation suivante :

$$\dot{m}_{stockage_{air}} = \frac{\rho_{air} V_{module} \Delta H A_{ambiance}}{\Delta t} \quad 1.29$$

Où :

ρ_{air} : masse volumique de l'air (kg/m³)

V_{module} : volume intérieur du module (m³)

$\Delta H A_{ambiance}$: augmentation de l'humidité intérieure (g_{vap}/kg_{airsec})

Comme l'humidité intérieure est maintenue constante pendant l'essai, cette fraction stockée dans l'air est donc nulle.

La quantité de vapeur produite varie pour maintenir l'humidité intérieure constante. Cette quantité correspond à l'humidité qui est évacuée par renouvellement d'air et à la quantité

d'humidité qui passe dans les parois du module. La quantité d'humidité échangée par renouvellement de l'air intérieur est donnée par la relation suivante :

$$\dot{m}_{ventilation} = \rho_{air} \cdot V_{module} \cdot \eta_{air} \cdot (HA_{ambiance} - HA_{extérieure}) \quad 1.30$$

Où :

- η_{air} : taux de renouvellement d'air du module
- $HA_{ambiance}$: humidité absolue moyenne de l'air intérieur
- $HA_{extérieure}$: humidité absolue moyenne de l'air extérieur

Comme expliqué dans le paragraphe III.1.3, la perméabilité à l'air des modules est surestimée compte tenu des fuites d'air non négligeables passant par le dispositif de la porte soufflante. Aussi, nous nous limiterons à un classement des modules suivant leur perméabilité à l'air pour interpréter les flux d'humidité.

La quantité d'humidité passant dans les parois est donc donnée par la relation :

$$\dot{m}_{paroi} = \dot{m}_{production} - \dot{m}_{stockage_{air}} - \dot{m}_{ventilation} \quad 1.31$$

La Figure 63 donne un comparatif des flux d'humidité moyens à travers les modules. Ces flux correspondent à la quantité d'humidité nécessaire pour maintenir l'humidité intérieure constante et représentent la somme des flux passant dans les parois et les flux par renouvellement d'air. Les planchers bas et haut et la porte étant recouverts d'une membrane étanche à la vapeur ($S_d=1500$ m), les flux passant par les parois correspondent aux flux à travers les parois verticales.

Les valeurs des résistances à la diffusion de vapeur calculées pour chaque paroi verticale des modules sont données ci-après :

- $R_{Panneaux\ contrecollés}$: $5,28 \cdot 10^{10}$ m².s.Pa.kg⁻¹
- $R_{Ossature\ fibre\ de\ bois}$: $1,11 \cdot 10^{10}$ m².s.Pa.kg⁻¹
- $R_{Madriers}$: $5,8 \cdot 10^{10}$ m².s.Pa.kg⁻¹
- $R_{Ossature\ ouate\ de\ cellulose}$: $3,26 \cdot 10^{10}$ m².s.Pa.kg⁻¹
- $R_{Ossature\ laine\ de\ verre}$: $7,94 \cdot 10^{11}$ m².s.Pa.kg⁻¹

Les résultats montrent que le module en madrier est celui dont le flux d'humidité est le plus important. Bien que les parois de ce module soient moins perméables à la vapeur comparées aux autres modules, son taux de renouvellement d'air est le plus élevé.

Pour le module en ossature fibre de bois, le flux important peut s'expliquer par sa perméabilité à la vapeur plus élevée par rapport à tous les autres modules.

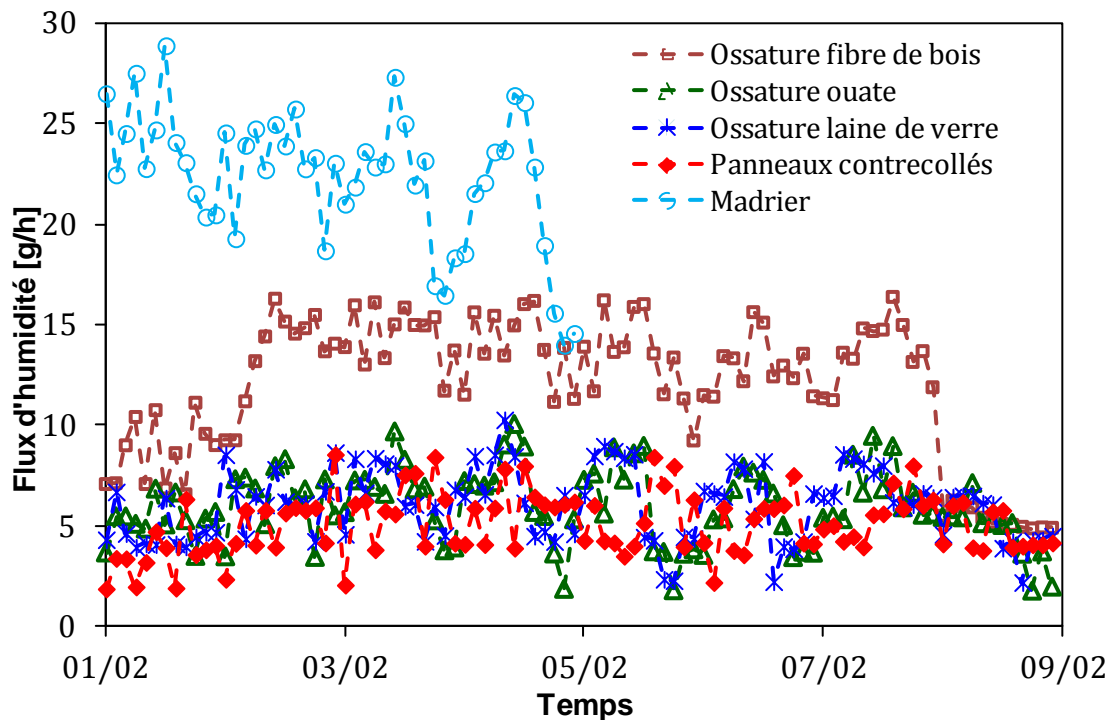


Figure 63. Flux d'humidité dans chaque module pour un renouvellement d'air naturel

III.4.3. Les transferts hygrothermiques dans la paroi

La problématique des transferts d'humidité a toujours été d'une importance non négligeable dans les travaux antérieurs consacrés à la performance hygrothermique des constructions. En effet, afin d'assurer la durabilité de la construction et le bien-être et la santé des occupants, il est important de limiter les transferts d'humidité à travers les enveloppes de construction afin d'éviter les problèmes qui peuvent en résulter tels que la condensation ou le développement de moisissures. L'une des méthodes adoptées pour cela est l'optimisation de l'agencement des matériaux composant l'enveloppe et l'utilisation de matériaux permettant de limiter la quantité d'humidité susceptible de pénétrer dans l'enveloppe ou de favoriser le séchage de l'excès d'humidité présent dans la construction.

Dans cette étude, l'objectif est non seulement de caractériser la performance de différents systèmes constructifs mais également d'identifier les matériaux ou propriétés de matériaux qui pourraient améliorer ces performances. Afin de caractériser et par la suite proposer des solutions pour optimiser la performance hygrothermique des enveloppes, nous étudierons dans cette partie l'influence de différents paramètres sur la performance thermique et hydrique des constructions bois. Pour cela, l'influence des propriétés des matériaux, et plus particulièrement de l'hygroscopicité, sera abordée.

Influence de la lame d'air extérieure

La lame d'air ventilée, derrière le bardage extérieur, est l'un des composants de la paroi ayant une influence significative sur la performance hygrothermique de l'enveloppe. La présence d'une lame d'air ventilée dans une paroi permet d'une part d'empêcher la diffusion de l'excès d'humidité extérieure vers l'intérieur de la paroi et d'autre part d'assécher la paroi.

Dans cette partie seront présentés les résultats des mesures réalisées sur le module en ossature avec isolation en fibres de bois qui est le seul à comporter une lame d'air ventilée.

La Figure 64 et la Figure 65 montrent l'évolution horaire de la différence de température mesurée entre la surface côté intérieur de la lame d'air ventilée (surface extérieure du panneau rigide en fibre de bois) et l'extérieur (pour les parois nord et sud respectivement), en fonction de la température extérieure. Les résultats donnent les valeurs individuelles mesurées ainsi que les valeurs moyennes calculées avec les valeurs mesurées à 1 °C d'intervalle de la température extérieure.

Pour la paroi nord, Les valeurs moyennes ne montrent aucune différence significative de la température entre la lame d'air et l'extérieur lorsque la température extérieure est inférieure à 15 °C. Pour une température extérieure supérieure à 15 °C, la température de la lame d'air ventilée est plus faible que celle de l'extérieur.

Pour la paroi sud, la température de la lame d'air ventilée est en moyenne supérieure à celle de l'extérieur pendant la période considérée, avec une différence d'au moins 1 °C. Les mesures montrent également des valeurs horaires de la différence de température dans cette paroi beaucoup plus élevées comparées à celles mesurées dans la paroi nord. Ceci est principalement dû à l'effet du rayonnement solaire: dans le cas des façades exposées au soleil, le bardage est plus chaud que l'air extérieur et réchauffe la lame d'air. Dans le cas d'une paroi nord, le bardage est plus froid que l'air extérieur et refroidit donc la lame d'air.

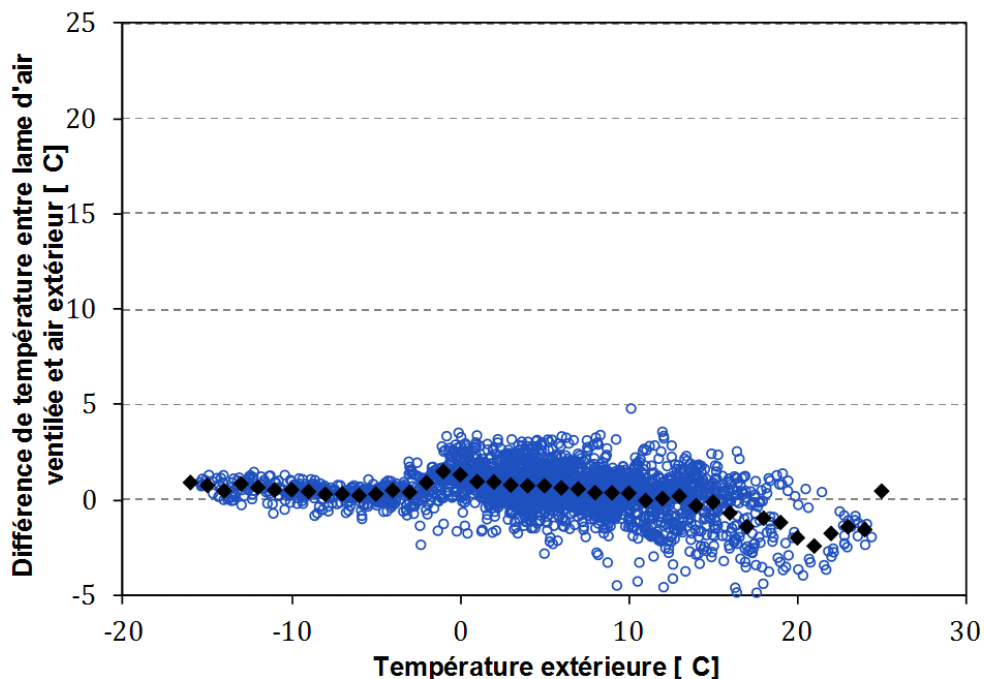


Figure 64. Différence de température entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée de la paroi **nord** et l'air extérieur, en fonction de la température extérieure

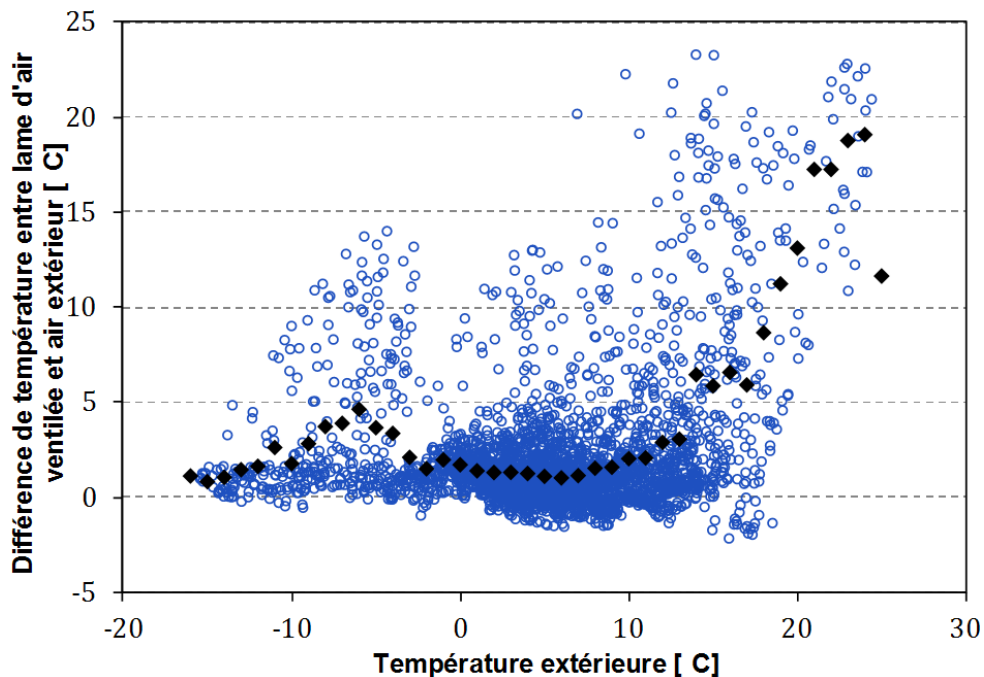


Figure 65. Différence de température entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée de la paroi **sud** et l'air extérieur, en fonction de la température extérieure

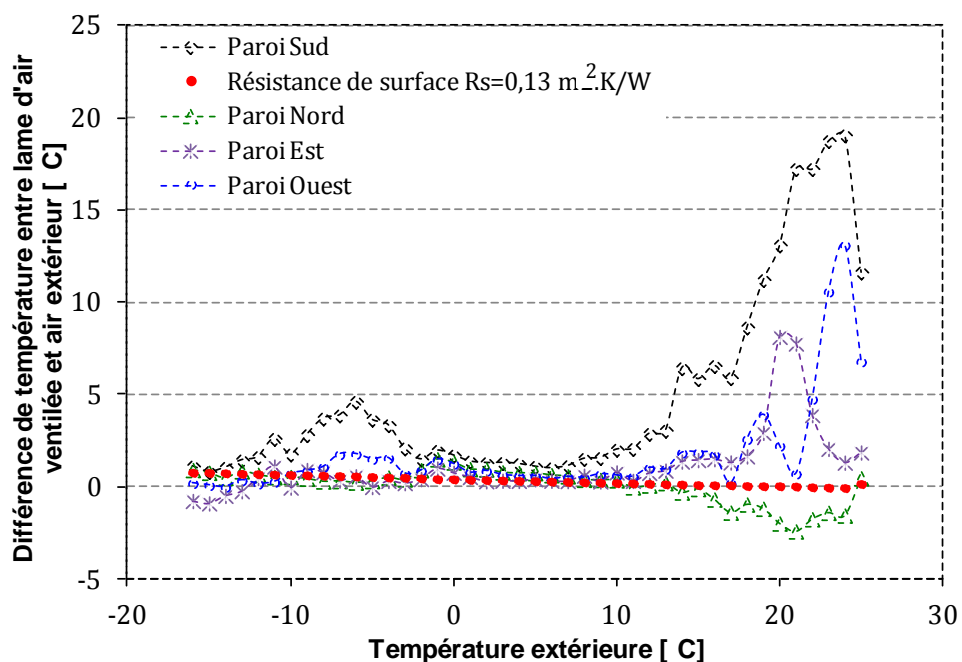


Figure 66. Différence moyenne de température entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée et l'air extérieur, en fonction de la température extérieure pour les quatre façades et le cas où $R_s = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

La Figure 66 illustre la différence de température entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée et l'air extérieur, pour les quatre façades. Ce paramètre est également calculé en considérant une résistance thermique équivalente de $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ pour l'ensemble bardage

+ air ventilé. Dans les outils de calcul du comportement thermique du bâtiment, la prise en compte des transferts dans la lame d'air ventilée et le parement extérieur est simplifiée en remplaçant les résistances apportées par l'air et le parement par une résistance équivalente égale à $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Les résultats montrent que cette hypothèse reste valide lorsqu'il n'y a pas de rayonnement solaire. Sur les façades exposées au soleil, la température à l'interface lame d'air/pare-pluie est plus élevée que la température calculée si l'on prenait une résistance équivalente de $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

La Figure 67 et la Figure 68 montrent l'évolution de la différence d'humidité absolue de l'air mesurée entre la surface côté intérieur de la lame d'air ventilée (surface extérieure du panneau rigide en fibre de bois) de la paroi (nord et sud respectivement) et l'extérieur.

Les résultats de la Figure 67 montrent peu de différence d'humidité absolue entre la lame d'air ventilée de la paroi nord et l'air extérieur. A température élevée, nous observons une tendance de l'air ventilée à s'humidifier par rapport à l'air extérieur. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette hausse d'humidité de la lame d'air : il est possible que la paroi sèche et cède une partie de son humidité à la lame d'air ventilée. D'autre part, le séchage du bardage pourrait également conduire à une humidification de la lame d'air ventilée.

Par ailleurs, d'après la Figure 68 l'humidité absolue moyenne mesurée dans la lame d'air ventilée de la paroi sud est en général plus faible comparée à celle de l'air extérieur lorsque la température est inférieure à $14 \text{ }^\circ\text{C}$. Cependant, à une température élevée, la lame d'air est plus humide que l'air extérieur. Le séchage du bardage suite à son réchauffement par le rayonnement solaire pourrait être à l'origine de cette hausse du taux d'humidité de la lame d'air ventilée de la paroi sud.

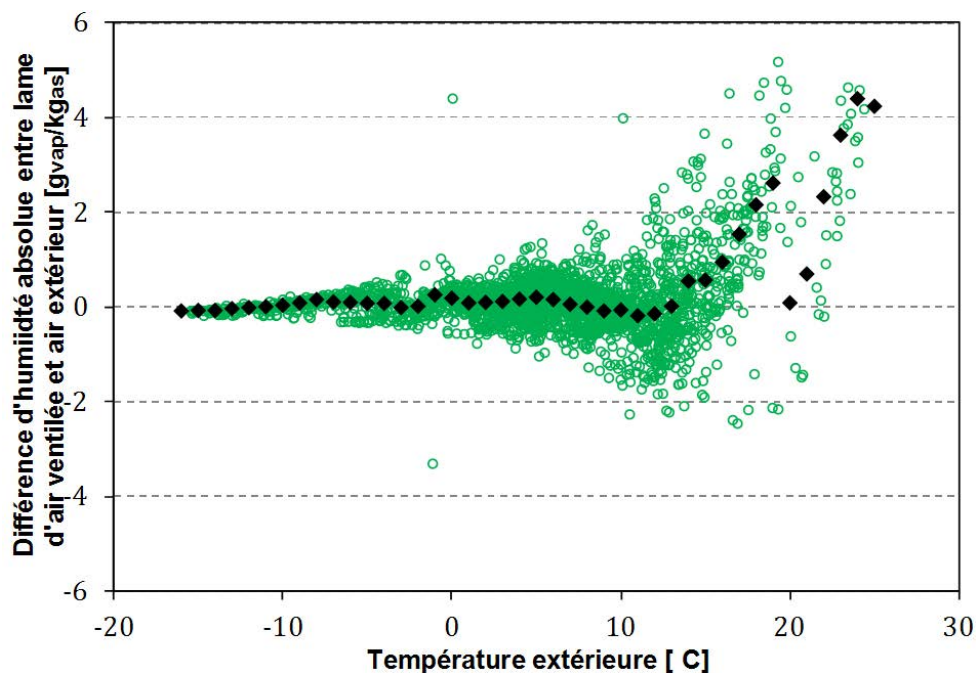


Figure 67. Différence d'humidité absolue entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée de la paroi **nord** et l'air extérieur, en fonction de la température extérieure

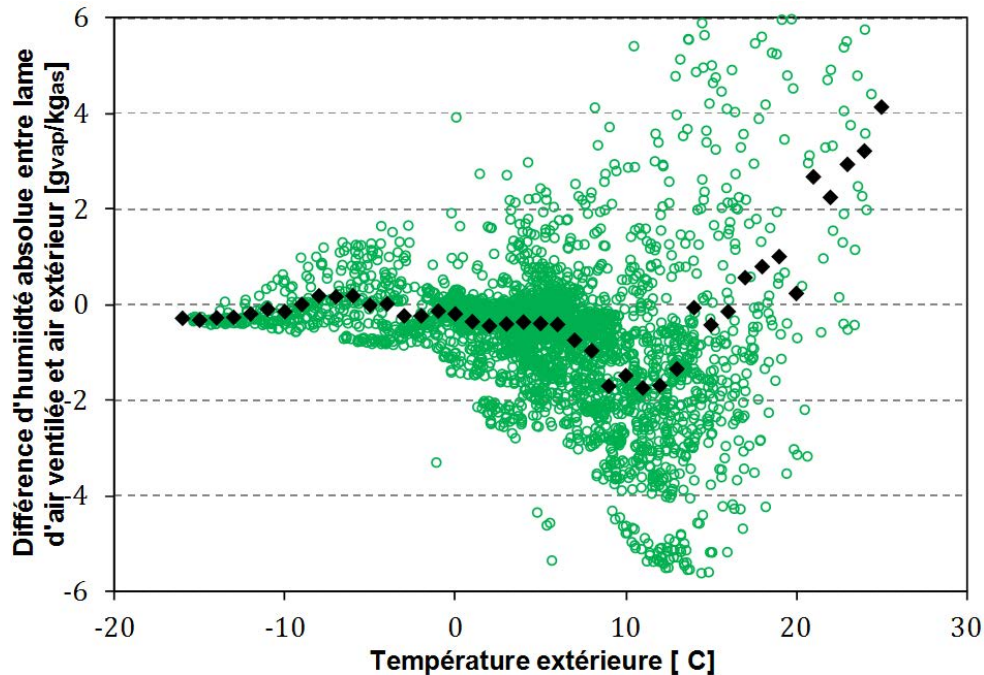


Figure 68. Différence d'humidité absolue entre la surface intérieure de la lame d'air ventilée de la paroi **sud** et l'air extérieur, en fonction de la température extérieure

Influence de l'hygroscopicité des matériaux

Afin d'identifier l'influence de l'hygroscopicité des matériaux sur la performance de l'enveloppe, un comparatif du comportement du module en ossature bois avec isolation en ouate de cellulose et de celui avec isolation en laine de verre que nous désigneront respectivement par module laine de verre et module ouate de cellulose est établi. Ces deux modules possèdent des parois verticales de résistances thermiques proches mais ont des résistances à la diffusion de vapeur différentes. La résistance à la diffusion de vapeur pour les parois du module en ossature avec isolation en laine de verre est de $7,94 \cdot 10^{11} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$. Pour l'ossature avec isolation en ouate de cellulose, la valeur de ce paramètre varie entre $1,33 \cdot 10^{10}$ et $6,34 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$ en fonction de la résistance à la diffusion de vapeur variable du frein-vapeur INTELLLO. Leurs parois comportent majoritairement des matériaux hygroscopiques (module ouate de cellulose) et non hygroscopiques (module laine de verre) afin d'obtenir un comparatif de la dynamique des transferts couplés de chaleur et de masse au sein de chaque paroi. Le panneau de contreventement et le parement intérieur sont les mêmes pour les deux modules.

La Figure 69 et la Figure 70 donnent l'évolution des profils de température dans les couches de matériaux des parois nord de chaque module pendant la période de mesure. Nous pouvons observer très peu de différence entre les valeurs données sur les deux figures, ce qui confirme que les résistances thermiques sont très proches pour les deux parois. La lame d'air non ventilée côté intérieur apporte très peu de résistance au transfert de chaleur selon le faible écart de température mesurée de part et d'autre de ce vide technique.

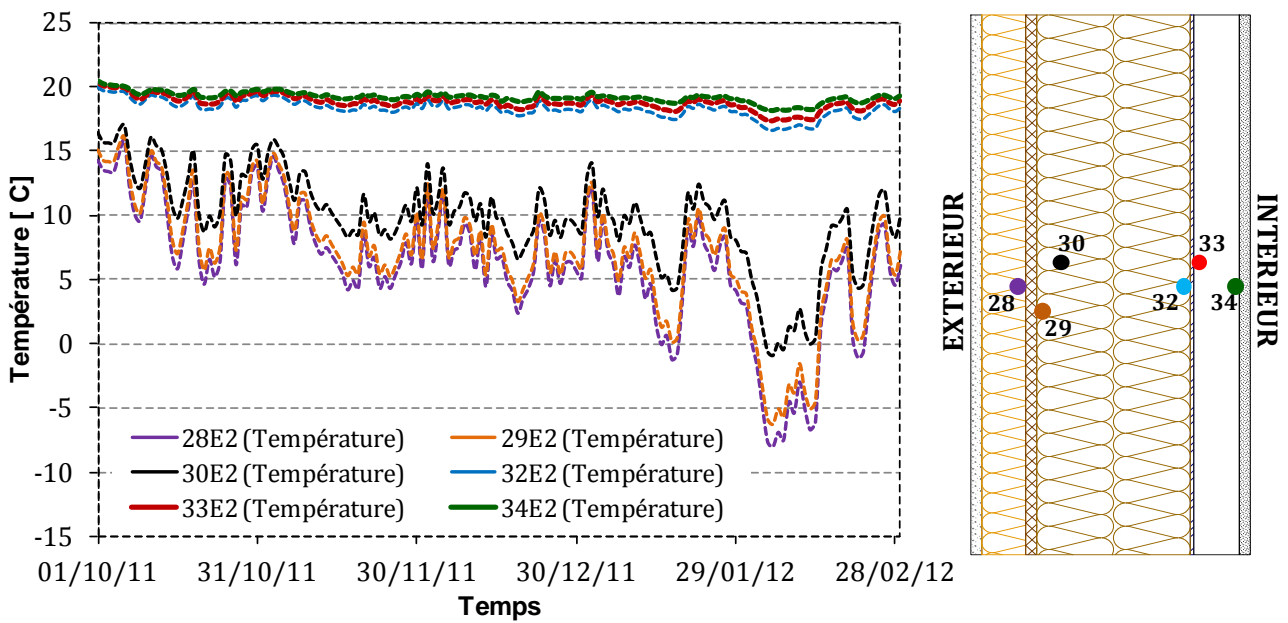


Figure 69. Evolution de la température dans la paroi nord avec isolation laine de verre

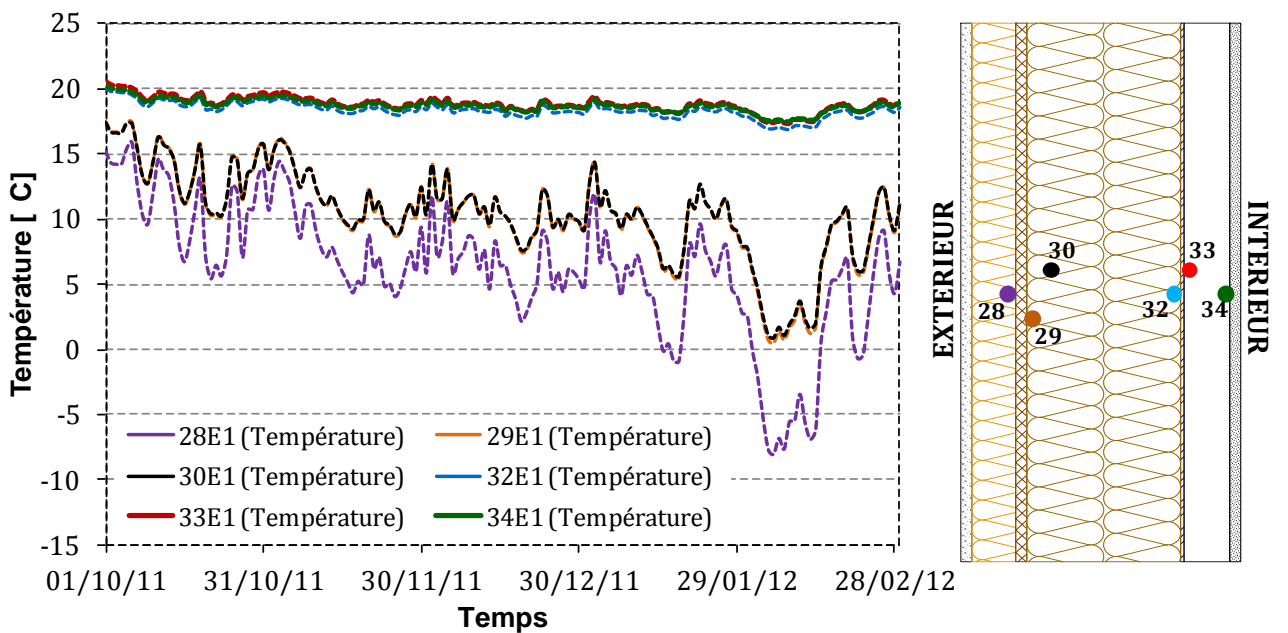


Figure 70. Evolution de la température dans la paroi nord avec isolation en ouate de cellulose

Afin d'établir un comparatif de la dynamique des transferts couplés chaleur-masse dans les deux modules hygroscopique et non hygroscopique, les évolutions des profils d'humidité des parois nord sont présentées ci-après. L'orientation nord a été choisie pour sa faible exposition au soleil ce qui favorise l'exposition de la paroi considérée aux problèmes liés à l'humidité. Dans cette partie, la performance hydrique de chaque paroi sera analysée par le risque de condensation existant dans la paroi, c'est en effet l'un des paramètres pouvant entraîner la dégradation des matériaux et de leurs performances thermiques et hydriques. Le terme

condensation désignera donc la formation d'eau liquide résultant de la saturation de l'air contenu dans la paroi.

Dans le module en laine de verre, la surface extérieure et la surface intérieure du panneau de contreventement constituent des zones critiques du fait de l'humidité relative élevée qui y est enregistrée pendant la période d'octobre à février (Figure 71). A ces endroits, l'humidité relative de l'air est constamment supérieure à 90% avec une moyenne de 92%. Un risque de condensation existe souvent de part et d'autre du panneau de contreventement en OSB pendant la période d'automne jusqu'en hiver. Malgré les variations assez élevées de température à cet endroit, l'humidité est relativement constante. Ceci est probablement dû au comportement hygroscopique du panneau OSB qui a tendance à réguler l'humidité de l'air environnant. En effet, l'isotherme de sorption du matériau dépend de la température. Ainsi, lorsque la température diminue, l'humidité relative de l'air augmente : le panneau OSB adsorbe une partie de l'humidité environnante pour se mettre en équilibre hygrique avec l'air qui l'entoure, entraînant une diminution de l'humidité de l'air et inversement (Figure 73).

Pour le module en ouate de cellulose, le comportement en humidité observé pendant la période présentée est moins critique. En effet, la surface extérieure du panneau OSB qui présente l'humidité relative la plus élevée dans la paroi est à une humidité relative moyenne de 85%, ne dépassant pas 90%. Ce module comporte également un panneau OSB qui régule l'humidité de l'air comme pour le cas du module en laine de verre. Par ailleurs, le panneau de fibre de bois rigide support d'enduit est également un matériau hygroscopique, sa mise en équilibre avec l'air environnant pourrait donc augmenter la régulation d'humidité déjà assurée par le panneau OSB. D'autre part, ce panneau étant perméable à la vapeur d'eau, l'excès d'humidité à la surface du panneau OSB est plus facilement évacué vers l'extérieur de la paroi.

Un comparatif du comportement hygrothermique entre la laine de verre et la ouate de cellulose a déjà été réalisé lors d'une étude de suivi d'un bâtiment en ossature, où les deux isolants ont été utilisés dans deux parois de même composition (Vinha, 2007). Les résultats obtenus ont montré l'inverse de ce que nous constatons sur les modules : l'humidité relative mesurée par Vinha (2007) dans l'isolant en laine de verre était de 10 à 15% plus faible que celle mesurée dans la ouate de cellulose.

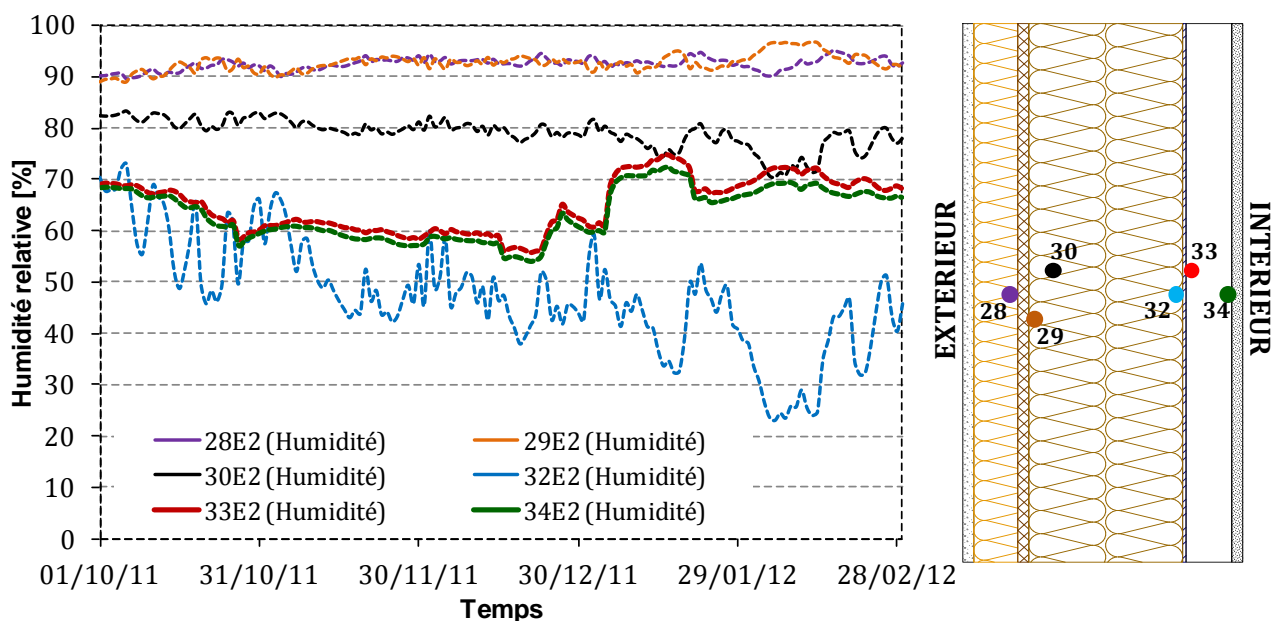


Figure 71. Evolution de l'humidité relative dans la paroi nord avec isolation en laine de verre

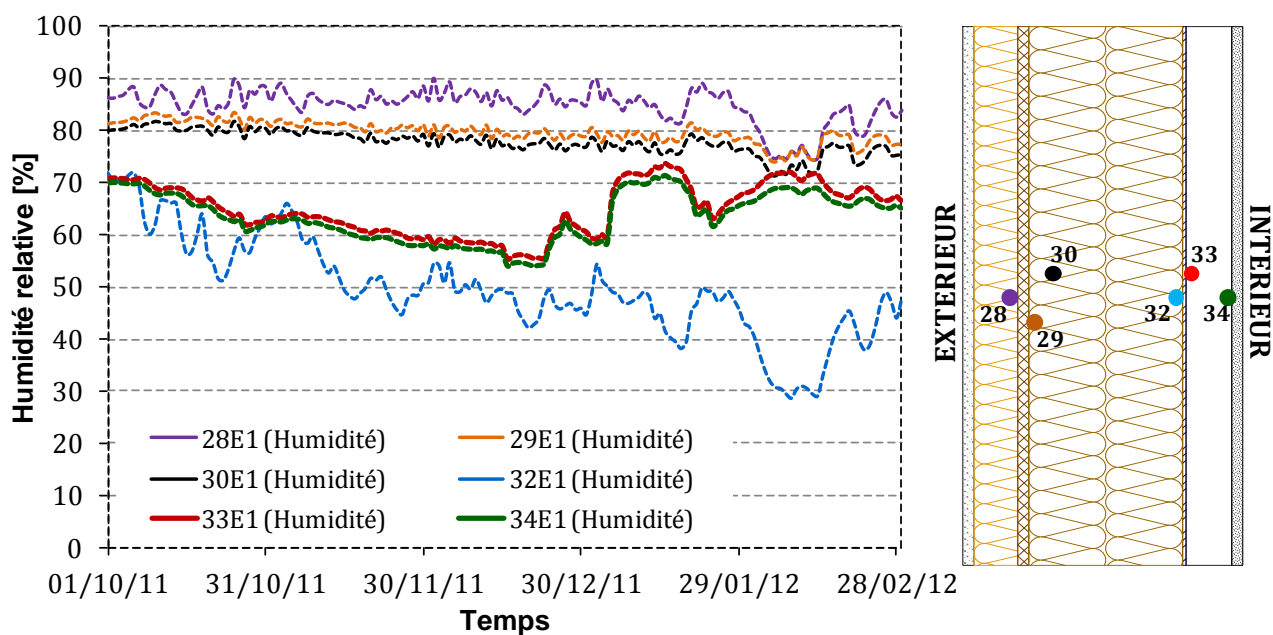


Figure 72. Evolution de l'humidité relative dans la paroi nord avec isolation en ouate de cellulose

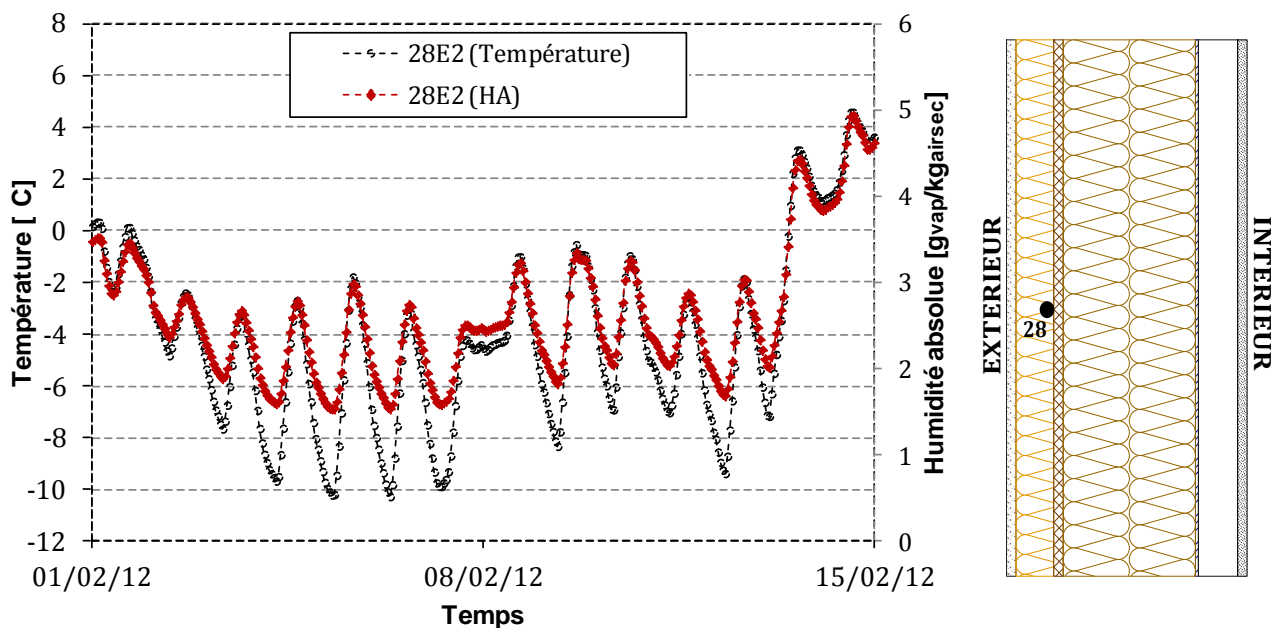


Figure 73. Evolution horaire de la température et de l'humidité absolue de l'air en surface extérieure du panneau OSB/module laine de verre

Les risques de condensation et de gel liés à la saturation de l'air sont le plus souvent rencontrés pendant les périodes où la température chute brusquement en dessous de la température de rosée. Dans le cas de notre étude, ces conditions défavorables correspondent aux semaines les plus froides enregistrées entre fin janvier et mi-février 2012 au voisinage du panneau OSB. Pourtant, la diminution de la température à la surface extérieure du panneau OSB s'accompagne dans les deux cas d'une baisse de l'humidité relative de l'air. Le comportement hygroscopique du panneau OSB (expliqué auparavant) entraîne une diminution de l'humidité de l'air autour du matériau lorsque la température baisse. Ce phénomène est observé aussi bien dans le module en laine de verre que dans celui en ouate de cellulose (Figure 74 et Figure 75 respectivement). Cependant, l'effet est plus intéressant pour la paroi avec isolation en ouate de cellulose où l'humidité relative est passée de 85% à moins de 75%, le risque de condensation à cet endroit est dans ce cas écarté malgré la chute brutale de température.

Lorsque la température remonte, nous pouvons observer une reprise d'humidité de chaque paroi. Pour la paroi nord du module en laine de verre, l'humidité relative finale est plus élevée qu'initialement pour une même température (Figure 74) au niveau de la surface extérieure du panneau OSB. Ce comportement pourrait être attribué à l'hystérésis existant entre la quantité d'humidité adsorbée et celle échangée entre le matériau et l'air.

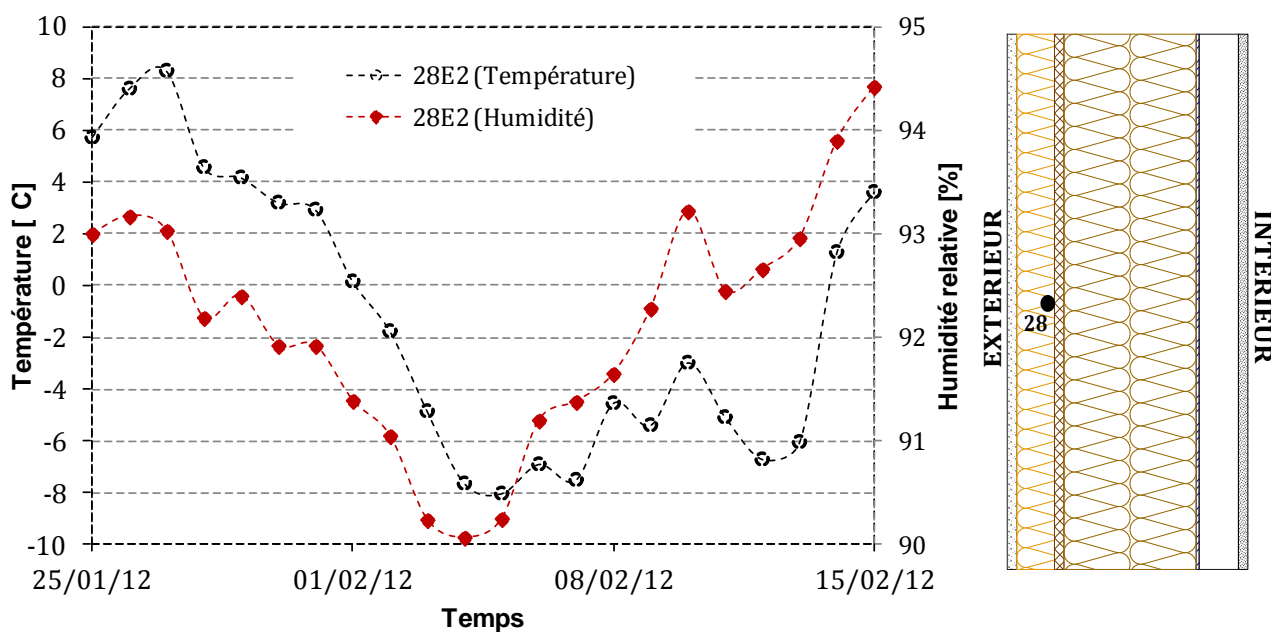


Figure 74. Evolution de la température et de l'humidité relative à la surface extérieure du panneau OSB (module ossature laine de verre)

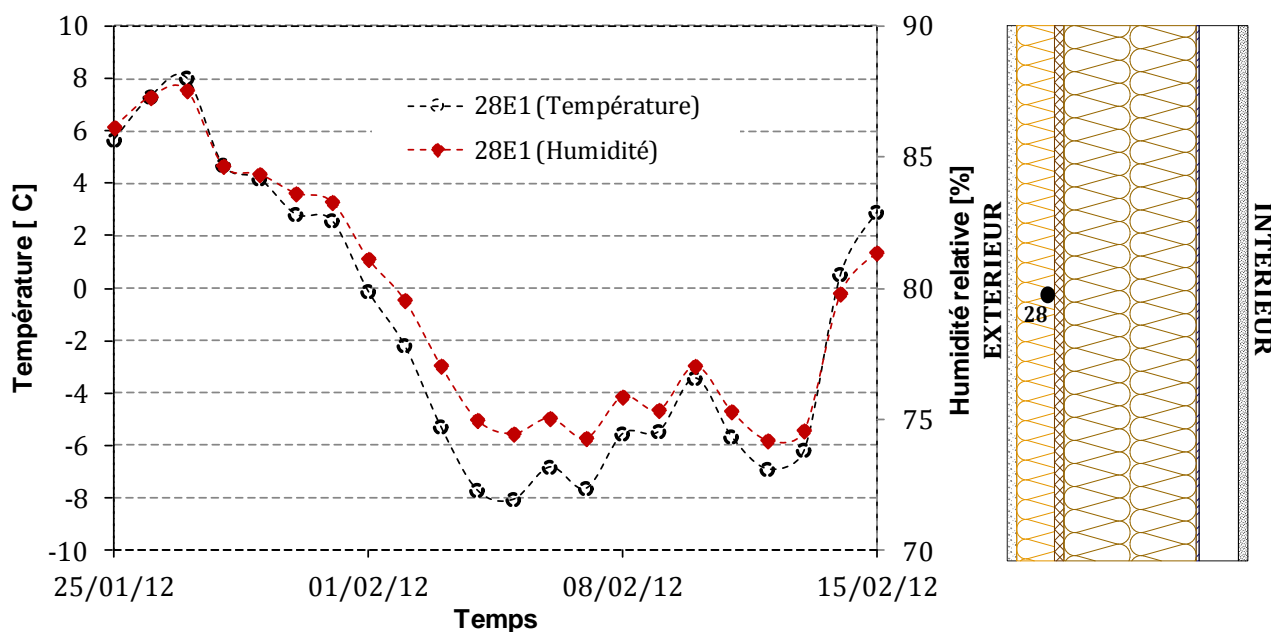


Figure 75. Evolution de la température et de l'humidité relative à la surface extérieure du panneau OSB (module ossature ouate de cellulose)

Influence de la membrane de régulation de vapeur

Une production d'humidité intérieure a été réalisée pour maintenir la consigne d'humidité relative à 65% avec une température de 20°C dans tous les modules pendant deux semaines en hiver, chaque enveloppe a ensuite été en évolution libre au niveau de l'humidité tandis que la consigne de 20°C en température a été maintenue. La Figure 76 donne l'évolution de

l'humidité absolue de part et d'autre de la membrane de régulation de vapeur dans les deux modules en ossature précédents, pendant la période d'humidification.

D'après la Figure 76 Les charges internes d'humidité se répercutent peu à l'intérieur de la paroi (après la membrane barrière vapeur), du fait de l'existence des membranes. Ces dernières réduisent de façon significative la diffusion de la vapeur à l'intérieur de la paroi, entraînant une accumulation de l'humidité dans le vide technique durant la production interne de vapeur.

Le comportement des membranes pare-vapeur et frein-vapeur hygrovariable se distinguent difficilement au début de l'humidification, vu que les taux d'humidité à la surface intérieure des membranes sont presque égaux, même si le frein-vapeur devrait être plus ouvert à la diffusion de vapeur à haute humidité. Une légère différence d'humidité peut être observée à partir d'une semaine après le début de l'humidification, ce qui pourrait se traduire par la diffusion très lente de l'humidité à travers la membrane frein-vapeur. D'après la Figure 77, ces conditions (humidité relative au-dessus de 80% pour une température en-dessous de 20°C) ne sont pas atteintes au sein des deux parois pendant la période de chauffe.

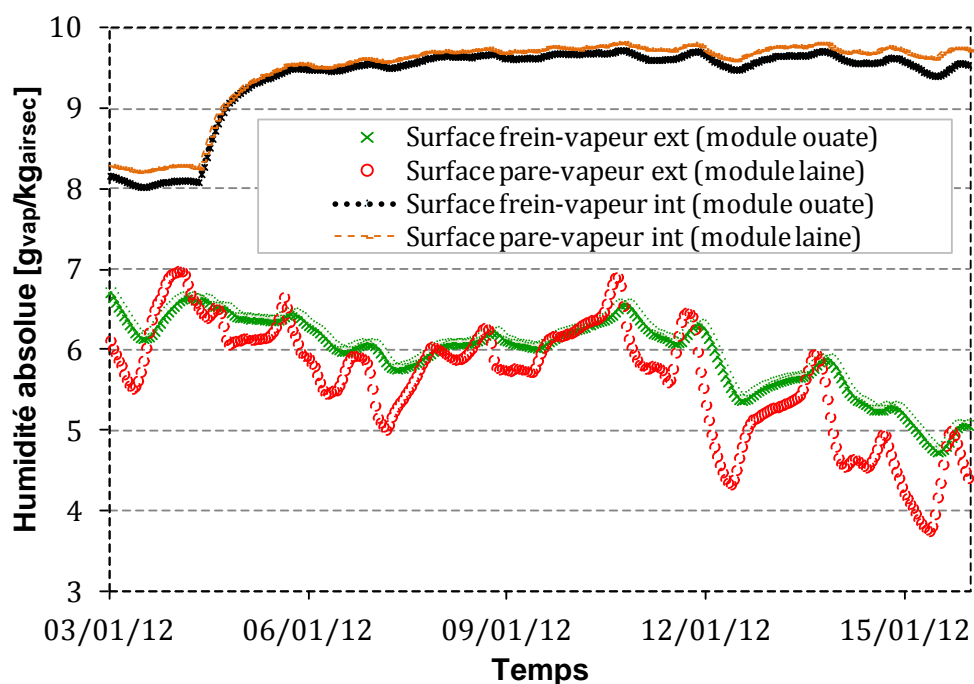


Figure 76. Humidité absolue de part et d'autre de la membrane pare ou frein-vapeur (module laine de verre et ouate respectivement)

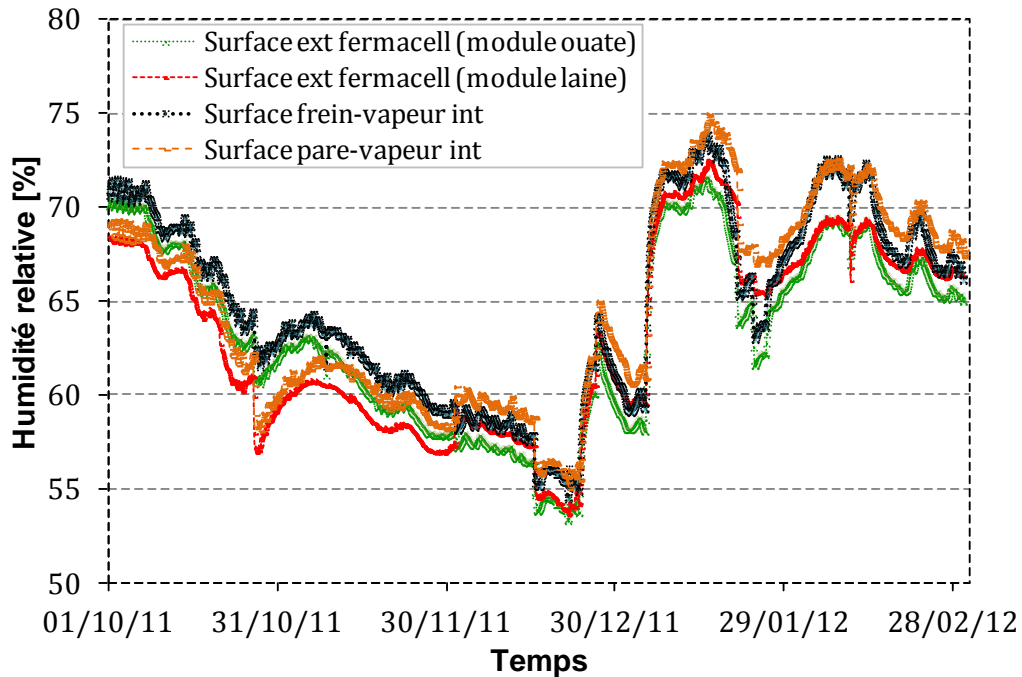


Figure 77. Humidité relative dans les lames d'air intérieures des modules laine de verre et ouate de cellulose

La Figure 78 montre l'évolution moyenne quotidienne de l'humidité absolue de l'air mesurée de part et d'autre du frein-vapeur et du pare-vapeur des modules ossatures en ouate de cellulose et en laine de verre. Nous pouvons remarquer une tendance à l'humidification des couches d'isolant proches de la membrane, avec un taux d'humidité plus élevé pour la laine de verre comparé à la ouate de cellulose, entre le mois de Mai et le mois de Septembre. Pendant cette période, le gradient d'humidité de part et d'autre de la membrane est inversé par rapport à celui observé en période froide. Dans le cas des deux modules, un réchauffement des couches extérieures de la paroi entraîne une désorption et donc une augmentation de l'humidité dans l'isolant. Dans le cas du module ossature ouate de cellulose, l'isolant proche de la membrane adsorbe une partie de cette humidité. Par ailleurs, le frein-vapeur permet une migration vers l'intérieur. La différence du taux d'humidité absolue de l'air entre les deux isolants est en moyenne de $1 \text{ g}_{\text{vapeur}}/\text{kg}_{\text{airsec}}$ pendant cette période.

Cette accumulation d'humidité derrière la membrane pourrait constituer un risque en favorisant le développement des moisissures, étant donné que la température y est proche de la température ambiante intérieure (20°C). En effet, selon la Figure 79, l'humidité relative de l'air à cet endroit est souvent proche de 80% pendant les périodes printanière et estivale. La Figure 80 illustre les risques liés au développement des moisissures par l'évolution de l'humidité relative de l'air moyenne en fonction de la température à la surface extérieure des membranes, selon les conditions limites en température et humidité relative de l'air définies par Hukka & Viitanen (1999). Selon les résultats de la figure, le risque existe pour la laine de verre derrière le pare-vapeur, contrairement à la ouate de cellulose où l'humidité relative est toujours en dessous de la valeur limite.

En hiver, l'intérieur des modules étant plus humide que l'air extérieur, le sens du flux d'humidité à travers la paroi est majoritairement de l'intérieur du module vers l'extérieur, ce qui explique l'assèchement des isolants derrière les membranes.

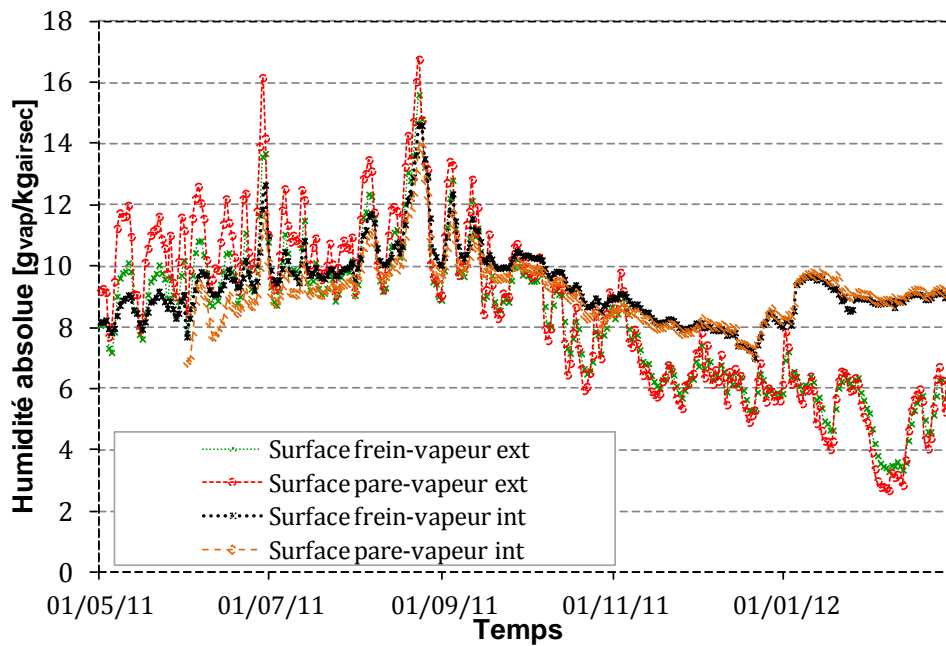


Figure 78. Evolution de l'humidité absolue de l'air de part et d'autre des membranes de régulation de vapeur dans les modules ossatures laine de verre et ouate de cellulose

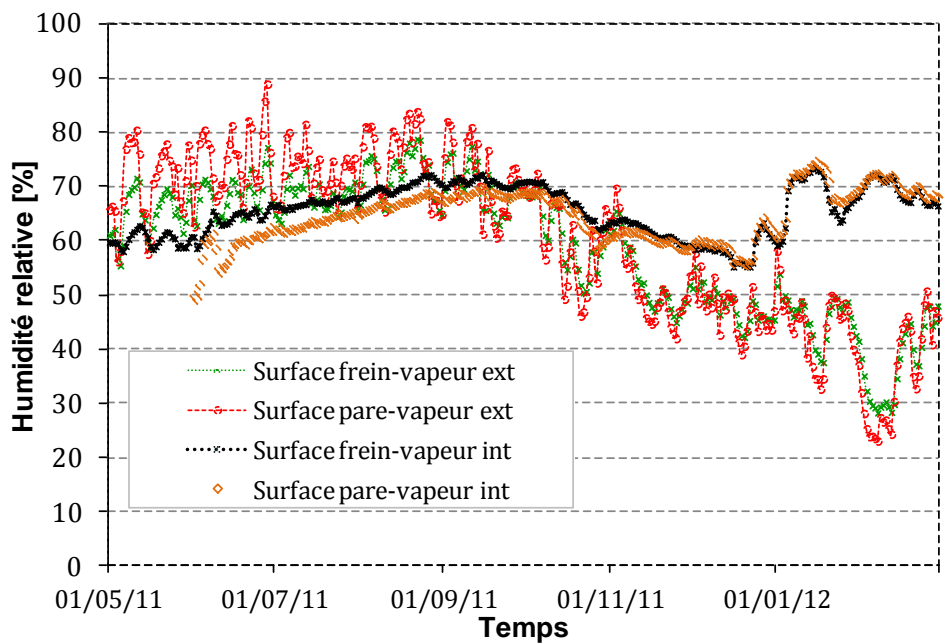


Figure 79. Evolution de l'humidité relative de l'air de part et d'autre des membranes de régulation de vapeur dans les modules ossatures laine de verre et ouate de cellulose

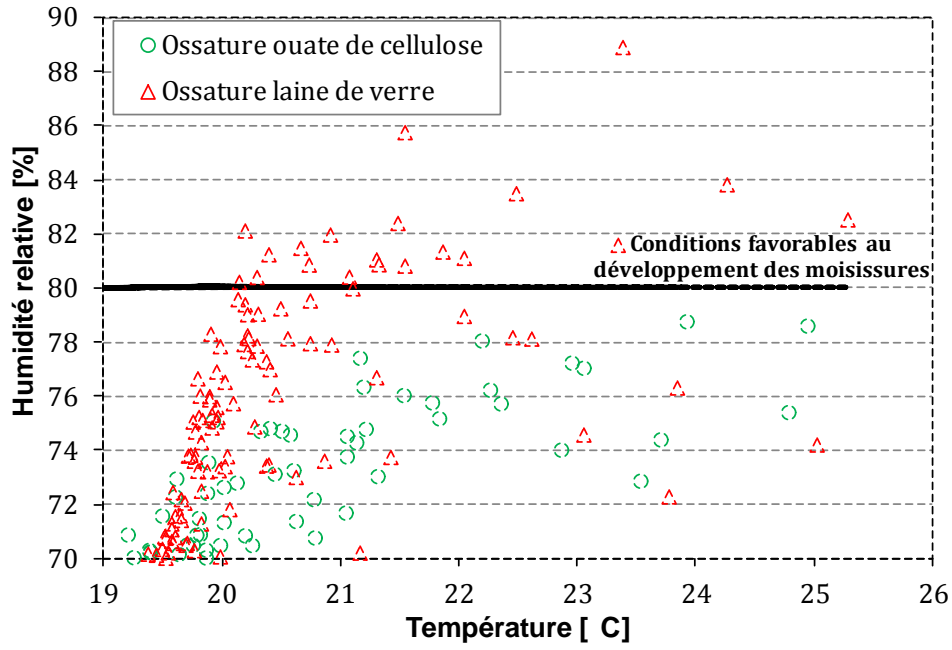


Figure 80. Humidité relative moyenne quotidienne de l'air mesurée derrière le frein-vapeur et le pare-vapeur des ossatures ouate et laine de verre

III.5. Conclusion

Une description des modules-test destinés à caractériser les transferts couplés de chaleur et de masse à l'échelle de l'enveloppe a été détaillée dans ce chapitre. Les compositions des parois verticales des modules représentent différents systèmes constructifs bois (ossature, madriers empilés, rondins) et différents matériaux aussi bien hygroscopiques que non hygroscopiques. Les autres éléments de parois (plancher bas, plancher haut, porte) ont été conçus identiques pour tous les modules afin de permettre de réaliser un comparatif du comportement hygrothermique des différents systèmes constructifs étudiés. Les modules ont été instrumentés de manière à permettre un suivi détaillé du comportement hygrothermique des parois verticales exposées aux conditions climatiques extérieures. L'ambiance intérieure est également contrôlée en température et en humidité relative. Ceci permet de simuler les scénarios d'occupation (température, production d'humidité) d'un bâtiment.

La part des déperditions passant par les différentes parties de l'enveloppe de chaque module a été estimée par le biais de simulations thermiques réalisées avec le logiciel thermique dynamique Pléiades-Comfie. Les résultats de simulation ont montré que seules 50 % des déperditions passent par les parois verticales étudiées et qu'une part non négligeable est due aux ponts thermiques linéiques dans les modules. En comparant les besoins en chauffage mesurés sur les modules à ceux calculés avec Pléiades Comfie, les résultats ont montré que les besoins calculés par le logiciel étaient supérieurs aux besoins mesurés pour les cinq modules.

Les observations faites sur les résultats de suivi du comportement hygrothermique des enveloppes des modules a confirmé l'importance des parements intérieurs dans la régulation de l'humidité intérieure. Nous avons également observé qu'en modifiant l'humidité locale des matériaux, la dynamique des transferts de chaleur dans la paroi a une influence sur les échanges d'humidité à travers la paroi. L'influence des propriétés des matériaux (lame d'air ventilée, hygroscopicité, existence de la membrane de régulation de vapeur) sur la performance hygrothermique de la paroi a également été montrée lors du suivi de l'évolution des profils de température et d'humidité dans les parois.

CHAPITRE IV.

IV. Etude des transferts chaleur-masse à l'échelle du bâtiment

Après l'étude en laboratoire de la paroi, puis d'enveloppes simples en extérieur, l'étape ultime est l'étude du bâtiment en usage. Cette étape est complexe parce qu'elle intègre l'ensemble des paramètres et en particulier ceux liés aux occupants et à leur manière d'exploiter le bâtiment. Les résultats expérimentaux obtenus grâce au suivi des bâtiments permettront à terme de valider les codes numériques sur des configurations réalistes.

Cette phase du programme de recherche TRANSBATIBOIS a été menée avec les constructeurs associés au projet. Certains d'entre eux ont eu la possibilité de nous mettre à disposition des programmes de constructions en cours de montage, mais pour la plupart, les expérimentations ont été proposées sur des constructions existantes et occupées. Nous avons donc dû composer avec des possibilités réduites d'accès aux composants de l'enveloppe ou aux différents systèmes du bâtiment. Dans tous les cas, l'instrumentation mise en place devait avoir un impact minimal sur la construction et surtout sur ses occupants. Les instrumentations ont donc été adaptées aux contraintes spécifiques de chaque construction et par le fait, les informations recueillies peuvent être plus ou moins détaillées d'un site à l'autre.

IV.1. Instrumentation développées à l'échelle bâtiment

Lors de l'étude du comportement énergétique d'un bâtiment, il est nécessaire de connaître les conditions de sollicitation du bâtiment (conditions climatiques, exposition), ses conditions d'usage (occupation, gestion des systèmes), si l'on souhaite pouvoir interpréter les différents flux d'énergie et de masse dans notre cas. L'instrumentation développée dans cette partie porte donc sur quatre postes de relevés: les conditions climatiques extérieures et l'exposition du bâtiment, les conditions intérieures (température, humidité), les caractéristiques et les consommations des différents systèmes (chauffage, ventilation, production d'Eau Chaude Sanitaire, etc.), et enfin les profils de température et d'humidité dans les parois.

La technologie d'acquisition des données est identique à celle développée pour le dispositif expérimental de test de paroi et décrit dans le paragraphe II.1.3.

Les conditions climatiques sont mesurées à l'aide d'une station météo Davis Pro 2 6152 FR installée sur chaque site. Les grandeurs suivantes sont mesurées : température et humidité relative de l'air, pression atmosphérique, vitesse et direction du vent, rayonnement solaire global sur une surface horizontale et taux de précipitations.

La température et l'humidité relative intérieures sont mesurées à l'aide de thermohygromètres SHT 75 (Sensirion). La température résultante est mesurée à l'aide d'un thermocouple type T installé dans un globe noir. Dans le cas où un suivi du taux de CO₂ est réalisé, la mesure est effectuée avec un capteur CO₂.

La consommation des différents systèmes électriques (chaudière électrique, ballon d'eau chaude sanitaire, résistance d'appoint du système de ventilation mécanique contrôlée) est mesurée à l'aide de compteurs d'énergie électrique de marque FINDER. Le suivi de la consommation des poêles (à bûches ou à granulés) a été réalisé par la pesée des quantités de bois utilisé. Le temps de fonctionnement du poêle est déterminé à l'aide de thermocouples type T mesurant la température de fumée. Concernant le système de ventilation mécanique contrôlée, la mesure de la température d'air (air entrant et sortant de l'échangeur, air extrait et insufflé dans les pièces) a été effectuée à l'aide de thermocouples type T.

Le suivi des profils de température et d'humidité dans les parois des bâtiments est réalisé à l'aide de thermohygromètres SHT 75 insérés à différents endroits dans l'épaisseur des parois. Le principe de mesure de l'humidité des matériaux est décrit dans le paragraphe II.2.1. La température de surface des parois est mesurée à l'aide de thermocouples type T.

Le Tableau 15 donne une synthèse des différentes postes étudiés avec les capteurs installés.

Tableau 15. Synthèse des capteurs installés sur les bâtiments

| Type de mesures | Grandeurs mesurées | Type de capteurs | Référence | Précision | Gamme de mesures |
|------------------------|--|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Suivi conditions météo | T, HR, vent, rayonnement et précipitations | Station météo | Davis Pro 2 6152FR | - | - |
| Mesures Paroi | Température et Humidité | Thermo hygromètre | SHT 75 | $\pm 0,3$ °C et $\pm 1,8\%$ | [-40 ; 123,8] °C [0 ; 100]% |
| | Température de surface | Thermocouple type T | B11- Tx-IEC 584.3- Classe 1 | $\pm 0,5$ °C | [-50 ; 250] °C |
| Mesures Confort | Température et Humidité relative | Thermo hygromètre | SHT 75 | $\pm 0,3$ °C et $\pm 1,8\%$ | [-40 ; 123,8] °C [0 ; 100]% |
| | Température résultante | Thermocouple + Boule noire | B11- Tx-IEC 584.3- Classe 1 | $\pm 0,5$ °C | [-50 ; 250] °C |
| | Taux de CO ₂ | Capteur CO ₂ | EE80-2CT3D04T31 | $\pm (50 \text{ ppm} + 2\%)$ | [0 ; 2000] ppm |
| Suivi consommation | Consommation électrique | Sous compteur électrique | FIN7E2382300000 | - | - |
| | Consommation poêle à bûches | Thermocouple type T | B11- Tx-IEC 584.3- Classe 1 | $\pm 0,5$ °C | [-50 ; 250] °C |

IV.2. Constructions étudiées

Les constructions qui ont fait l'objet d'une instrumentation sont les suivantes :

- un chalet en rondins empilés (fuste)
- une maison avec une structure en panneaux contrecollés massifs (KLH) isolée par l'extérieur avec de la ouate de cellulose. Au premier niveau, le parement extérieur est un enduit appliqué sur un isolant en fibre de bois tandis qu'au second niveau, la vêtture est un bardage en tuiles.
- une maison d'habitation en ossature bois avec une isolation en fibres de bois et un bardage extérieur en bois.

- Un immeuble de logements collectifs dont la structure (planchers et refends) est en panneaux contrecollés massifs (KLH) et les façades en ossature bois avec un bardage extérieur métallique.

IV.2.1. Construction en rondins

Le chalet instrumenté est situé à 850 m d'altitude dans la commune de La Bresse, dans les Vosges. Le chalet fait partie d'un ensemble de chalets de location construits à proximité d'une forêt, des arbres se trouvent donc à proximité et font ombre au chalet.

Les murs du chalet sont en rondins empilés non isolés de diamètre moyen 300 mm au rez-de-chaussée. A l'étage, les murs sont en ossature bois avec isolation en polystyrène extrudé et en laine de verre, le parement extérieur est un bardage en bois. La composition du mur en ossature, de l'extérieur vers l'intérieur est comme suit :

- Bardage bois (25 mm)
- Polystyrène extrudé (40 mm)
- Laine de verre (100 mm)
- Vide technique (lame d'air de 40 mm)
- Parement intérieur en bois massif (25 mm)

Le chauffage est assuré par une chaudière électrique de marque ZAEGEL HELD (puissance nominale 9,6 KW) reliée à un plancher chauffant. Un poêle à bûches de marque SUPRA (puissance nominale 10 KW) est installé dans le séjour. La consigne de chauffage dépend de l'occupation du chalet qui est aléatoire puisque ce dernier est en location saisonnière. Le poêle à bûches n'est utilisé qu'en cas d'occupation du chalet. Les salles de bain sont munies de convecteurs électriques d'appoint.

Aucun système de climatisation ni de ventilation n'y est installé. La production d'eau chaude sanitaire est assurée par un ballon électrique de marque THERMOR, d'une capacité de 300 L avec une puissance de 3,3 KW.

L'instrumentation du chalet a été réalisée de Septembre 2010 à Mars 2012. Le chalet en rondins est le bâtiment le plus instrumenté parmi ceux étudiés dans le projet. En effet, la métrologie installée dans le chalet permet le suivi des conditions climatiques extérieures, des conditions intérieures, des consommations des systèmes de chauffage et de production d'eau chaude Sanitaire et des profils de température et d'humidité dans les parois sud (étage et rez-de-chaussée). L'implantation des capteurs de température et d'humidité dans les parois instrumentées est donnée sur la Figure 81. Les plans donnés sur la Figure 82 illustrent l'emplacement des différentes mesures dans le chalet.

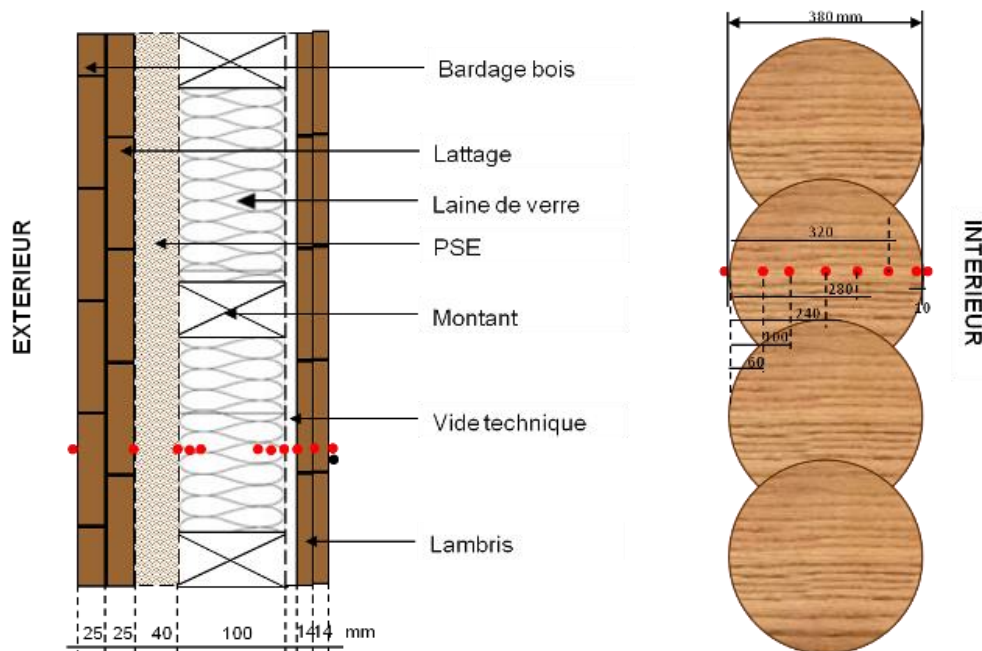


Figure 81. Implantation des capteurs dans les parois du chalet en fuste

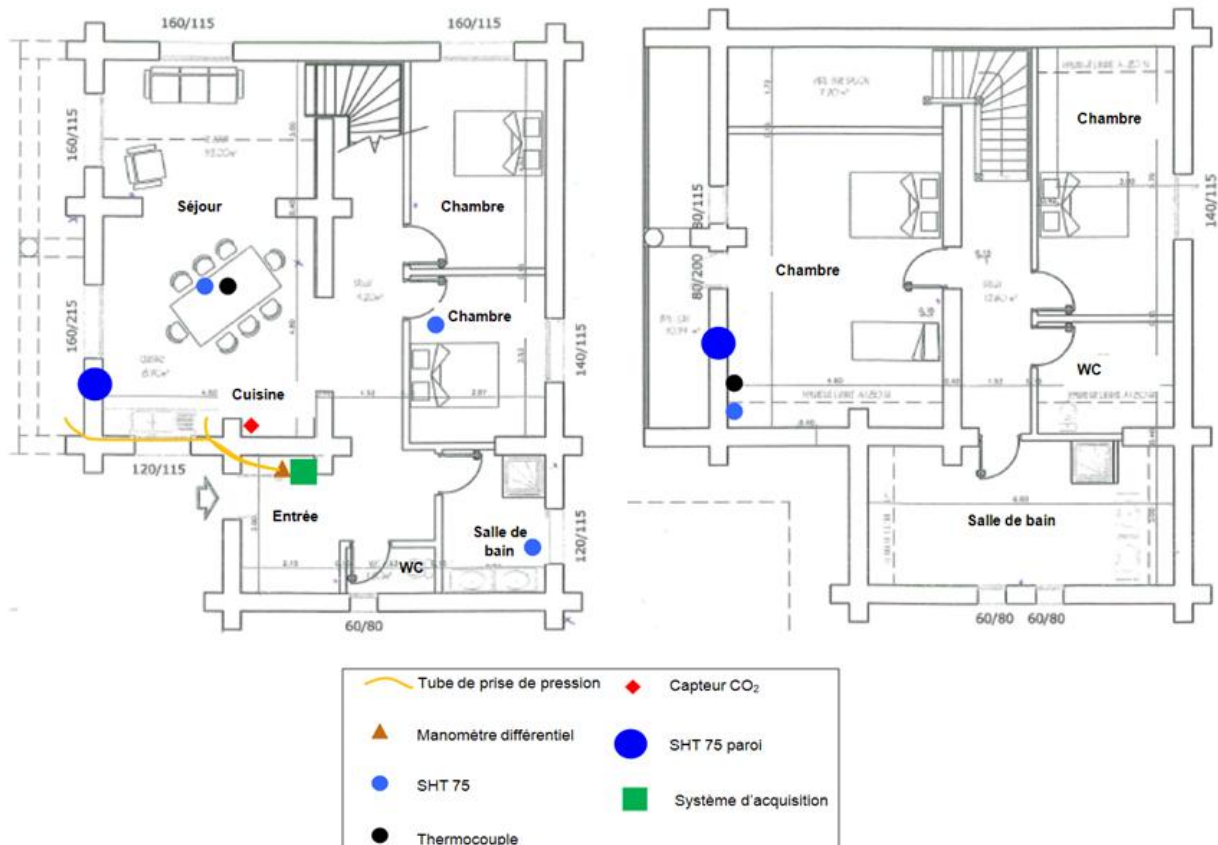


Figure 82. Emplacement des capteurs dans le chalet en fuste

IV.2.2. Maison en panneaux contrecollés

La maison instrumentée est une habitation de location construite pendant le projet TRANSBATIBOIS et qui fait partie du programme « les Toits de La Corvée » du Toit Vosgien, un lotissement situé à Saint-Dié, dans le département des Vosges. Les murs de la maison sont en panneaux contrecollés massifs (KLH) avec une isolation en ouate de cellulose par l'extérieur. La composition complète de la paroi est donnée sur la Figure 83.

Le chauffage est assuré principalement par un poêle bouilleur (à bûches), de marque SPARTHERM AMBIENTE, avec une puissance totale de 9 KW dont 6KW assurant le chauffage et 3 KW destinée à la production d'eau chaude sanitaire. La ventilation de la maison est assurée par une VMC double flux comportant une résistance d'appoint de 2,25 KW. La maison n'est pas équipée d'un système de climatisation. La production d'eau chaude sanitaire est assurée principalement par une installation solaire alimentant le ballon (SONENKRAFT SKS C2, 2,5 KW). Une partie de la chaleur produite par le poêle bouilleur vient compenser l'énergie fournie par l'installation solaire.

L'instrumentation de la maison consiste en un suivi des conditions climatiques extérieures, des conditions intérieures, et des consommations des systèmes de chauffage, de ventilation et de production d'eau chaude Sanitaire. Des capteurs SHT 75 ont également été installés dans une paroi à l'étage au cours de la construction de la maison mais des problèmes techniques survenus à la fin du chantier ont entraîné la perte des signaux des capteurs. La Figure 84 donne la répartition des capteurs d'ambiance dans la maison.

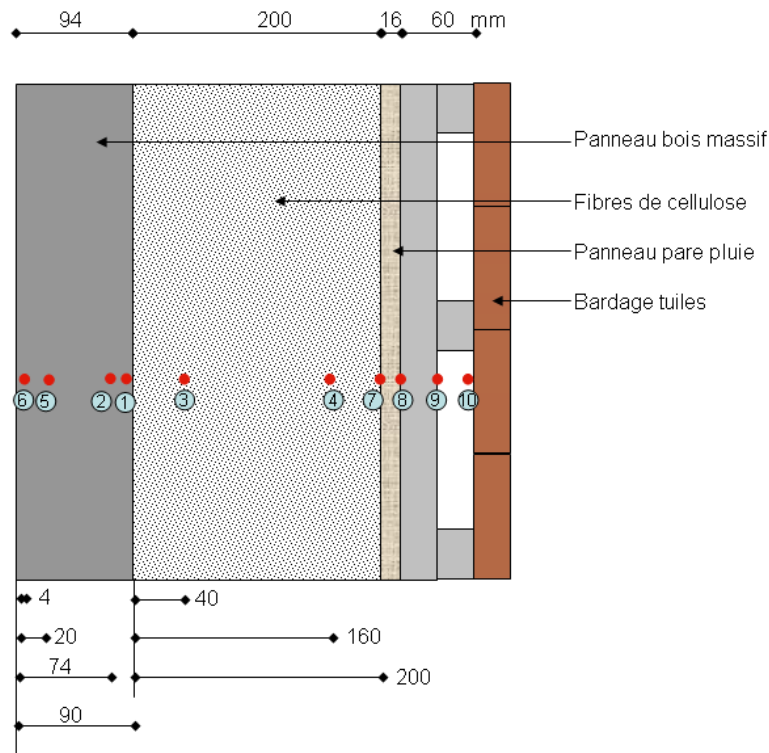


Figure 83. Coupe de la paroi de la maison en panneaux contrecollés

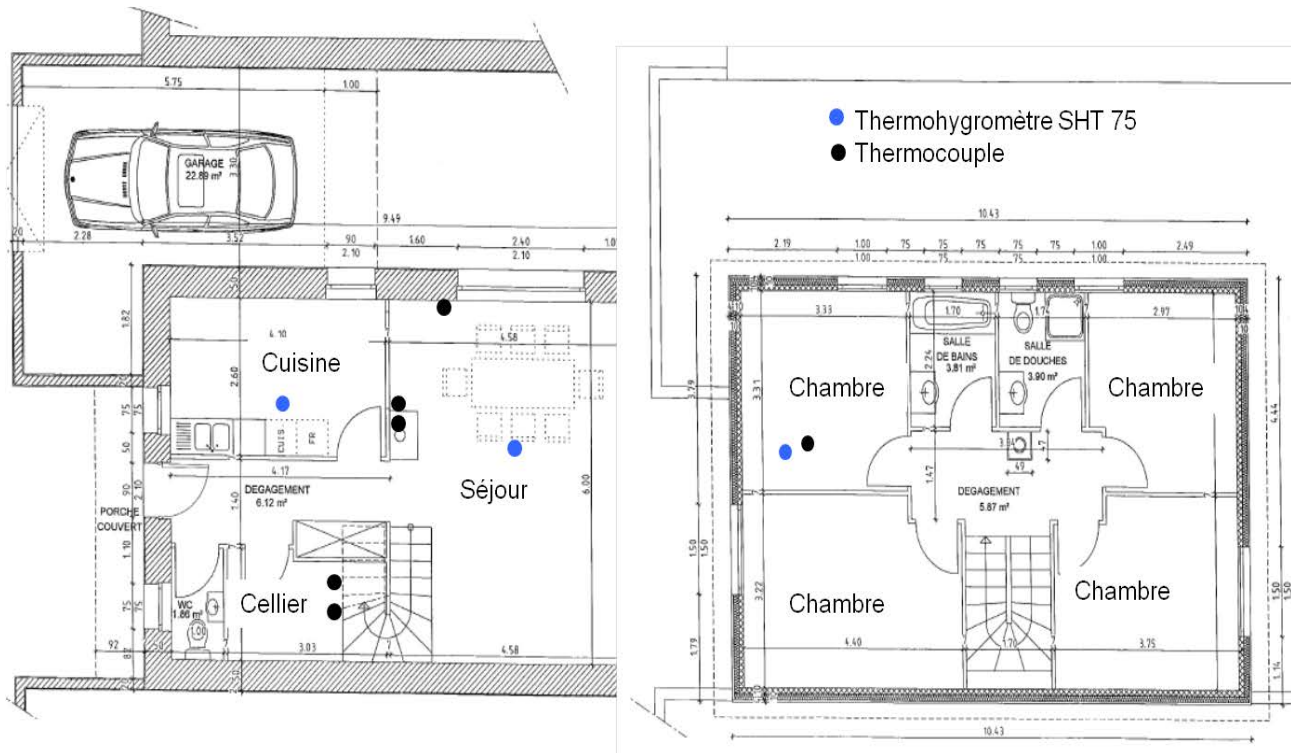


Figure 84. Emplacement des capteurs dans la maison en panneaux contrecollés

IV.2.3. Maison en ossature bois

La maison instrumentée, localisée à Liezey à 750 m d'altitude, possède une structure à ossature bois, avec isolation en fibres de bois souple et un bardage extérieur en bois. La coupe du mur ossature est donnée sur la Figure 85. La maison est construite plein sud sur un terrain partiellement dégagé et sans vis-à-vis. Elle est bien exposée au soleil et au vent.

Les fenêtres sont en double vitrage (4-16-4) avec remplissage argon et un coefficient $U_g = 1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Des volets coulissants en bois extérieurs sont installés.

La maison est dotée d'un système de chauffage associant les énergies bois et électrique : elle possède un poêle à bois installé dans le séjour et un plancher chauffant électrique. Les pièces sont également munies de radiateurs électriques. Aucun système de climatisation n'y est installé. Par contre, une VMC double flux couplée à un puits canadien équipe la maison. La production d'eau chaude sanitaire est assurée par un ballon électrique.

L'instrumentation de la maison consiste essentiellement au suivi des conditions climatiques extérieures, des profils de température et d'humidité de la paroi sud au rez-de-chaussée

(Figure 85) et de l'évolution de la température et de l'humidité dans le séjour.

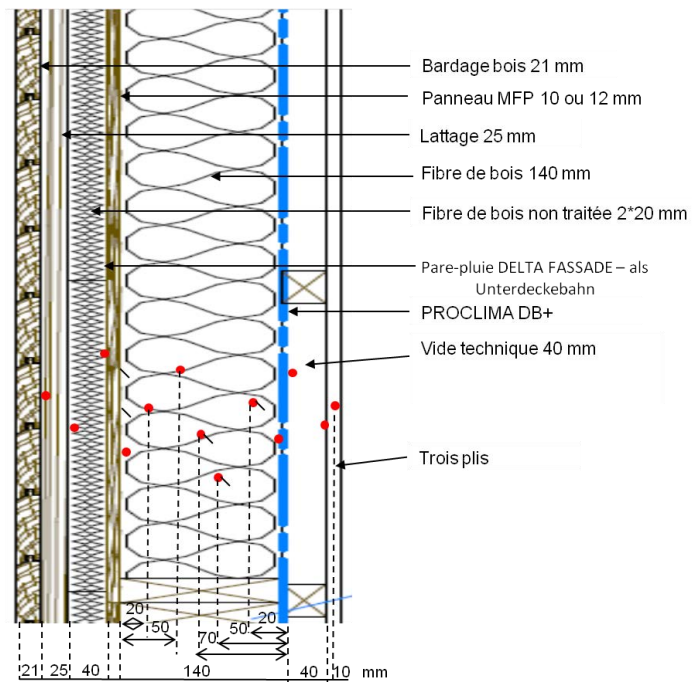
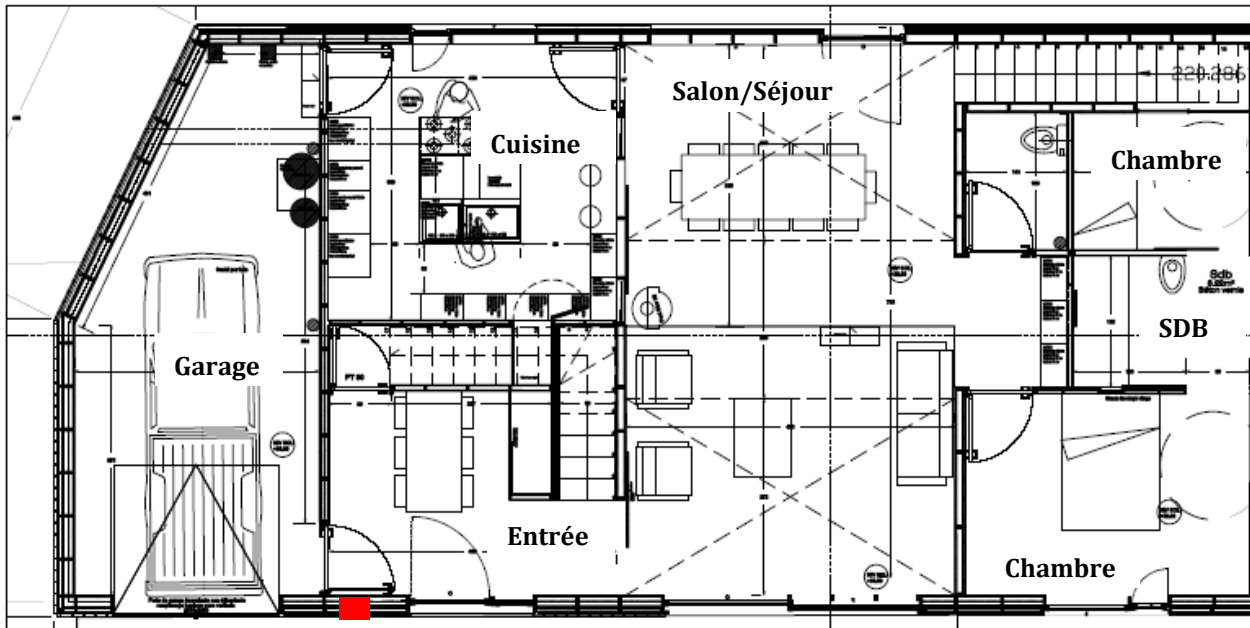


Figure 85. Implantation des capteurs dans la paroi Sud de la maison en ossature bois



■ SHT 75 dans la paroi

Figure 86. Emplacement des capteurs dans la maison en ossature bois

IV.2.4. Bâtiment en ossature bois

Dans le cadre de l'étude, l'un des deux bâtiments « Les Héliades » situés à Saint Dié des Vosges a également été instrumenté. Ces bâtiments ont pour spécificité d'être les premiers bâtiments en bois à énergie positive en Europe. Le bâtiment instrumenté doit sa performance énergétique entre autres à la très bonne isolation des parois avec 300 mm d'épaisseur d'isolant, à une très bonne étanchéité à l'air (niveau passif), à ses fenêtres triple vitrage, à une ventilation mécanique double flux ainsi qu'à des panneaux photovoltaïques utilisés pour la production d'électricité.

La structure du bâtiment (planchers et refends) est en panneaux contrecollés massifs et les façades en ossature bois. La composition des parois verticales est donnée sur la Figure 87.

Le suivi expérimental réalisé concerne un appartement en duplex situé au dernier niveau du bâtiment et dont le plan est donné ci-après. L'instrumentation consiste en un suivi du comportement hygrothermique des parois du bâtiment et est réalisée sur deux parois verticales, l'une orientée au Sud et l'autre orientée au Nord. Les thermohygromètres ont été installés dans les différentes couches de la paroi pendant la phase de construction du bâtiment. Un schéma d'implantation des capteurs SHT 75 dans les deux parois est donné sur la Figure 87. L'emplacement des points de mesure sur les façades nord et sur de l'appartement est donné sur la Figure 88.

L'instrumentation du bâtiment des Héliades est opérationnelle depuis le mois de Juin 2010.

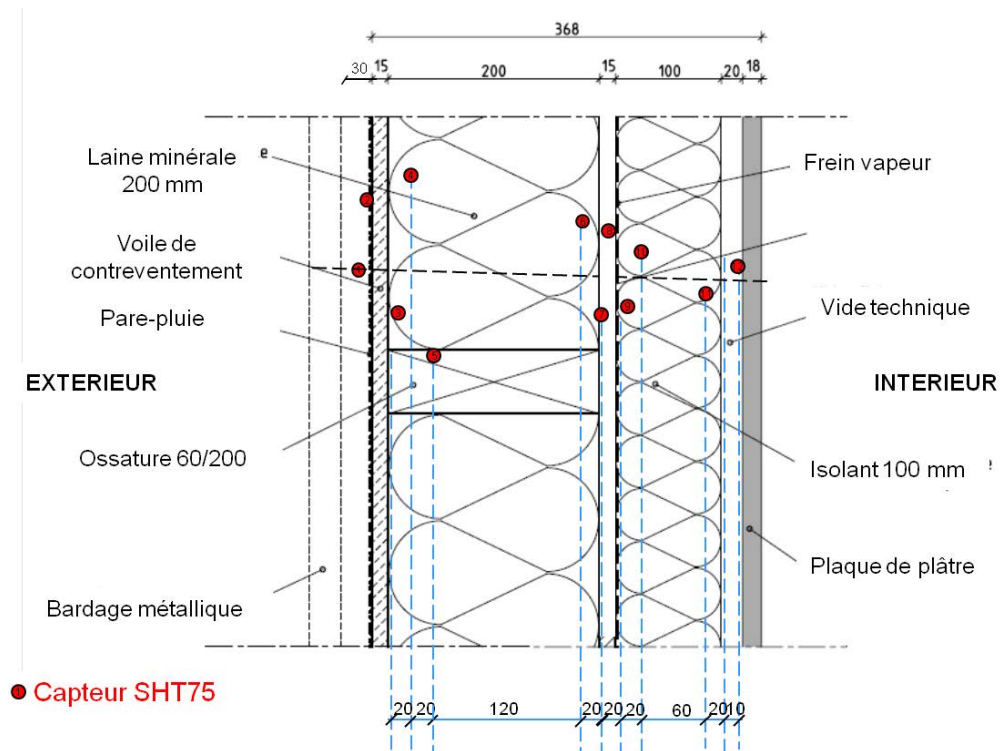


Figure 87. Implantation des capteurs dans l'une des parois du bâtiment en ossature bois

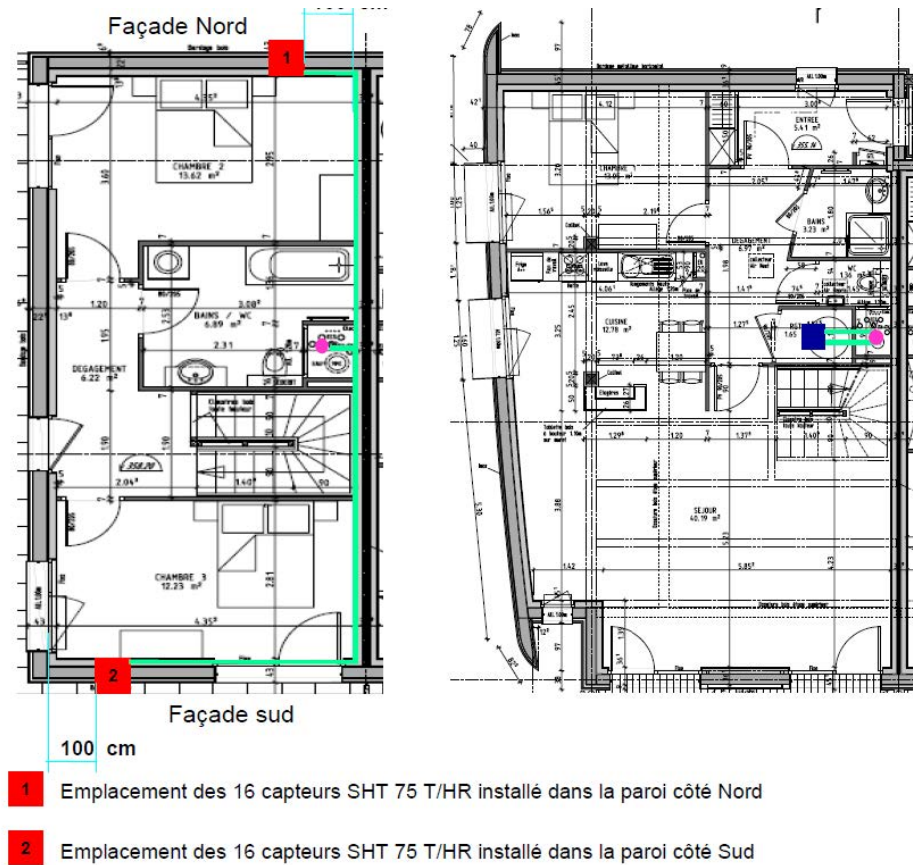


Figure 88. Emplacement des capteurs dans le logement du bâtiment en ossature bois

IV.3. Résultats et discussion

De précédents travaux de recherche (Frontczak et Wargocki (2011), Corgnati et al (2007), Huang et al (2012)) ont montré l'influence de différents paramètres (confort thermique, confort visuel, confort acoustique et qualité de l'air intérieur) sur la qualité de l'environnement intérieur d'un bâtiment et le confort des occupants. Une étude récente (Frontczak et Wargocki, 2011) résumant les différents travaux antérieurs réalisés sur le confort intérieur a montré que le confort thermique était le facteur de confort prédominant parmi ces paramètres. Etant donné que l'humidité est un paramètre clé influant sur la sensation de confort thermique des occupants (Fang et al, 1998, Toftum et al, 1998)), et compte tenu des informations obtenues dans les campagnes de mesure et de la complexité de la prise en compte de chaque aspect du confort intérieur, nous aborderons principalement le confort hygrothermique dans la suite de notre étude.

Le confort thermique et hydrique intérieur peut être évalué et comparé en traçant l'évolution de l'humidité et de la température intérieures sur le diagramme psychrométrique. La Figure 89 et la Figure 90 montrent la répartition de la température et de l'humidité intérieure (humidité absolue et humidité relative), mesurées dans le séjour du chalet en rondins et de la maison en panneaux contrecollés massifs, respectivement.

Les résultats de la Figure 89 montrent un bon comportement thermique et hydrique du séjour du chalet en rondins aussi bien en été qu'au printemps. Les amplitudes de variations d'humidité relative intérieure enregistrées pendant la période de mesure se situent dans les valeurs jugées acceptables pour un confort des occupants. En effet, l'humidité relative en été se situe entre 45 et 63% tandis qu'au printemps des valeurs comprises entre 28% et 62% d'humidité relative ont été enregistrées, avec une moyenne de 41%. Concernant la température intérieure, les valeurs estivales sont acceptables car aucune température supérieure à 26°C n'a été enregistrée dans le séjour. Par contre, les faibles valeurs de température enregistrées pendant le printemps correspondent à des périodes de non occupation du chalet.

Pour la maison en panneaux contrecollés massifs, le niveau d'humidité relative intérieure enregistrée en hiver est satisfaisant pour le confort de l'occupant : les valeurs varient entre 40 et 60%. Pour la période estivale, nous avons enregistré des périodes de forte humidité relative (supérieure à 70%), avec un maximum de 74,8% dans le séjour. La Figure 90 montre des variations d'humidité relative en été beaucoup plus importantes que pour le cas du chalet en rondins durant la même période. La température estivale est également plus importante dans la maison comparée aux valeurs mesurées dans le chalet en rondins. Soulignons que les deux bâtiments sont implantés sur des sites différents : l'un en montagne et protégé par la forêt et l'autre en pleine ville. Les conditions climatiques des deux sites sont également différentes. Dans le paragraphe suivant, nous proposons une analyse de la température et de l'humidité intérieures dans les deux bâtiments.

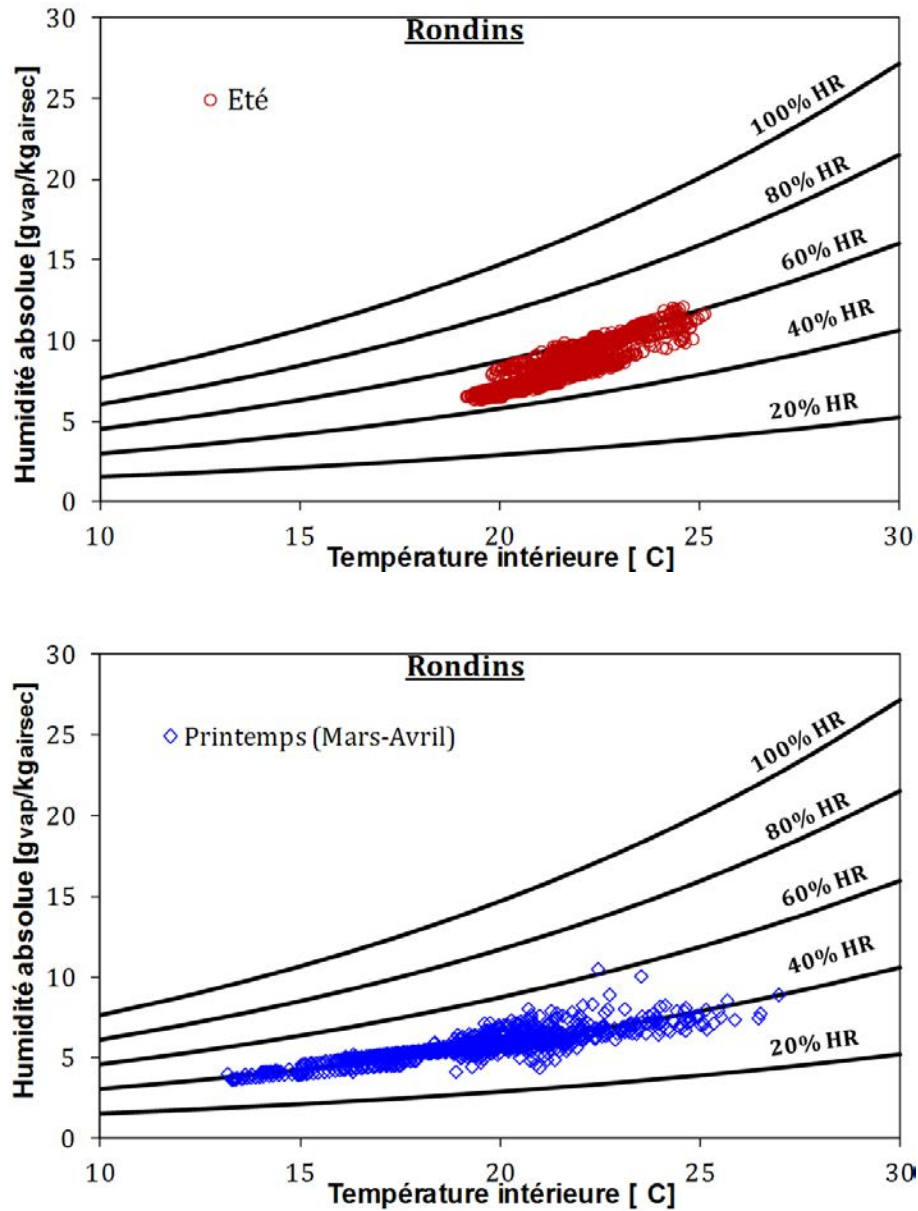


Figure 89. Température et humidité intérieures mesurées dans le séjour du chalet en rondins en été au printemps

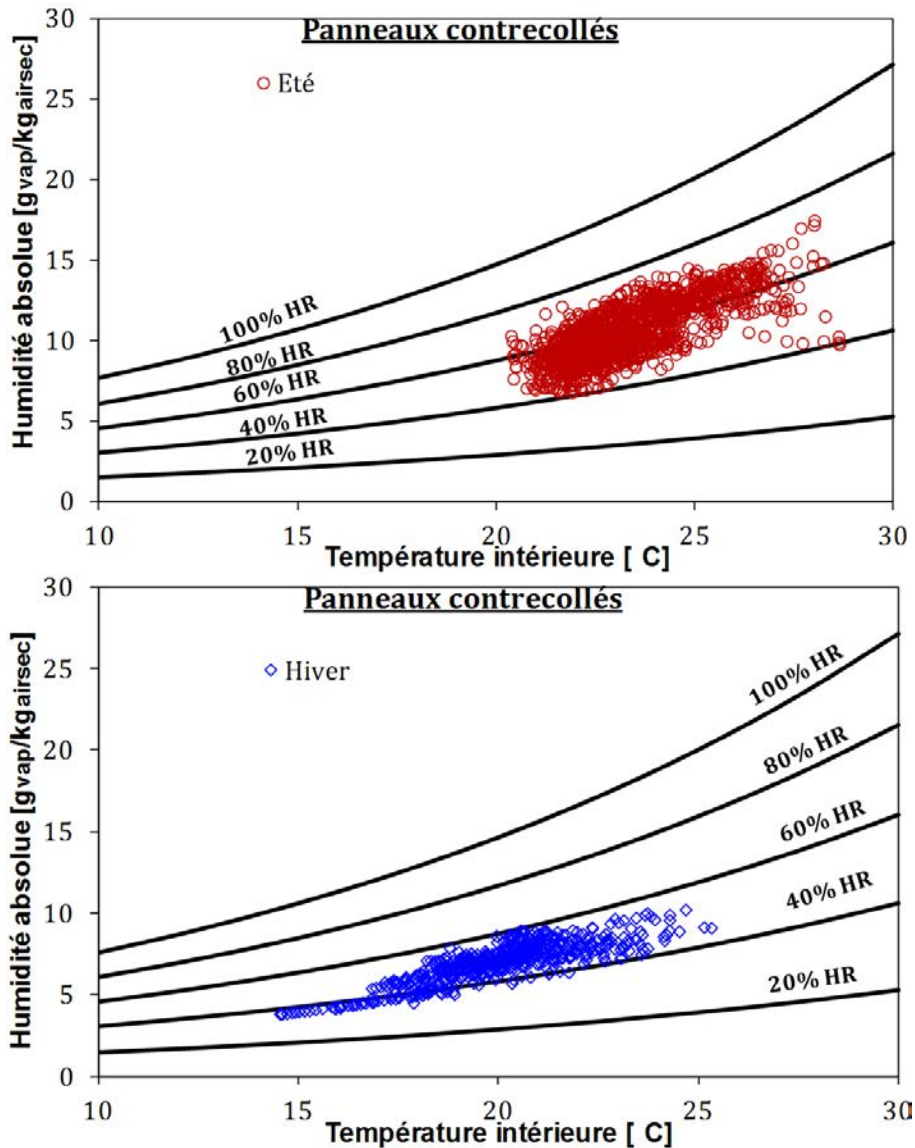


Figure 90. Température et humidité intérieures mesurées dans le séjour de la maison en panneaux contrecollés en été et en hiver

IV.3.1. Analyse de la température intérieure des bâtiments

Les variations de température sont globalement acceptables dans le chalet en rondins et la maison en panneaux contrecollés. Les résultats de la Figure 91 montrent un bon comportement thermique du chalet en été : la température intérieure reste confortable, avec une moyenne se situant autour de 21°C plus du tiers du temps. La température maximale atteinte est de 26°C dans la chambre et 25°C dans le séjour. Selon la Figure 92 qui donne la fréquence de température dans la maison en panneaux contrecollés, la température dans la maison en panneaux contrecollés est plus élevée par rapport à celle enregistrée dans le chalet en rondins, avec une moyenne de 23°C aussi bien dans le séjour que dans la chambre. L'intérieur de la maison en panneaux contrecollés est à une température supérieure à 26°C pendant en moyenne 5% du temps pour le séjour et 7% du temps pour la chambre. Le reste du temps, la température est comprise dans l'intervalle de confort.

Les résultats de la Figure 93 qui donnent l'évolution des températures intérieure et extérieure ainsi que de celle de l'air insufflé dans les pièces et entrant dans le caisson du système de ventilation mécanique contrôlée montrent que les valeurs des pics de température d'air insufflé dans les pièces sont proches de la température extérieure. Le fonctionnement de la ventilation mécanique semble donc accélérer la répercussion de la température chaude extérieure à l'intérieur de la maison et serait à l'origine des températures élevées enregistrées dans la maison pendant les périodes de forte chaleur. La bonne isolation de la maison et le déphasage thermique importants assurés par l'isolant en ouate de cellulose et le bois massif contrecollé ont donc une influence moins importante sur la température intérieure lorsqu'une ventilation contrôlée est en fonctionnement en période de forte chaleur.

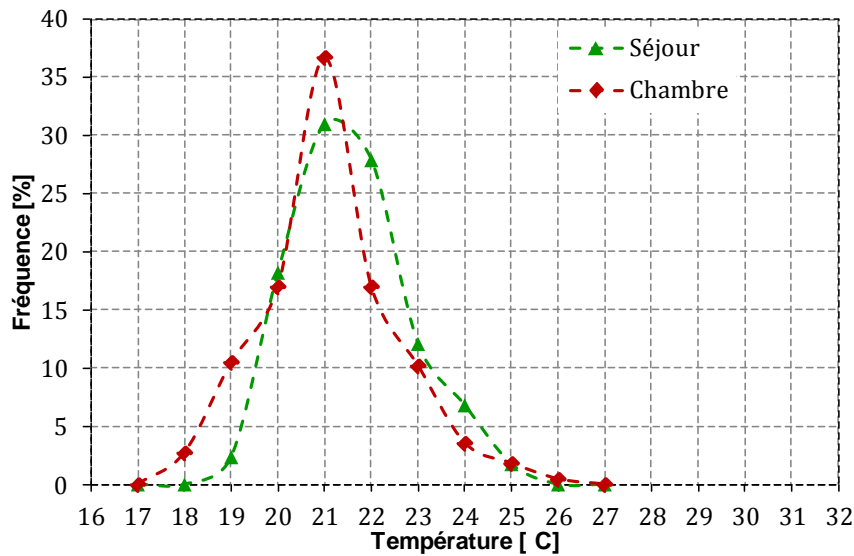


Figure 91. Fréquence de la température dans le séjour et la chambre du chalet en rondins en été

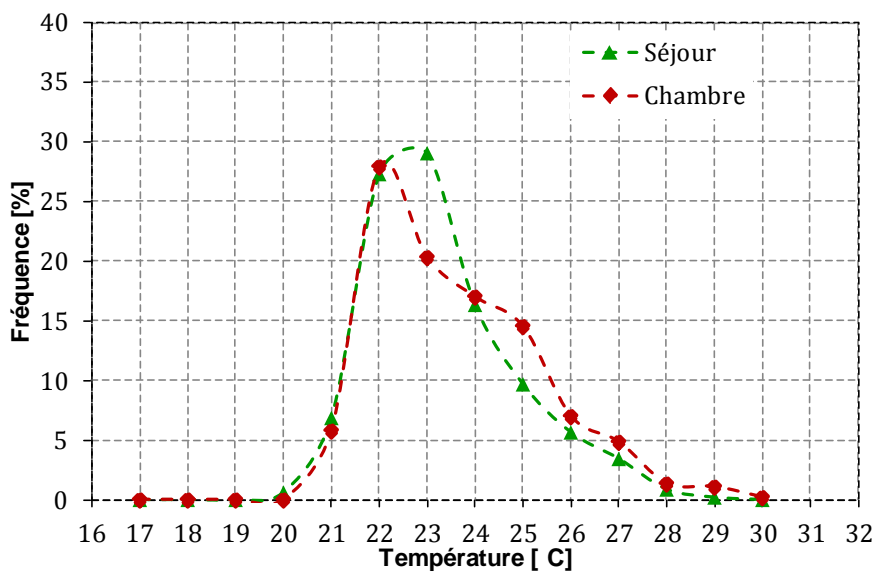


Figure 92. Fréquence de la température dans le séjour et la chambre de la maison en panneaux contrecollés en été

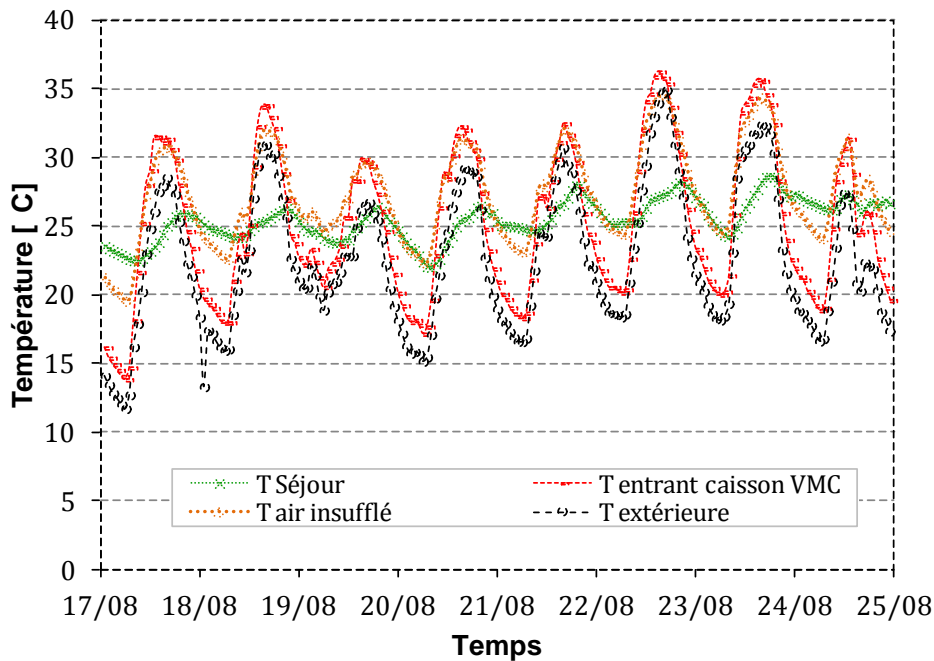


Figure 93. Evolution des températures intérieure, extérieure et au niveau de la ventilation de la maison en panneaux contrecollés

La Figure 94 donne l'évolution des profils de température dans la paroi en rondins orientée sud dans le chalet pendant une semaine chaude, les distances sont mesurées depuis la surface intérieure de la paroi. Pendant la semaine considérée où la température extérieure est montée à 31°C, l'évolution du profil de température dans le mur en rondins montre une bonne capacité d'isolation du mur. Un déphasage important des ondes de chaleur extérieures est par ailleurs observé : les pics de température extérieure se répercutent à l'intérieur du chalet presque une journée après leur occurrence, au moment de la forte chaleur du lendemain. Ce comportement de la paroi n'est cependant pas très gênant étant donné que la température intérieure reste à une valeur acceptable (25 °C). Ce déphasage important des rondins massifs a également été mis en évidence lors des essais réalisés sur une paroi en rondins, rapportés dans le chapitre précédent. Par ailleurs, les fortes variations de température extérieure ne se ressentent que très peu à l'intérieur du chalet : l'amplitude de variation de température intérieure est de 1°C en moyenne contre 12°C pour l'extérieur. Ce comportement peut être expliqué sur la Figure 94 où les ondes de chaleur sont amorties par le bois massif à mesure qu'elles pénètrent dans la paroi.

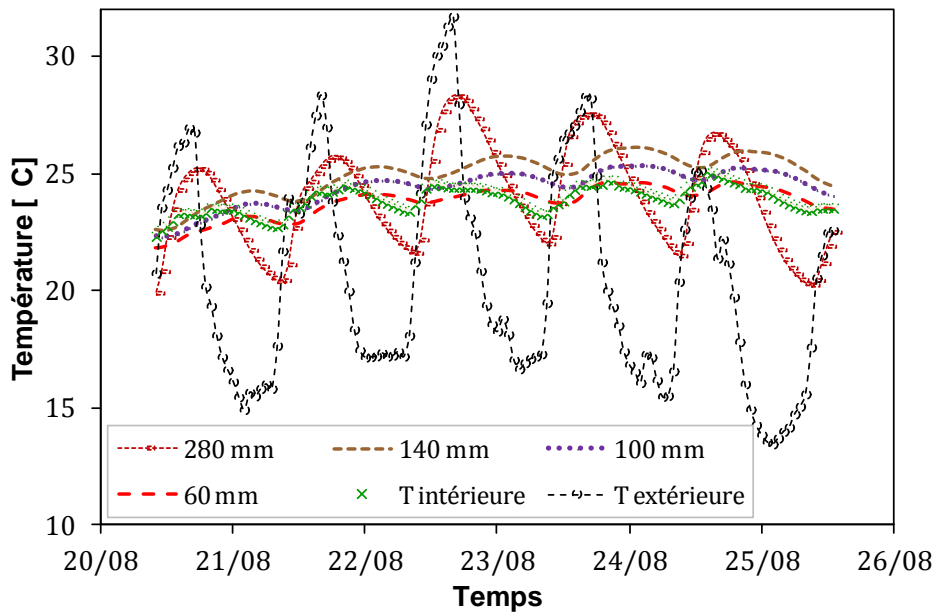


Figure 94. Evolution du profil de température dans la paroi en rondins en été

IV.3.2. Analyse de l'humidité intérieure des bâtiments

La Figure 95 et la Figure 96 donnent la fréquence d'humidité relative en été dans le séjour et la chambre du chalet en rondins et de la maison en panneaux contrecollés respectivement. L'humidité relative mesurée dans les chambres des deux bâtiments est assez élevée en été puisqu'elle est en moyenne de 60%, avec des valeurs supérieures ou égales à 65% près de 30% du temps dans le chalet et 25% du temps dans la maison. Par contre, dans le séjour du chalet en rondins, l'humidité relative reste dans la gamme acceptable entre 30 et 60% pendant la durée des mesures en été tandis que le séjour de la maison est presque aussi humide que la chambre.

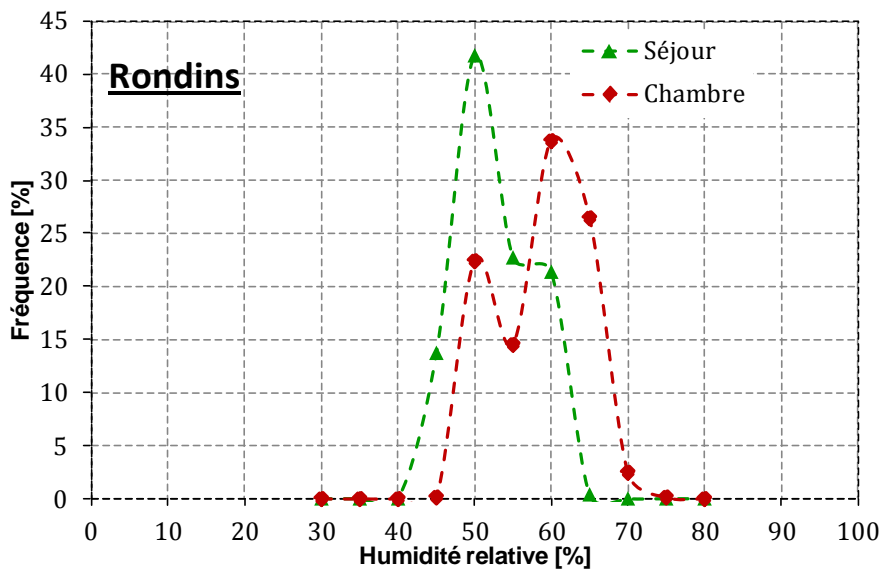


Figure 95. Fréquence de l'humidité relative dans le séjour et la chambre du chalet en rondins en été

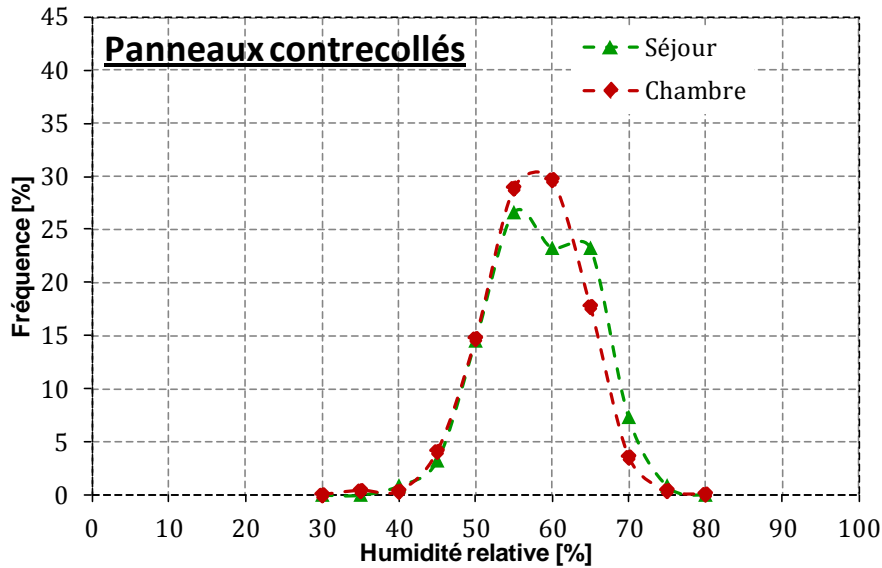


Figure 96. Fréquence de l'humidité relative dans le séjour et la chambre de la maison en panneaux contrecollés en été

La Figure 97 donne l'évolution de l'humidité absolue de l'air extérieur et intérieur de la maison en panneaux contrecollés pendant une semaine particulièrement humide en extérieur où l'humidité absolue de l'air est entre 8 et 17 g_{vap}/kg_{airsec} . Nous pouvons observer que l'humidité absolue mesurée dans le séjour et la chambre est du même ordre de grandeur que celle de l'air extérieur. La ventilation mécanique répercute donc l'humidité de l'air extérieur à l'intérieur de la maison, ce qui explique l'humidité élevée de l'air observée dans la maison. De nombreuses études ont montré la capacité des matériaux hygroscopiques à tamponner les variations d'humidité relative intérieure (Hameury et Lundstrom, 2004, Hameury, 2005, Kunzel, 2004, Woloszyn et al, 2009). Dans le cas de la maison avec parement intérieur en bois massif contrecollé, on remarque une fluctuation de l'humidité relative intérieure de 10% en moyenne pendant la période considérée (Figure 98). Ces variations d'humidité sont plus faibles que celles mesurées par Hameury et Lundstrom (2004) dans une maison avec parement intérieur en bois massif également, où des fluctuations de l'humidité relative entre 40 et 60% ont été enregistrées. L'humidité relative enregistrée dans la maison est cependant plus élevée (en moyenne entre 60-70%).

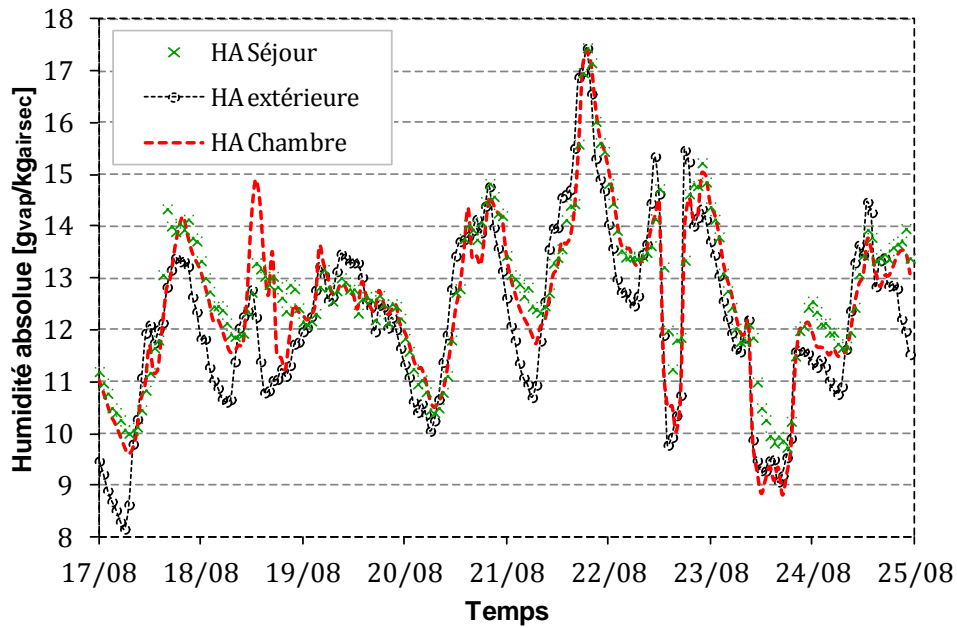


Figure 97. Evolution de l'humidité absolue intérieure et extérieure de la maison en panneaux contrecollés

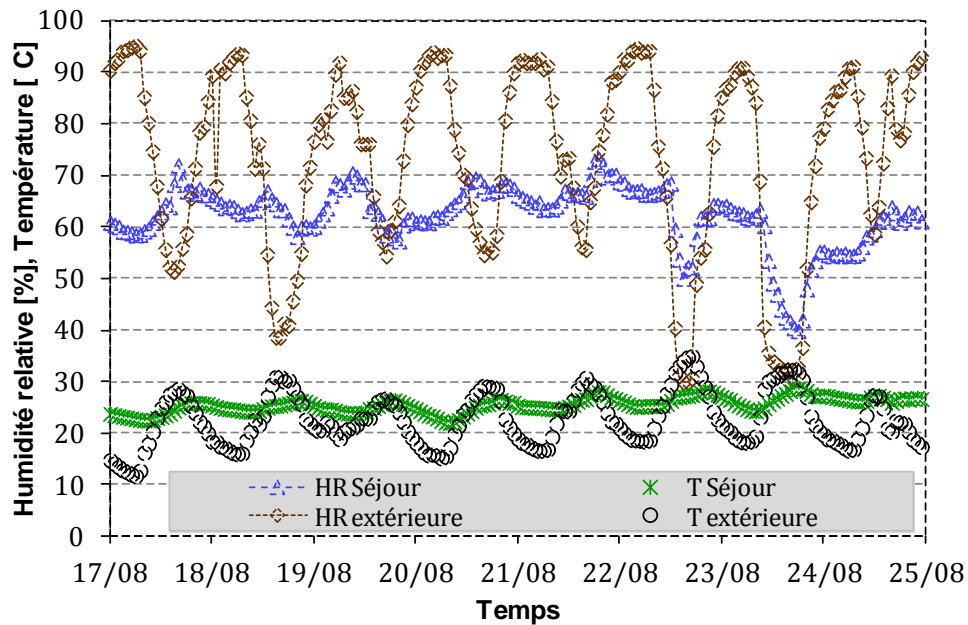


Figure 98. Humidité relative et température intérieures et extérieures de la maison en panneaux contrecollés

La Figure 99 montre l'évolution de l'humidité absolue extérieure et intérieure au chalet en rondins, ainsi que l'humidité absolue de l'air autour du capteur installé à 10 mm de la surface intérieure de la paroi en rondins, pendant la même période d'été considérée précédemment pour la maison en panneaux contrecollés. Contrairement au cas de la maison, la valeur d'humidité absolue de l'air intérieure est la plupart du temps éloignée de celle de l'air extérieur et les variations d'humidité sont plus faibles.

Sur la Figure 100, pour une semaine où la température extérieure varie fortement et où les amplitudes de variations d'humidité absolue de l'air extérieur sont également élevées, nous pouvons observer de très faibles variations de l'humidité relative dans le séjour.

Rappelons que le parement intérieur du séjour où les mesures ont été réalisées est en rondins massifs. La Figure 101 montre que l'humidité absolue de l'air intérieur varie proportionnellement avec la température : lorsque la température varie, le bois massif se met en équilibre hygroscopique avec l'air environnant ce qui crée un effet tampon sur la variation d'humidité de l'air expliquant la faible variation d'humidité relative. Ceci est conforté par l'humidité absolue de l'air mesurée autour du capteur situé à 10 mm de la surface intérieure de la paroi, comme illustrée sur la Figure 99. La valeur et l'évolution de l'humidité absolue de l'air à cet endroit sont proches de celles de l'air ambiant, ce qui pourrait se traduire par la mise en équilibre hydrique de l'air entourant le capteur avec le matériau. Par ailleurs, l'influence du renouvellement d'air sur l'humidité ambiante est assez faible car les résultats de la Figure 99 montrent que les valeurs d'humidité absolue de l'air intérieur sont éloignées de celle de l'air extérieur.

Le comparatif entre le comportement en humidité du chalet et de la maison, dont le premier est en ventilation naturelle et le second possède une ventilation mécanique contrôlée, montre une variation d'humidité plus élevée dans la maison avec ventilation mécanique. Ces résultats concordent avec les travaux de Simonson et al (2004) qui ont montré que l'effet de l'hygroscopicité du parement intérieur sur la régulation de l'humidité ambiante est plus perceptible lorsque le renouvellement d'air du bâtiment est faible.

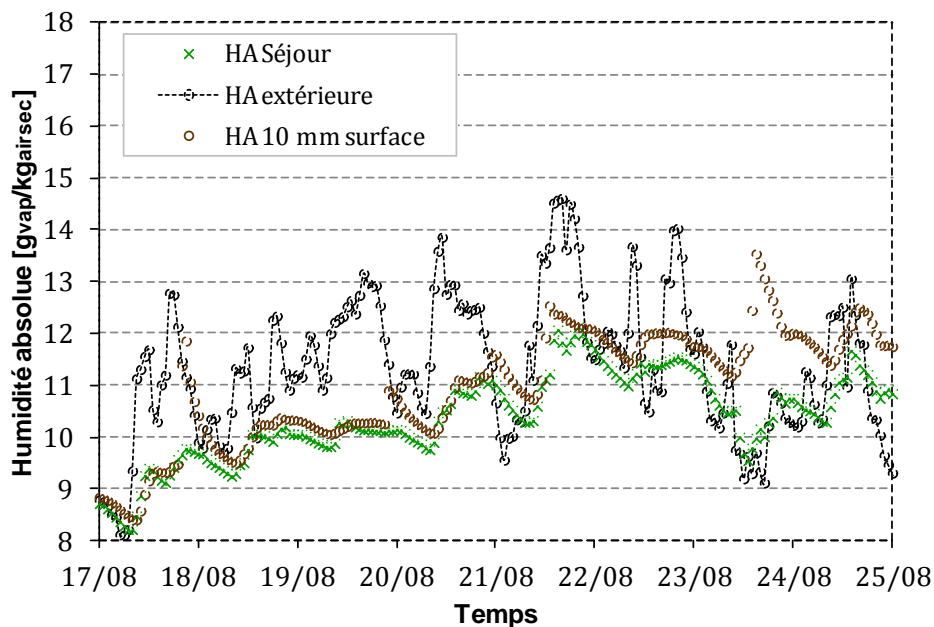


Figure 99. Evolution de l'humidité absolue (extérieure, intérieure et paroi) du chalet en rondins

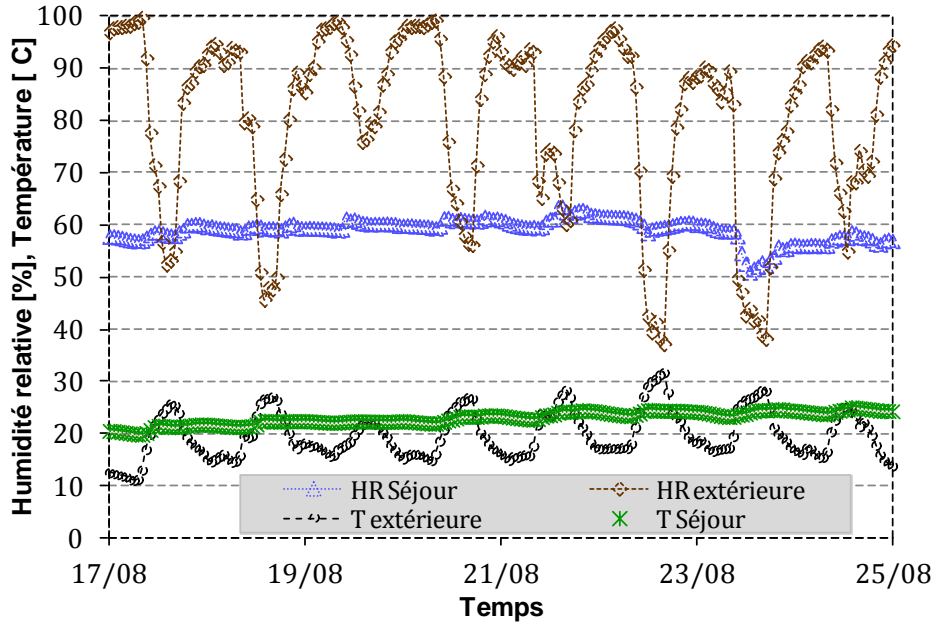


Figure 100. Evolution de l'humidité relative et de la température (extérieures et intérieures) du chalet en rondins

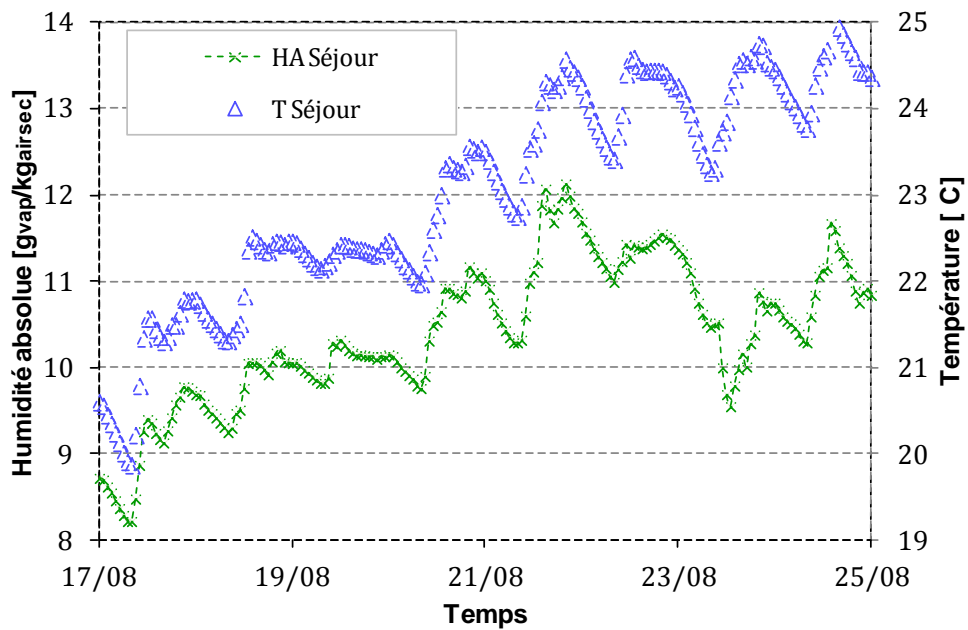


Figure 101. Evolution de la température et de l'humidité absolue intérieures du chalet en rondins

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, l'instrumentation mise en place sur plusieurs bâtiments a été présentée. L'ensemble de la métrologie développée pour les bâtiments permet de mesurer les sollicitations climatiques du bâtiment, la température et l'humidité ambiantes intérieures, les consommations des différents systèmes (chauffage, ventilation et production d'eau chaude sanitaire) et l'évolution des profils de température dans les parois. Les données expérimentales obtenues seront utilisées ultérieurement pour valider le code numérique développé dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS et permettant de simuler les transferts couplés chaleur-masse à l'échelle de l'enveloppe. Les paramètres mesurés sur les bâtiments instrumentés permettront entre autres de confronter la prédiction des modèles avec les mesures des besoins en chauffage, de la température et de l'humidité intérieure ainsi que des profils de température et de teneur en eau en fonction des sollicitations climatiques réelles mesurées sur les sites. Les premiers résultats obtenus nous ont permis d'observer le niveau de confort thermique et hydrique intérieur des bâtiments instrumentés.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail inscrit dans le projet TRANSBATIBOIS, nous avons conçu et construit un dispositif expérimental permettant de caractériser les transferts de chaleur et d'humidité au sein d'une paroi. L'équipement de contrôle de température et d'humidité installé dans le dispositif permet d'imposer des conditions stationnaires ou dynamiques aux parois. Le comportement hygrothermique des parois en réponse à ces sollicitations est caractérisé grâce à une mesure de l'évolution temporelle des profils de température et d'humidité dans les différentes couches des parois-test.

Le code numérique BuildingPore a été développé par l'équipe 3B (Bois Biomatériaux Biomasse) du LERFOB au cours du projet TRANSBATIBOIS. Dans une démarche de validation de ce code numérique, des essais de caractérisation des transferts couplés chaleur-masse au sein de différentes compositions de parois ont été réalisés dans des conditions hygrothermiques stationnaires et oscillantes. Afin de faciliter l'analyse des transferts couplés dans les parois multicouches, nous avons choisi de tester des compositions de parois avec une complexité croissante.

Les résultats de confrontation entre mesures et simulations ont montré l'importance de prendre en compte dans les modèles numériques l'hystérésis de l'isotherme de sorption ainsi que sa dépendance avec la température. En effet, la comparaison mesures/simulation a montré que la version actuelle de BuildingPore, qui prend en compte les paramètres cités précédemment, permet de reproduire correctement la cinétique des transferts chaleur-masse mesurés au sein des parois et d'avoir des amplitudes de variation d'humidité proches de celles mesurées. Par contre, lorsque ces paramètres de l'isotherme de sorption ne sont pas pris en compte, ce qui est souvent le cas dans la plupart des logiciels existants, les résultats numériques sont plus éloignés de ceux obtenus expérimentalement.

Dans l'ensemble des confrontations, les résultats ont également montré une très bonne capacité de BuildingPore à prédire l'évolution spatio-temporelle de la température dans les différents matériaux composant les parois-test.

Les résultats comparatifs des profils d'humidité se sont également avérés satisfaisants. En conditions hivernales moyennées et stationnaires, les profils numériques d'humidité dans les isolants hygroscopiques sont également proches des mesures, montrant la capacité de BuildingPore à reproduire les transferts couplés chaleur-masse dans les matériaux hygroscopiques. La réponse des parois aux conditions oscillantes en intersaison a par ailleurs montré que la simulation donnait des amplitudes de variations d'humidité légèrement plus faibles et déphasées comparées aux valeurs mesurées. Pour le bois massif, une différence allant jusqu'à 5 % a été observée entre les valeurs numériques et expérimentales d'humidité relative à 10 mm de la surface du matériau. La réponse des parois aux conditions oscillantes a également montré des amplitudes de variation d'humidité prédites par le code plus faibles que les mesures. La phase de confrontation a donc montré une dynamique des transferts d'humidité mesurés dans les matériaux hygroscopiques plus rapide que la prédiction du code

BuildingPore. La variabilité intra et interspécifique des propriétés du bois pourrait être en partie à l'origine de cet écart de comportement observé entre la mesure et la simulation.

Pour les mêmes essais de validation de BuildingPore, un comparatif des mesures avec la prédiction du logiciel commercial WUFI (Fraunhofer IBP) a également été réalisé. Le logiciel reproduit correctement les transferts de chaleur dans la paroi. Les profils d'humidité calculés lorsque les parois sont soumises aux conditions hivernales montrent une différence plus importante avec les mesures comparée à la prédiction du code numérique BuildingPore. Lors des essais en conditions oscillantes, les transferts d'humidité prédits par WUFI présentent également une cinétique plus lente comparée à celle mesurée.

En résumé, les essais et travaux de validation de BuildingPore développés dans le cadre du projet TRANSBATIBOIS ont montré la capacité de ce code à prédire les transferts couplés chaleur-masse dans les parois comportant des matériaux hygroscopiques. En effet, les tendances observées au niveau des transferts couplés chaleur-masse simulés avec BuildingPore semblent corrélées avec les mesures. Les confrontations ont également permis de comparer ce code aux capacités de prédiction d'un logiciel commercial déjà validé. Les résultats ont mis en évidence des profils d'humidité calculés par BuildingPore plus proches de l'expérimental comparé aux profils obtenus avec WUFI.

Le comportement thermique en régimes permanent et transitoire de parois représentatives des systèmes constructifs bois les plus courants a également été caractérisé au cours d'une autre campagne expérimentale. Cette campagne a permis de mesurer des propriétés thermiques comme le déphasage thermique et l'amortissement pour les échantillons testés. Les résultats obtenus permettront aux constructeurs partenaires du projet TRANSBATIBOIS de disposer de données mesurées des propriétés thermiques des compositions de parois et des matériaux qu'ils ont proposés. Dans le cas du déphasage thermique des isolants testés, nous avons observé un écart entre les valeurs mesurées et celles estimées par le calcul. Cet écart est d'autant plus important que le matériau est peu dense. Une hypothèse d'un éventuel effet de la convection pouvant expliquer cet écart a été proposée. Cette campagne d'essai a également permis de mettre en évidence l'importance du processus de sorption/désorption induit par une variation de température au sein d'un matériau hygroscopique.

Dans ce travail, des modules-test ont également été construits afin de caractériser les transferts couplés chaleur-masse à l'échelle de l'enveloppe. Le concept présenté est assez particulier car il permet d'établir un comparatif du comportement en température et en humidité de différents systèmes constructifs soumis aux mêmes sollicitations climatiques. En effet, cinq modules avec des parois verticales représentant différents systèmes constructifs bois ont été construits sur un même site (ENSTIB, Epinal). Les systèmes constructifs étudiés sont l'ossature bois, les madriers empilés et les panneaux contrecollés massifs. Les matériaux composant les parois sont également différents d'un module à un autre, ce qui permet d'avoir une représentativité et un suivi du comportement des différents matériaux de construction. La métrologie mise en place permet de suivre, l'évolution des profils de température et d'humidité au sein des parois verticales, et des caractéristiques de l'air ambiant intérieur, en

réponse aux sollicitations extérieures et aux scénarios internes reproduits. Les flux de chaleur et de masse traversant les enveloppes sont également mesurés.

Les mesures réalisées ont apporté des informations concernant l'interaction entre l'enveloppe et le volume d'air intérieur des modules. Les caractéristiques hygrothermiques du volume d'air intérieur en réponse aux productions internes, dépendent du type de parement intérieur mais également de la dynamique des transferts chaleur-masse à l'intérieur des parois.

L'influence des matériaux sur les risques liés aux problèmes d'humidité dans les parois a également été abordée dans cette étude. Nous avons ainsi observé la contribution de la lame d'air ventilée dans le séchage de la paroi. Par ailleurs, le comportement hygroscopique des matériaux permet d'atténuer les augmentations d'humidité interne aux parois et de limiter les risques de condensation ou de développement de moisissures.

Dans une perspective de validation d'un modèle numérique de simulation des transferts couplés chaleur-masse à l'échelle du bâtiment, nous avons réalisé une campagne expérimentale d'instrumentation de quelques bâtiments. La métrologie mise en place permet d'obtenir des données expérimentales permettant de connaître les sollicitations climatiques des bâtiments, les conditions intérieures en température et en humidité, les consommations des différents systèmes (chauffage, ventilation et production d'eau chaude sanitaire) et l'évolution des profils de température dans les parois. L'objectif est à terme d'utiliser ces données dans un travail de confrontation et de validation d'un modèle des transferts couplés chaleur-masse à l'échelle du bâtiment.

Pour conclure, ce travail, au travers des résultats des campagnes expérimentales, a permis de valider le potentiel prédictif du code BuildingPore. Cette première étape de validation a contribué à mettre en évidence l'importance de paramètres tels que l'hystérésis de l'isotherme de sorption et la dépendance de cette isotherme avec la température. Compte tenu des résultats de confrontation sur les transferts d'humidité, il serait intéressant, afin d'améliorer la compréhension des phénomènes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les parois, de mener des investigations plus approfondies sur l'influence d'autres paramètres pouvant être à l'origine des écarts observés entre les profils d'humidité mesurés et calculés avec BuildingPore et WUFI. Nous disposons actuellement de données mesurées sur les propriétés thermiques de plusieurs matériaux et parois de différents systèmes constructifs. Ces données pourraient être utilisées pour des études plus poussées permettant d'identifier la cause de l'écart observé entre les valeurs de propriétés thermiques mesurées et calculées. A l'échelle de l'enveloppe, les dispositifs expérimentaux construits et le panel de bâtiments instrumentés nous permettent aujourd'hui de disposer de données expérimentales sur les transferts couplés à l'échelle de l'enveloppe. La suite logique de cette étude est l'utilisation de ces données dans une démarche de validation de modèles numériques permettant de simuler les transferts chaleur-masse à l'échelle de l'enveloppe.

Dans la continuité des différents projets de recherche traitant des transferts couplés chaleur-masse à l'échelle de la paroi et du bâtiment, un projet ANR nommé HYGRO-BAT regroupant deux industriels et les principaux laboratoires français travaillant sur la problématique des

transferts de chaleur et d'humidité dans la construction, dont le LERMAB, a été mis en place. Ce projet, conduit de janvier 2011 à fin 2014, a pour objectif la mise au point d'une méthodologie de conception hygrothermique des bâtiments. La démarche adoptée consiste à fiabiliser les outils numériques existants en menant une approche « benchmark » expérimentale et numérique. Dans le projet HYGRO-BAT, les installations expérimentales à l'échelle de la paroi et de l'enveloppe mises en place dans le cadre de ce travail seront utilisées pour mener des essais dont les résultats seront utilisés dans un travail de confrontation des mesures avec la prédiction de plusieurs codes numériques.

Références

- ALTURKISTANI, A., FAZIO, P., RAO, J. & MAO, Q. 2008. A new test method to determine the relative drying capacity of building envelope panels of various configurations. *Building and Environment*, 43, 2203-2215.
- ASAN, H. 1998. Effects of Wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 28, 299-305.
- ASAN, H. 2006. Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. *Building and Environment*, 41, 615-620.
- ASAN, H. & SANCAKTAR, Y. S. 1998. Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 28, 159-166.
- BELARBI, R., QIN, M., AIT-MOKHTAR, A. & NILSSON, L.-O. 2008. Experimental and theoretical investigation of non-isothermal transfer in hygroscopic building materials. *Building and Environment*, 43, 2154-2162.
- BRAGER, G. S. & DE DEAR, R. 2000. A standard for natural ventilation. *Ashrae Journal*, 42, 21-+.
- BRAHAMI, Z., VIRGONE, J. & KUZNIK, F. Adaptation du montage boîte chaude gardée à l'étude du comportement thermique dynamique de parois de bâtiment. 13èmes Journées Internationales de Thermique, Albi, France, 2007.
- CHARLES, K. E. 2003. Fanger's Thermal Comfort and Draught Models. NRC - CNRC (Conseil National de Recherche Canada) disponible sur le site <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.
- CORGNATI, S. P., FILIPPI, M. & VIAZZO, S. 2007. Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort. *Building and Environment*, 42, 951-959.
- DEROME, D., CARMELIET, J. & KARAGIOZIS, A. 2009. Evaluation de l'importance de forts gradients hygrothermiques vers l'intérieur sur le comportement d'assemblage de murs. Lille.
- 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, 1038-1046.
- EN8990 1996. NF EN ISO 8990, Isolation thermique – Détermination des propriétés de transmission thermique en régime stationnaire. Méthodes à la boîte chaude gardée et calibrée.
- EN10211 2008. NF EN ISO 10211, Ponts thermiques dans les bâtiments - Flux thermiques et températures superficielles - Calculs détaillés.
- EN 13829 2001. NF EN 13829, Performance thermique des bâtiments – Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments, Méthode de pressurisation par ventilateur.

- FANG, L., CLAUSEN, G. & FANGER, P. O. 1998. Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. *Indoor Air-International Journal of Indoor Air Quality and Climate*, 8, 80-90.
- FANG, Y. P., EAMES, P. C., NORTON, B. & HYDE, T. J. 2006. Experimental validation of a numerical model for heat transfer in vacuum glazing. *Solar Energy*, 80, 564-577.
- FANGER, P. O. & TOFTUM, J. 2002. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, 34, 533-536.
- FAURE, X. 2007. *Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique*. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- FAZIO, P., ATHIENITIS, A., MARSH, C. & RAO, J. 1993. Design and construction of an environmental chamber facility. *Technical Report, CBS-123*. Centre for building studies, Concordia University, Montréal Québec.
- FAZIO, P., ATHIENITIS, A. K., MARSH, C. & RAO, J. 1997. Environmental chamber for investigation of building envelope performance. *Journal of Architectural Engineering*, 3, 97-102.
- FRONTCZAK, M. & WARGOCKI, P. 2011. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46, 922-937.
- GE, H. & FAZIO, P. 2004. Experimental investigation of cold draft induced by two different types of glazing panels in metal curtain walls. *Building and Environment*, 39, 115-125.
- 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. *Report 273-2000*. BYGGFORSK, Norwegian Building Research Institute.
- GHAZI WAKILI, K. & TANNER, C. 2003. U-value of a dried wall made of perforated porous clay bricks - Hot box measurement versus numerical analysis. *Energy and Buildings*, 35, 675-680.
- GRUNEWALD, J., NICOLAI, A. & ZHANG, J. 2007. Modeling of air convection effects on hygrothermal performance of vented roofs. Rapport ASHRAE, disponible sur http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/220_New.pdf.
- HAMEURY, S. 2005. Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study. *Building and Environment*, 40, 1400-1412.
- HAMEURY, S. & LUNDSTROM, T. 2004. Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign. *Energy and Buildings*, 36, 281-292.
- HOLM, A. & LENGSELD, K. 2007. Moisture-Buffering Effect - Experimental Investigations and Validation. ASHRAE.
- HUANG, L., ZHU, Y., OUYANG, Q. & CAO, B. 2012. A study on the effects of thermal, luminous, and acoustic environments on indoor environmental comfort in offices. *Building and Environment*, 49, 304-309.

- HUKKA, A. & VIITANEN, H. A. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, 33, 475-485.
- JAMES, C., SIMONSON, C. J., TALUKDAR, P. & ROELS, S. 2010. Numerical and experimental data set for benchmarking hygroscopic buffering models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 3638-3654.
- 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, 665-674.
- KALAMEES, T., KORPI, M., VINHA, J. & KURNITSKI, J. 2009. The effects of ventilation systems and building fabric on the stability of indoor temperature and humidity in Finnish detached houses. *Building and environment*, 44, 1643-1650.
- KALAMEES, T. & VINHA, J. 2003. Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures. *Building and Environment*, 38, 689-697.
- KONTOLEON, K. J. & EUMORFOPOULOU, E. A. 2008. The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region. *Renewable Energy*, 33, 1652-1664.
- KOUCHADE, C. A. 2004. *Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire*. Thèse ENGREF, Nancy, France.
- KRUS, M. & KIESSL, K. 1998. Determination of the moisture storage characteristics of porous capillary active materials. *Materials and Structures*, 31, 522-529.
- KUNZEL, H. M., HOLM, A., SEDLBAUER, K., ANTRETTTER, F. & ELLINGER, M. 2004. Moisture buffering effect of interior linings made from wood or wood based products. *IBP Report HTB-04/2004/e*. Fraunhofer-Institute for Building Physics.
- KUNZEL, H. M. & KIESSL, K. 1997. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40, 159-167.
- KÜNZEL, H. M. 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components - One and two-dimensional calculation using simple parameters. Stuttgart IRB Verlag, Fraunhofer - Information centre for planning and building.
- LACARRIERE, B., TROMBE, A. & MONCHOUX, F. 2006. Experimental unsteady characterization of heat transfer in a multi-layer wall including air layers - Application to vertically perforated bricks. *Energy and Buildings*, 38, 232-237.
- LENGSFELD, K. & HOLM, A. 2007. Development and validation of the hygrothermal indoor climate simulation software WUFI (R)-Plus. *Bauphysik*, 29, 178-186.
- LI, Q., RAO, J. & FAZIO, P. 2009. Development of HAM tool for building envelope analysis. *Building and Environment*, 44, 1065-1073.
- MAO, Q., FAZIO, P. & RAO, J. 2009. In-cavity evaporation allowance-A drying capacity indicator for wood-frame wall system. *Building and Environment*, 44, 2418-2429.

- MAREF, W., BOOTH, D. G., LACASSE, M. & NICHOLLS, M. 2002. Drying Experiment of Wood-Frame Wall Assemblies Performed in the Climatic Chamber EEEF: Specification of Equipment Used in EEEF-Environmental Exposure Envelope Facility. CNRC (Conseil National de Recherche Canada).
- MAREF, W., LACASSE, M. A. & BOOTH, D. Large-scale laboratory measurements and benchmarking of an advanced hygrothermal model. CIB 2004 Conference, Toronto, Ontario., 2004. 1-10.
- MENDES, N., WINKELMANN, F. C., LAMBERTS, R. & PHILIPPI, P. C. 2003. Moisture effects on conduction loads. *Energy and Buildings*, 35, 631-644.
- NUSSBAUMER, T., GHAZI WAKILI, K. & TANNER, C. 2006. Experimental and numerical investigation of the thermal performance of a protected vacuum-insulation system applied to a concrete wall. *Applied Energy*, 83, 841-855.
- OSANYINTOLA, O. F. & SIMONSON, C. J. 2006. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. *Energy and Buildings*, 38, 1270-1282.
- OSANYINTOLA, O. F., TALUKDAR, P. & SIMONSON, C. J. 2006. Effect of initial conditions, boundary conditions and thickness on the moisture buffering capacity of spruce plywood. *Energy and Buildings*, 38, 1283-1292.
- PAVLIK, Z. & CERNY, R. 2008. Experimental assessment of hygrothermal performance of an interior thermal insulation system using a laboratory technique simulating on-site conditions. *Energy and Buildings*, 40, 673-678.
- PERRÉ, P. & DEGIOVANNI, A. 1990. Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 33, 2463-2478.
- PERRÉ, P. & TURNER, I. 1999. TransPore: A generic heat and mass transfer computational model for understanding and visualizing the drying of porous media. *Drying Technology*, 17, 1273-1290.
- 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.
- 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, 1322-1328.
- RAJI, S. 2006. *Caractérisation hygrothermique, par une approche multi échelle, de constructions en bois massif en vue d'amélioration énergétique et de valorisation environnementale*. Thèse, Université Bordeaux I.
- ROSE, J. & SVENDSEN, S. 2004. Validating Numerical Calculations against Guarded Hot Box Measurements. *Nordic Journal of Building Physics 2004*, 4.
- RÉMOND, R. & PERRÉ, P. Modélisation du Comportement Thermique d'une Maison Bois à

- l'Aide de Micromodèles Chaleur-Masse Distribués. *International Building Performance Simulation Association (IBPSA)-France*, 6-7 novembre 2008, 2008 Lyon.
- SIAU, J. F. 1984. *Transport process in wood*, Springer - Verlag New-York.
- SIMONSON, C. J., SALONVAARA, M. & OJANEN, T. 2004. Moderating Indoor Conditions with Hygroscopic Building Materials and Outdoor Ventilation. ASHRAE.
- TEASDALE-ST-HILAIRE, A. & DEROME, D. 2007. Comparison of experimental and numerical results of wood-frame wall assemblies wetted by simulated wind-driven rain infiltration. *Energy and Buildings*, 39, 1131-1139.
- THERM. disponible sur <http://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html> [Online].
- TOFTUM, J., JORGENSEN, A. S. & FANGER, P. O. 1998. Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort. *Energy and Buildings*, 28, 15-23.
- TRAORÉ, I. 2011. *Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois*. Thèse, Université Henri Poincaré, Nancy.
- TRNSYS. *TRNSYS—A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, 2012, www.trnsys.com* [Online]. 2012].
- ULGEN, K. 2002. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 34, 273-278.
- VERA, S., FAZIO, P. & RAO, J. Experimental set-up and initial results of moisture transport through horizontal openings. In: C. RODE, E., ed. Proceedings of the 8th Symposium on building physics in the nordic countries, (C. Rode, editor) , Report R-189, Dept. of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark., 2008. 393-400.
- VERA, S., FAZIO, P. & RAO, J. 2010. Interzonal air and moisture transport through large horizontal openings in a full-scale two-story test-hut: Part 1-Experimental study. *Building and Environment*, 45, 1192-1201.
- VINHA, J. 2007. *Hygrothermal performance of timber-framed external walls in Finnish climatic conditions : a method for determining the sufficient water vapour resistance of the interior lining of a wall assembly*. Thèse, Tampere University of technology, Finlande.
- 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, 515-524.

ANNEXE A : Résultats de confrontation avec BuildingPore sur les parois 2 et 3

Les figures suivantes illustrent la confrontation entre les mesures et les valeurs calculées par BuildingPore pour les expériences décrites dans le paragraphe II.3.2.1/étape 2. Les résultats qui suivent sont les compléments de la partie confrontation abordée dans le paragraphe II.4.1.1 d).

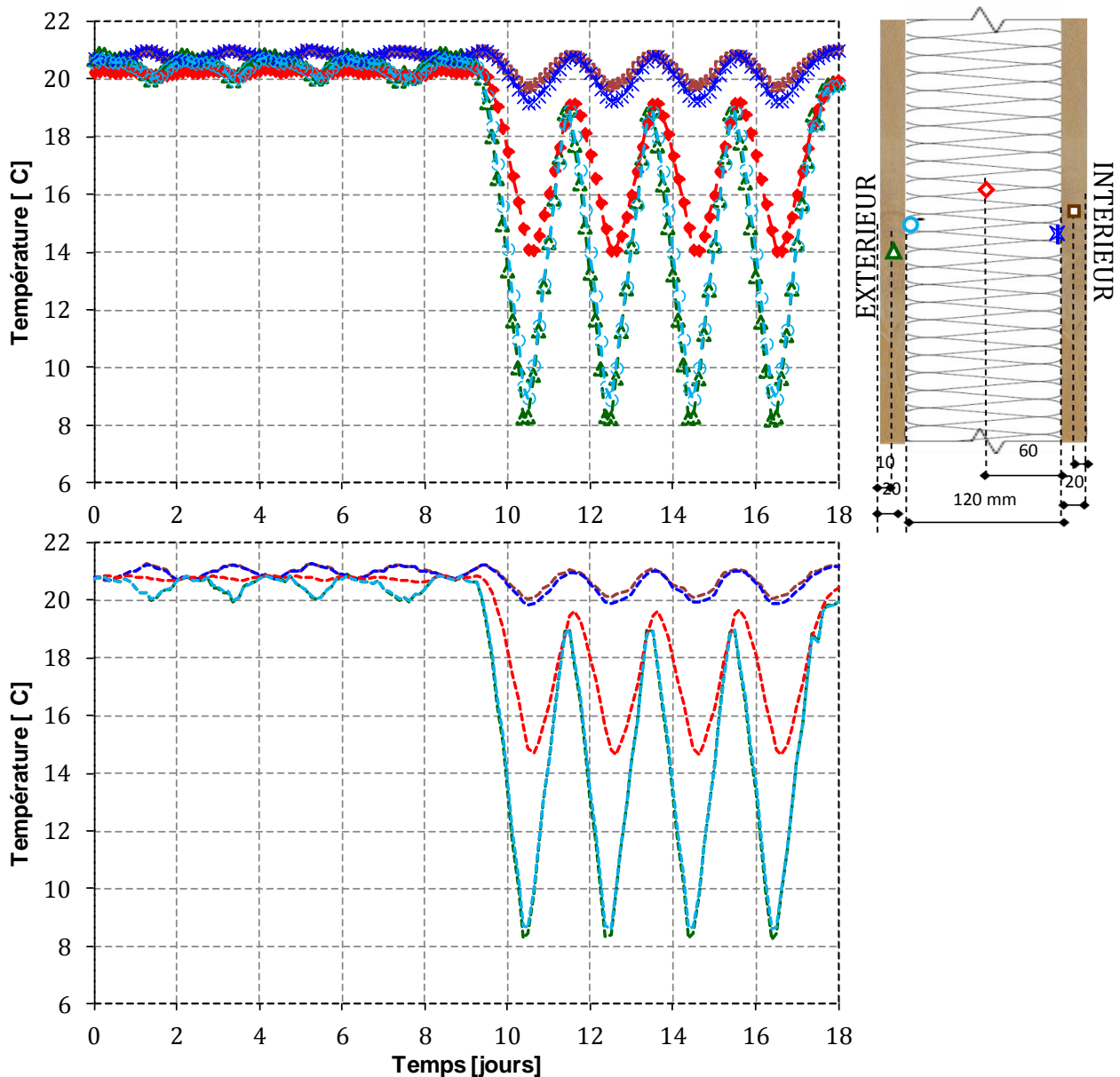


Figure A 1. Evolution de la température mesurée (a) et simulée (b) au sein de la paroi 2 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5

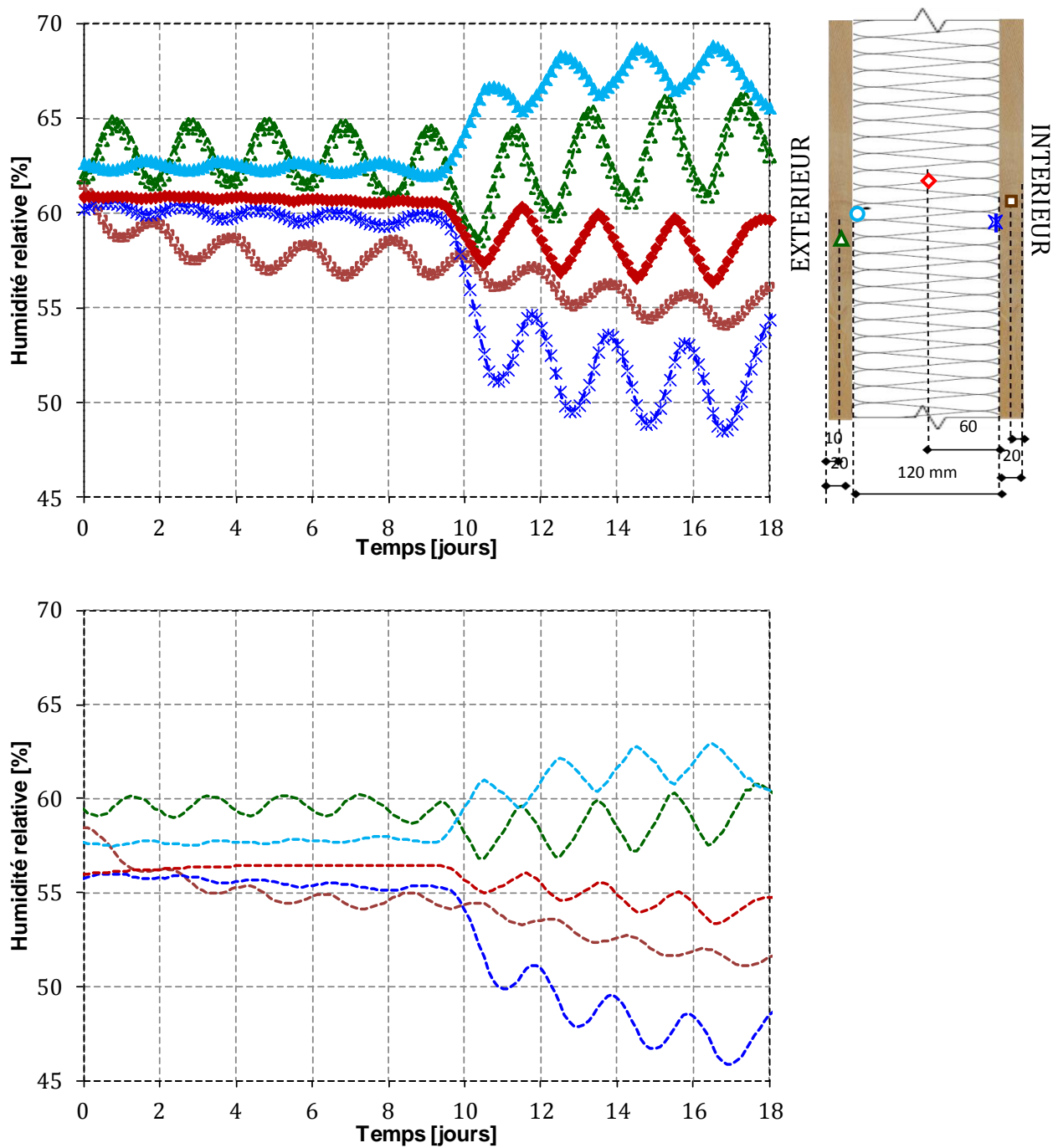


Figure A 2. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée (a) et simulée (b) au sein de la paroi 2 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5

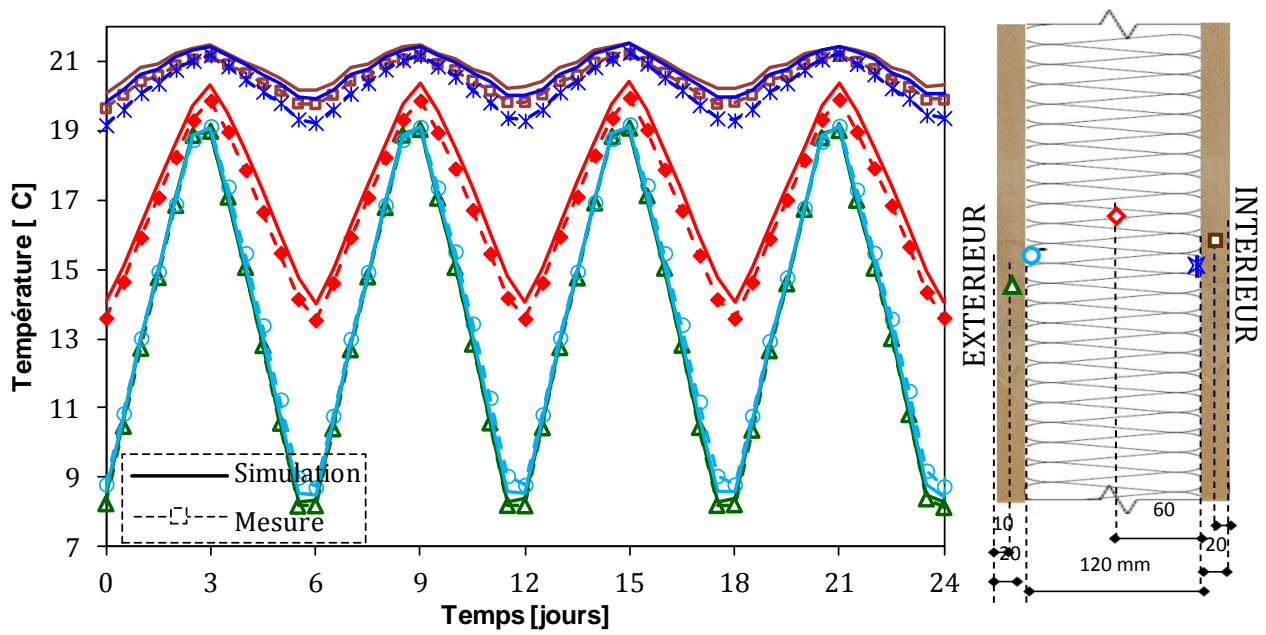


Figure A 3. Evolution de la température mesurée et simulée au sein de la paroi 2 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6

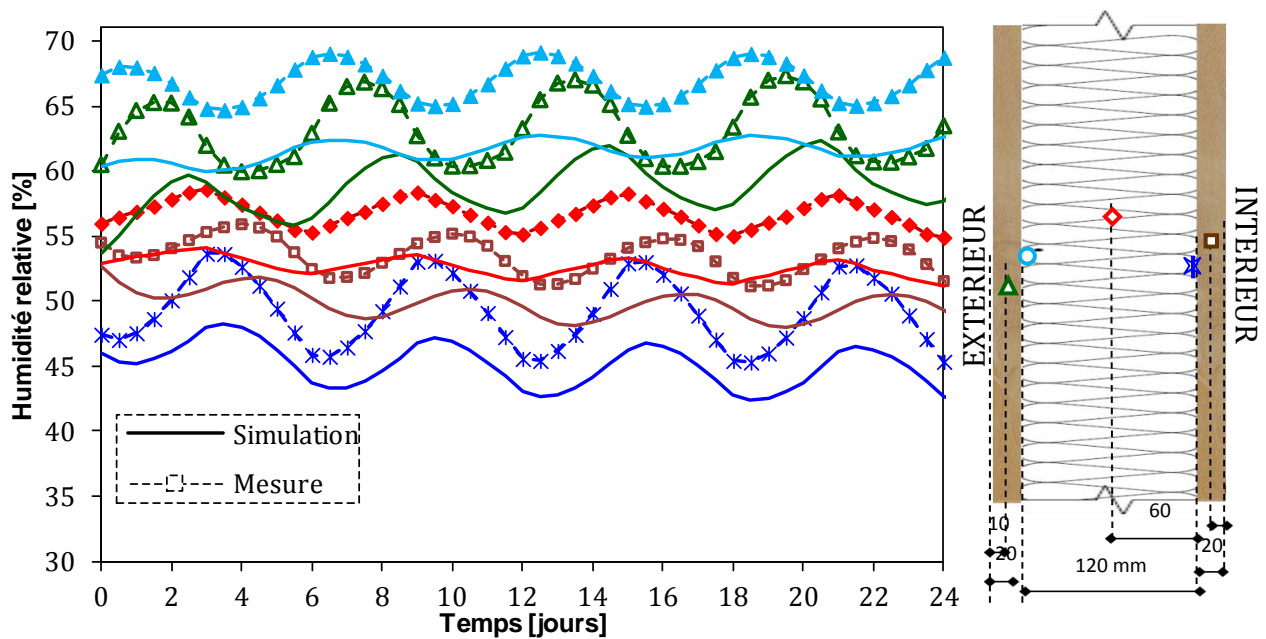


Figure A 4. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée et simulée au sein de la paroi 2 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6

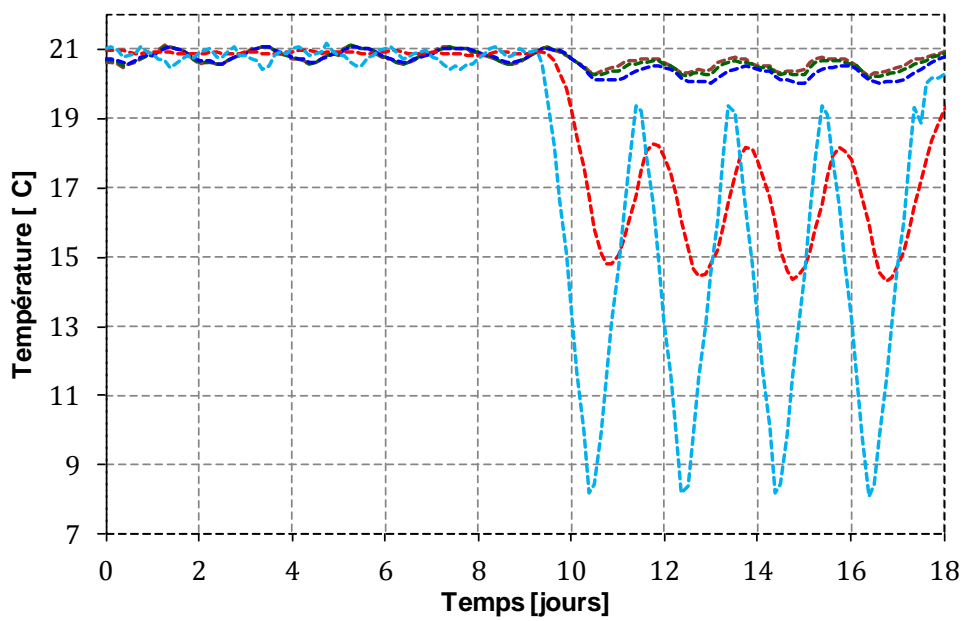
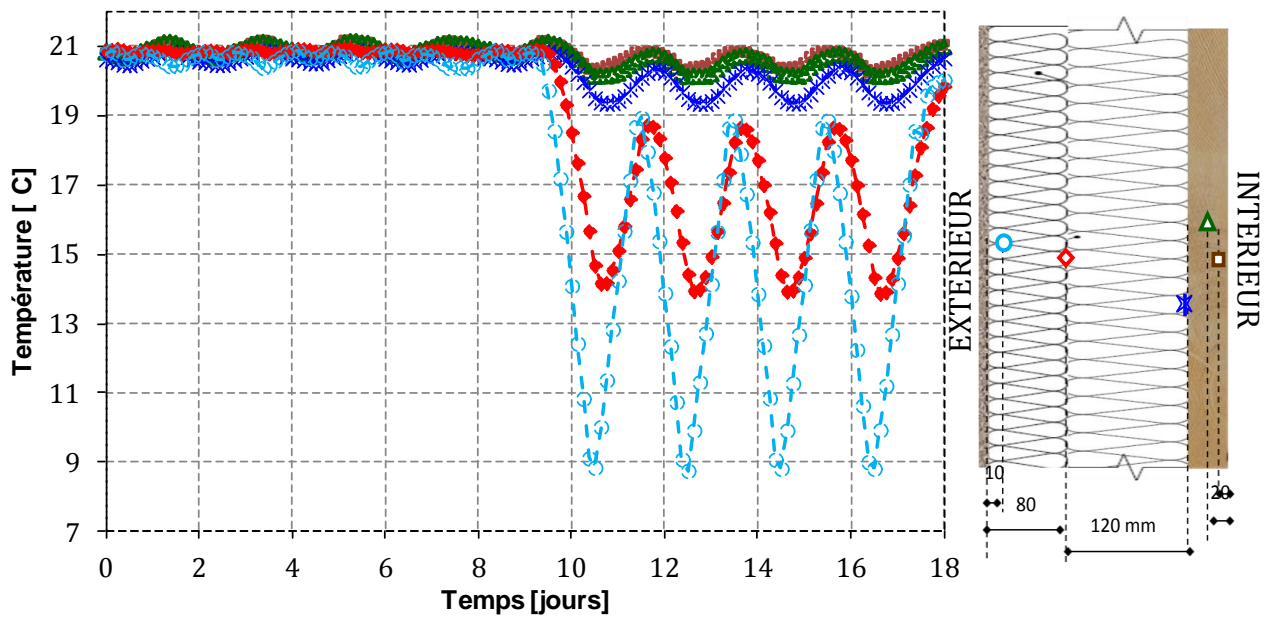


Figure A 5. Evolution de la température mesurée (a) et simulée (b) au sein de la paroi 3 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5

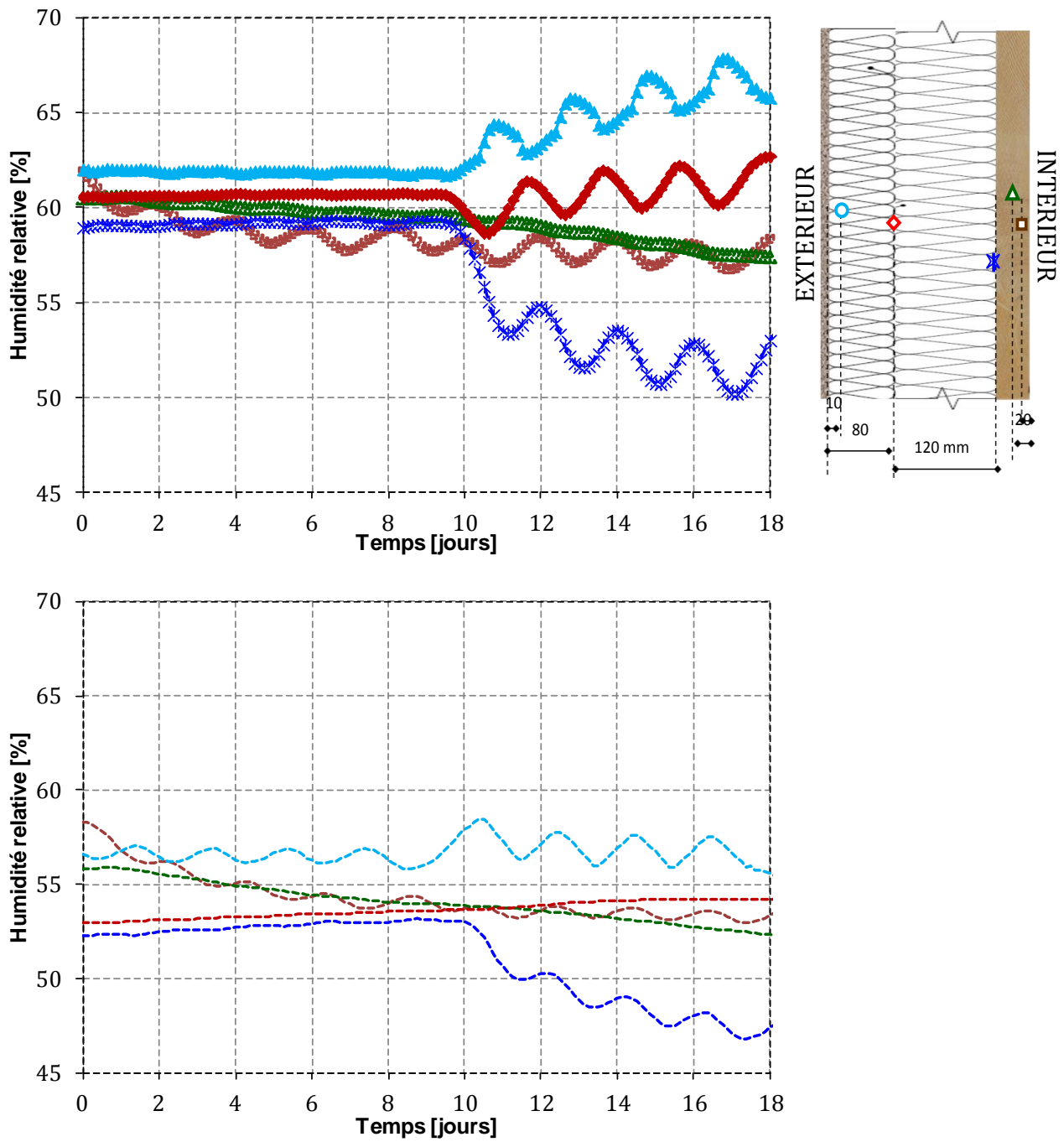


Figure A 6. Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée (a) et simulée (b) au sein de la paroi 3 en réponse aux sollicitations dynamiques des essais 4 et 5

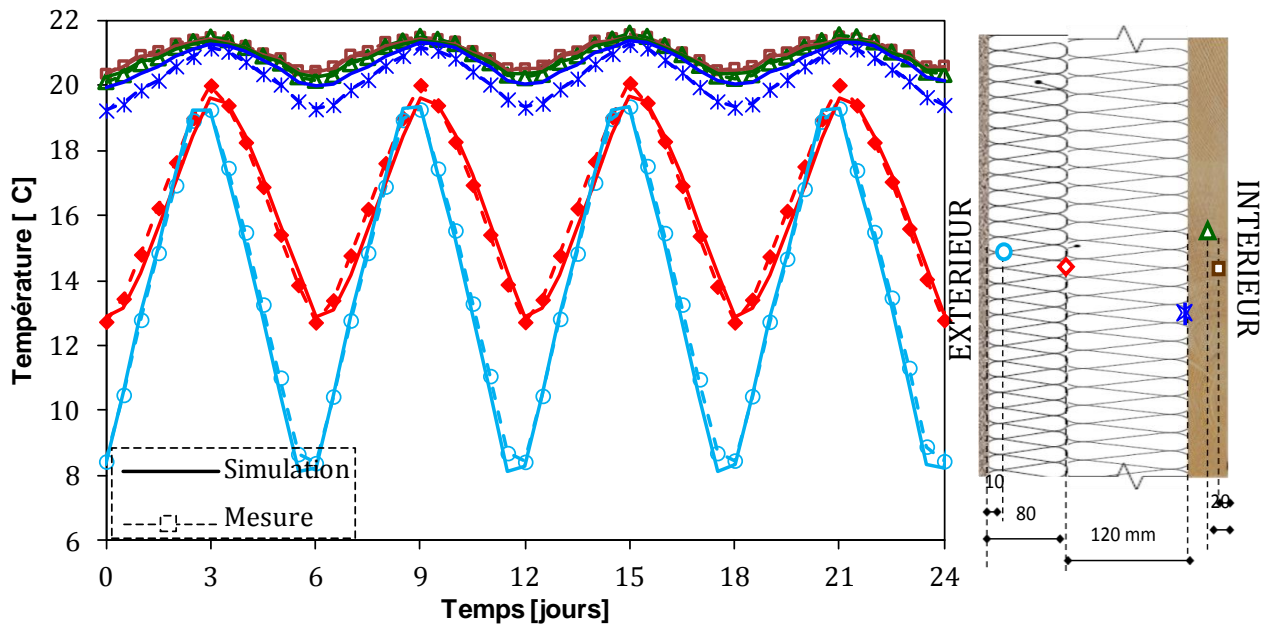


Figure A 7. Evolution de la température mesurée et simulée au sein de la paroi 3 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6

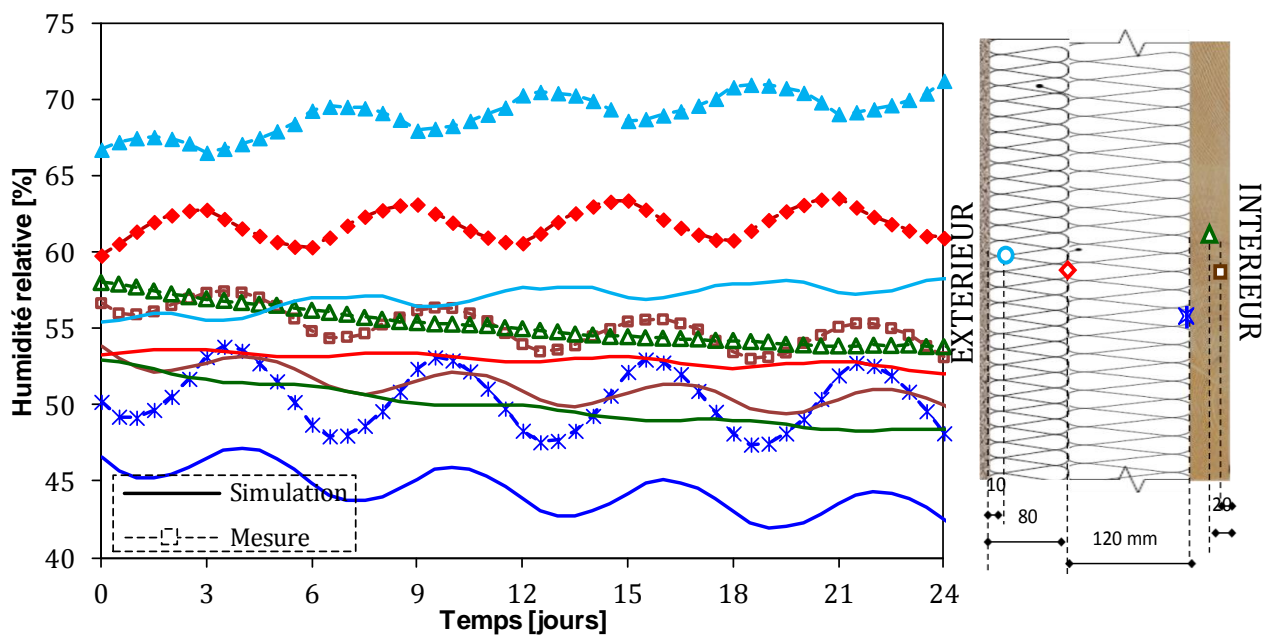


Figure A 8 Evolution de l'humidité relative de l'air mesurée et simulée au sein de la paroi 3 en réponse aux sollicitations dynamiques de l'essai 6

ANNEXE B : Validation expérimentale du modèle de transfert chaleur-masse dans une lame d'air (code du LEMTA, Traoré, 2011)

Les résultats présentés dans cet annexe sont issus de la thèse d'Issiaka Traoré (2011) et concerne la confrontation des résultats numériques avec les résultats des mesures présentées dans le paragraphe II.3.2.2 concernant la paroi 1 avec une lame d'air fermée.

Lors des essais, les écarts entre la température dans l'ambiance et la température en surface de la paroi présentaient des amplitudes variables au cours du temps. L'utilisation de ces conditions en ambiance conduirait à des coefficients d'échange convectifs variant au cours du temps. Il a donc été décidé d'utiliser des conditions aux limites de type Dirichlet mesurées aux surfaces intérieure et extérieure de la paroi. La mesure de la température en surface de la paroi a été réalisée simultanément avec des thermocouples de type T et des thermohygromètres SHT 75. Nous disposions donc de deux catégories de conditions aux limites qui seront désignés par expérimental 1 pour les valeurs mesurées par les SHT 75 et expérimental 2 pour les mesures avec les thermocouples. Deux simulations numériques ont donc été conduites avec les deux types de conditions aux limites : les résultats de simulation obtenus avec les conditions expérimental 1 seront nommés numérique 1 et les résultats obtenus avec les conditions expérimental 2 seront désignés par numérique 2. Les résultats ont montré la bonne capacité du code à reproduire les transferts de chaleur au sein de la paroi, comme le montre les évolutions des températures mesurées au centre des deux panneaux de bois massif situés du côté intérieur et du côté extérieur de la paroi.

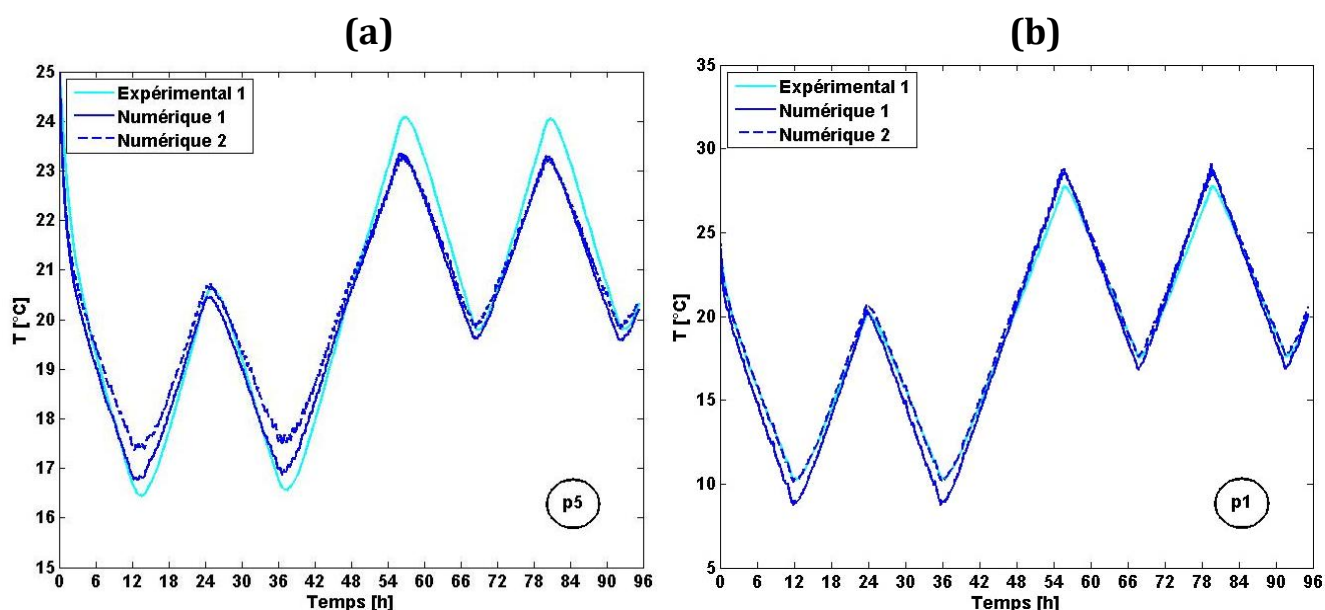


Figure B 1. Evolution de la température au centre des panneaux de bois massif intérieur (a) et extérieur (b)

Les valeurs de température mesurée et celle calculée dans la lame d'air montre également une bonne cohérence. Un écart maximal de 1 °C est observé entre la mesure et la simulation. L'écart de température entre la partie inférieure et la partie supérieure de la lame d'air, dû aux phénomènes de convection dans la lame d'air est de l'ordre de 4 °C. Cet écart a été observé aussi bien sur les mesures que lors du calcul.

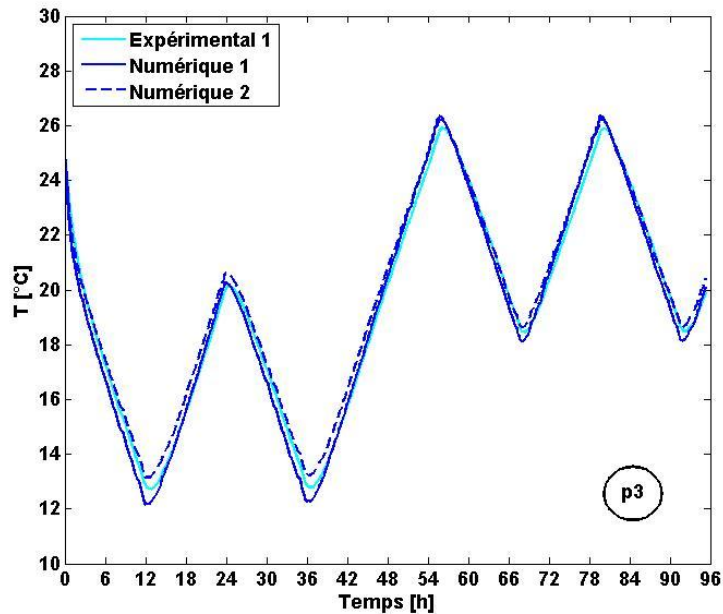


Figure B 2. Evolution de la température à mi-hauteur au centre de la lame d'air

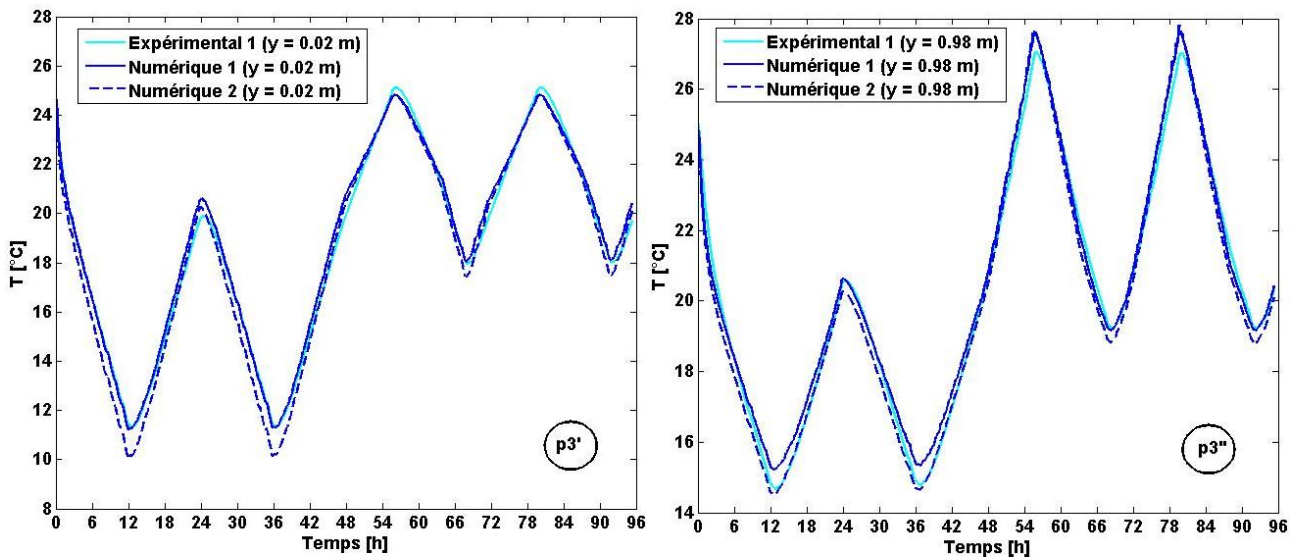


Figure B 3. Evolution de la température à $y = 0,02$ m et $y = 0,98$ m

Traoré a évalué les écarts absolus et les écarts relatifs entre la mesure et la simulation pour les valeurs de température expérimental 2 et numérique 2 dans le bois massif et dans la lame d'air. Les résultats illustrés sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ont donné un écart absolu maximal de 1 °C.

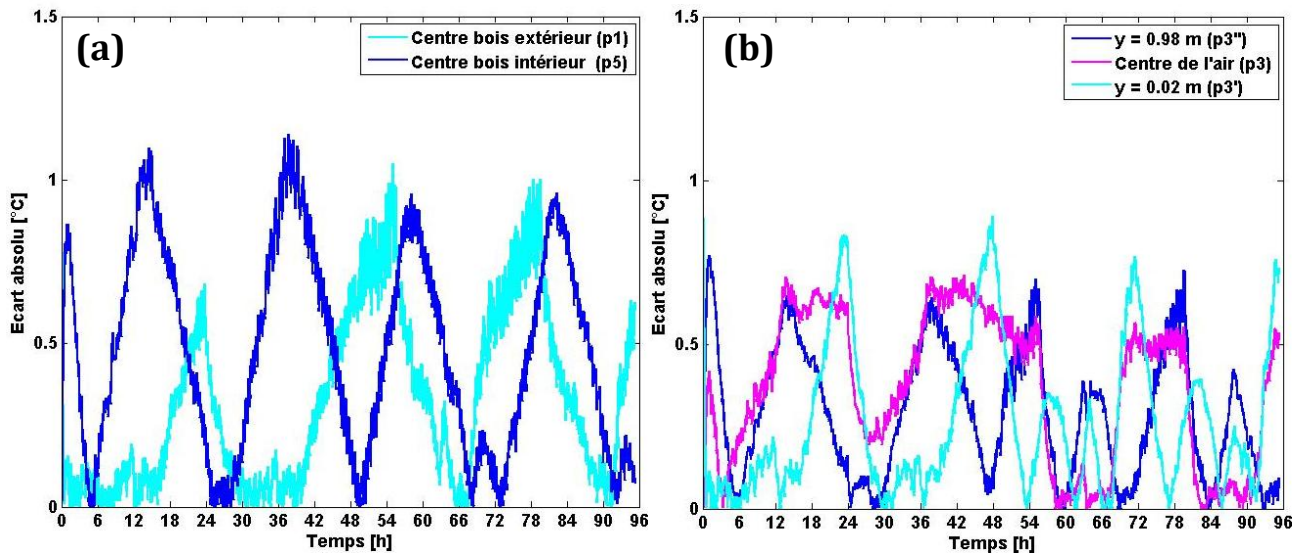


Figure B 4. Ecart absolu dans le bois massif (a) et dans la lame d'air (b)

Les données donnent les évolutions de la pression partielle de vapeur d'eau mesurée et simulée dans le bois massif et la lame d'air ainsi qu'aux interfaces de ces matériaux. Les résultats numériques montrent une bonne cohérence avec les résultats expérimentaux. Cependant, les amplitudes de variation d'humidité calculées semblent plus faibles comparées aux résultats des mesures, dans toutes les couches de la paroi.

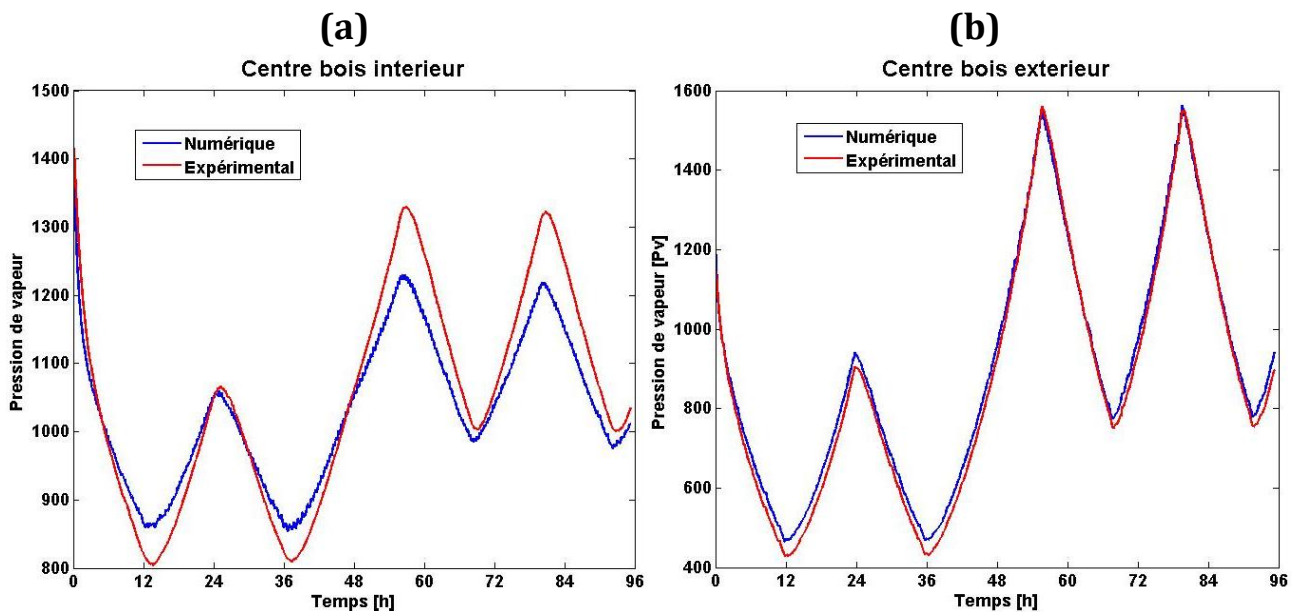


Figure B 5. Evolution de la pression partielle de vapeur d'eau dans le bois massif intérieur (a) et extérieur (b)

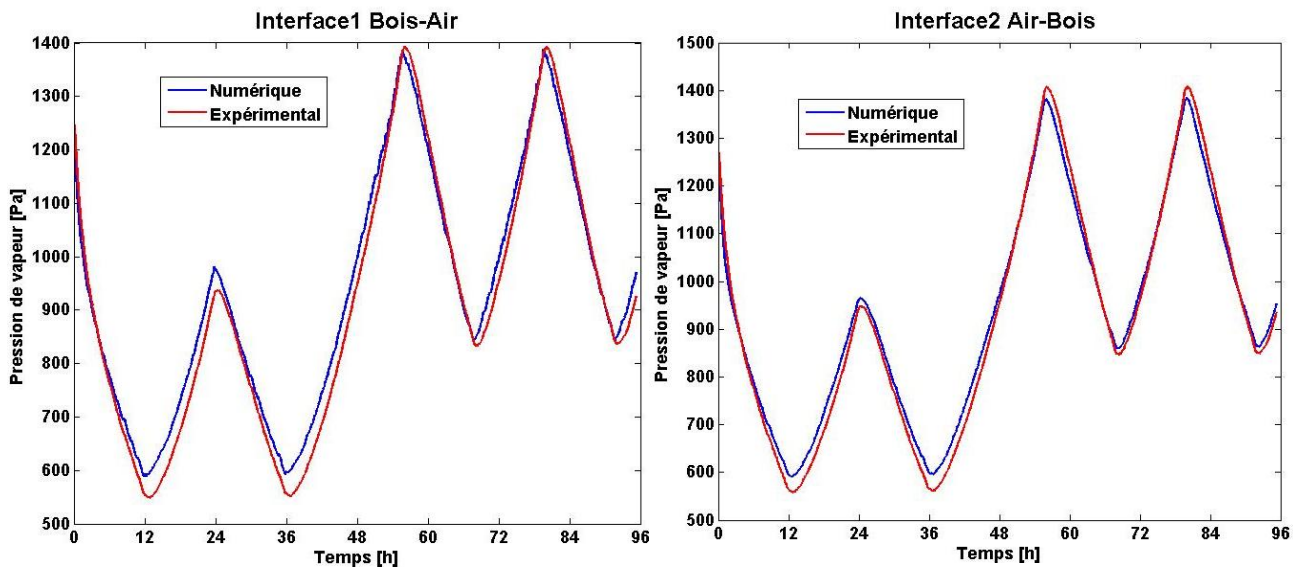


Figure B 6. Evolution de la pression partielle de vapeur d'eau aux interfaces du bois massif et de la lame d'air

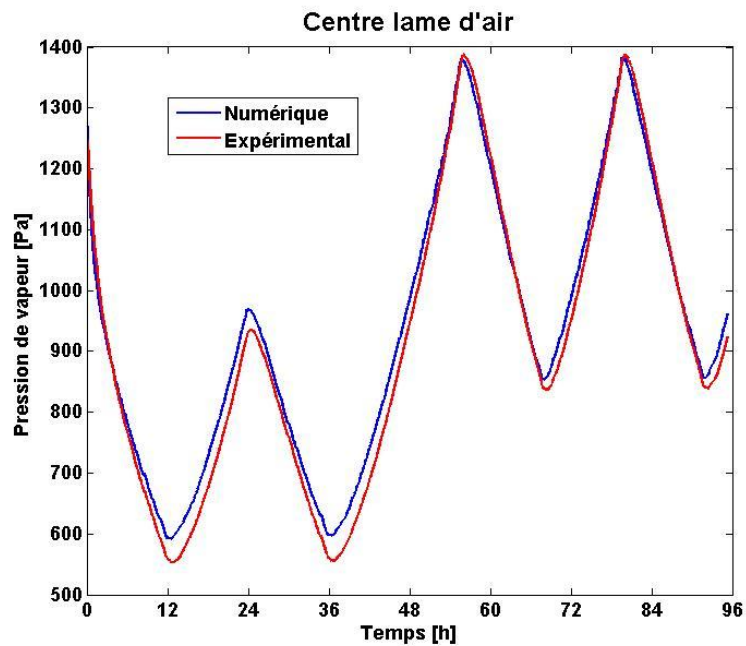


Figure B 7. Evolution de la pression partielle de vapeur d'eau au centre de la lame d'air

En résumé, cette phase de confrontation a permis de valider la capacité du modèle à prédire les transferts de chaleur dans le bois massif et la lame d'air. Des écarts sont cependant observés sur les valeurs maximales et minimales d'humidité dans la paroi. Il serait intéressant de conduire des essais pendant une période plus longue afin d'étudier les transferts d'humidité dans la paroi et d'identifier l'origine de cet écart d'amplitudes d'humidité entre les valeurs mesurées et la prédiction du code numérique.

ANNEXE C : Propriétés des matériaux utilisés par le code BuildingPore

| | EPICEA | Panneaux de fibres 1 | Panneaux de fibres 2 | Panneaux de fibres 3 |
|---|---|--|---|--|
| Chaleur massique (J/kg/°C) | 1350 | 2100 | 2100 | 2100 |
| ρ Anhydre (kg/m ³) | 400 | 50 | 160 | 270 |
| Coefficient de diffusion* (m ² s ⁻¹) | $D_{eff} = k_{rg} \cdot D_v \cdot f$ | | | |
| | $f = \frac{\rho_X D_b R T}{D_v M_v} \frac{dX}{dP_v}$ | $f = 0.67$ | $f = 0.35$ | $f = 0.21$ |
| Isotherme de sorption (**) | $\ell = 0.10$ (%MC/°C) | $\ell = 0.13$ (%MC/°C) | $\ell = 0.13$ (%MC/°C) | $\ell = 0.13$ (%MC/°C) |
| | A+= 3.03 ; B+= 12.00 ; C+= 11.28 | A+= 2.76 ; B+= 15.84 ; C+= 15.26 | A+= 2.76 ; B+= 15.84 ; C+= 15.26 | A+= 2.76 ; B+= 15.84 ; C+= 15.26 |
| | A= 2.90 ; B= 7.34 ; C= 5.94 | A= 2.25 ; B= 11.83 ; C= 10.18 | A= 2.25 ; B= 11.83 ; C= 10.18 | A= 2.25 ; B= 11.83 ; C= 10.18 |
| Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹) | $\lambda_{eff} = 0.142 + 0.3 \times X$ | $\lambda_{eff} = 0.038 + 0.021 \times X$ | $\lambda_{eff} = 0.04 + 0.021 \times X$ | $\lambda_{eff} = 0.049 + 0.021 \times X$ |
| Chaleur différentielle de sorption (J kg ⁻¹) | $\Delta h_w = 0.4 \cdot h_{vap} \cdot \left[\frac{X_{fsp} - X_b}{X_{fsp}} \right]^2$ | | | |

(*) La force motrice de la diffusion est supposée dans ce travail être le gradient de la fraction massique de la vapeur d'eau. Pour l'Epicéa, la dépendance avec la teneur en eau est définie à une température constante égale à 20°C en utilisant l'expression proposée par Siau (1984) $D_b = \text{EXP}(-9.05 - 4300/T_k + 9.8 \times X)$ (ici, force motrice est le gradient de teneur en eau liée).

(**) Modèle de Hailwood-Horrobin ((+): Adsorption ; (-): désorption). La correction en température est effectuée sur la courbe de désorption selon l'expression proposée par SIAU (1984) : $\frac{dEMC}{dT} = \ell \cdot \frac{EMC}{FSP}$

| | Ouate de cellulose | Enduit à la Chaux |
|---|--|--|
| Chaleur massique (J/kg/°C) | 2150 | 850 |
| ρ Anhydre (kg/m ³) | 50 | 1700 |
| Coefficient de diffusion* (m ² s ⁻¹) | $D_{eff} = k_{rg} \cdot D_v \cdot f$ | $D_{eff} = k_{rg} \cdot D_v \cdot f$ |
| | $f = 0.2$ | $f = 0.02$ |
| Isotherme de sorption (**) | $\ell = 0.14$ (%MC/°C) | (-) |
| | A ⁺ = 3.09 ; B ⁺ = 18.42 ; C ⁺ = 17.37 A= 2.62 ; B= 13.65 ; C= 11.50 | $P_v / P_{vs} = 1 - \exp\left(-3.7755 \cdot X_b / X_{fsp} - 5.8136 \cdot X_b / X_{fsp}^2\right)$ |
| Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹) | $\lambda_{eff} = 0.037 + 0.018 \times X$ | $\lambda_{eff} = 0.7 + 5.6 \times X$ |
| Chaleur différentielle de sorption (J kg ⁻¹) | | (-) |

ANNEXE D : Détails constructifs des bâtiments

Construction en Rondins

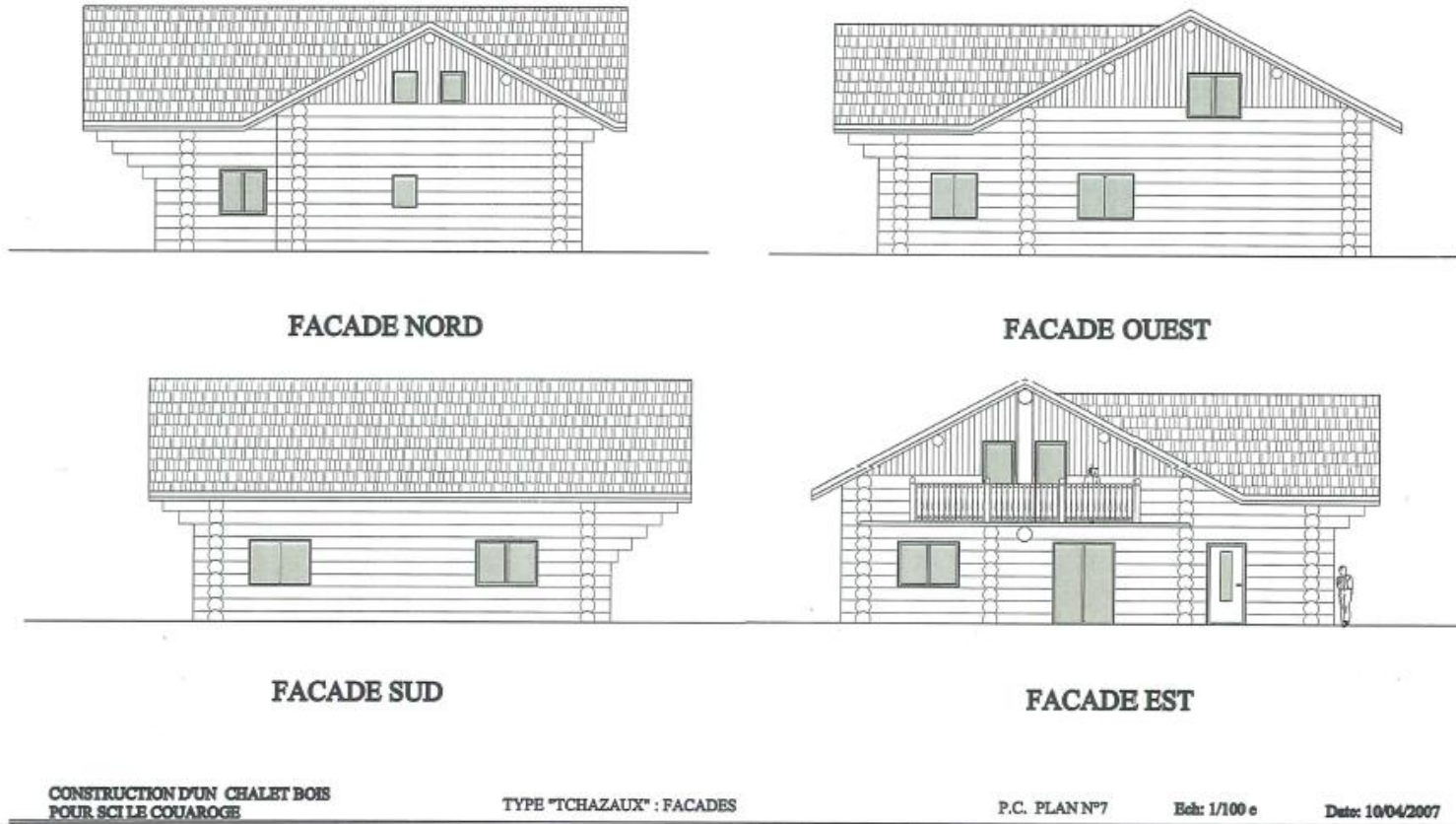
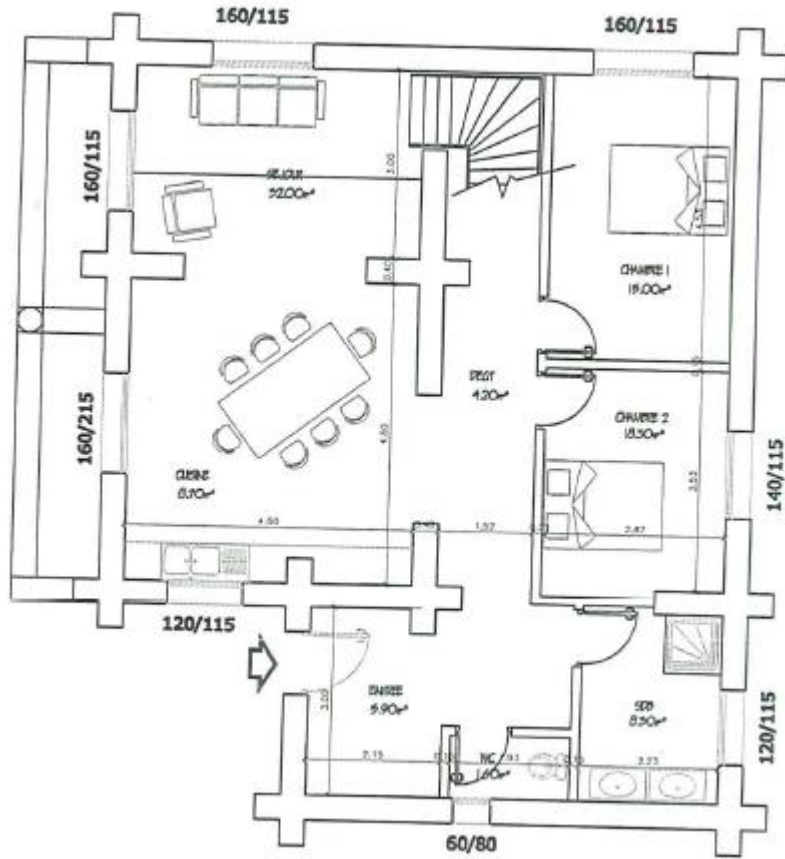
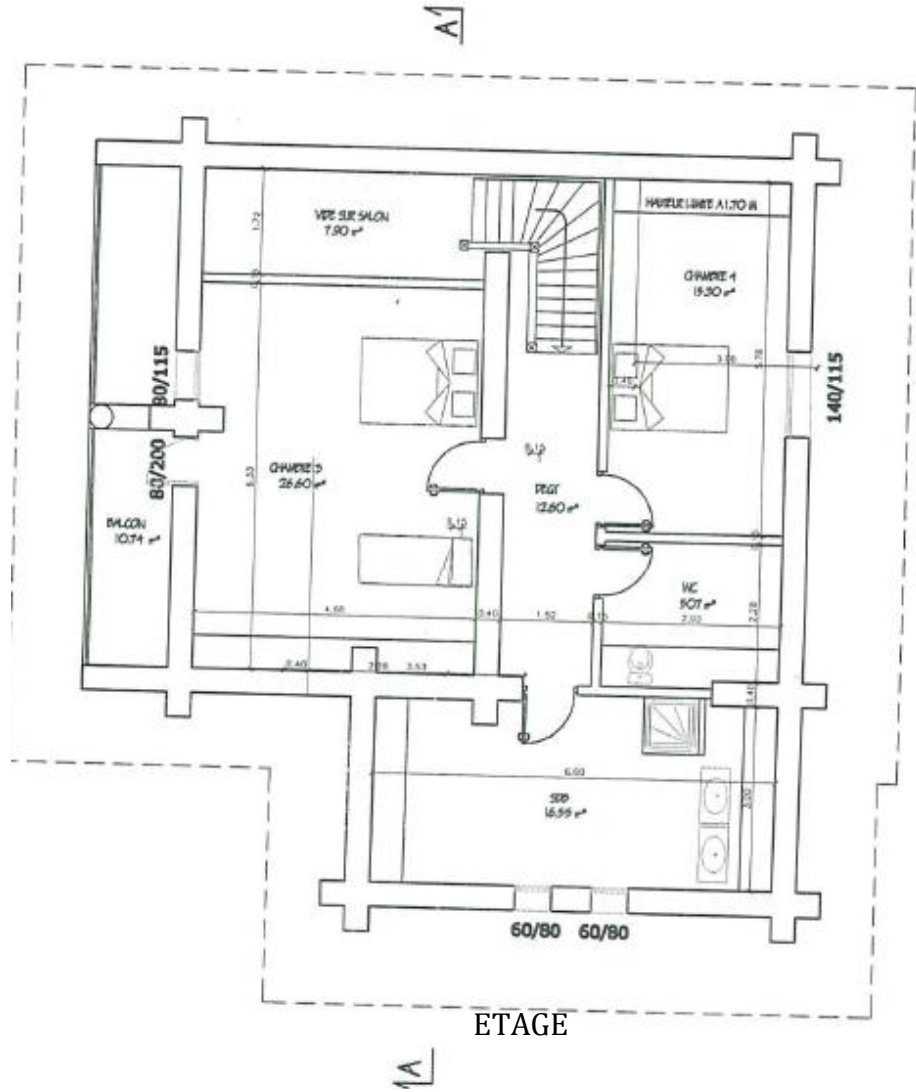


Figure D 1. Chalet en rondins : façades

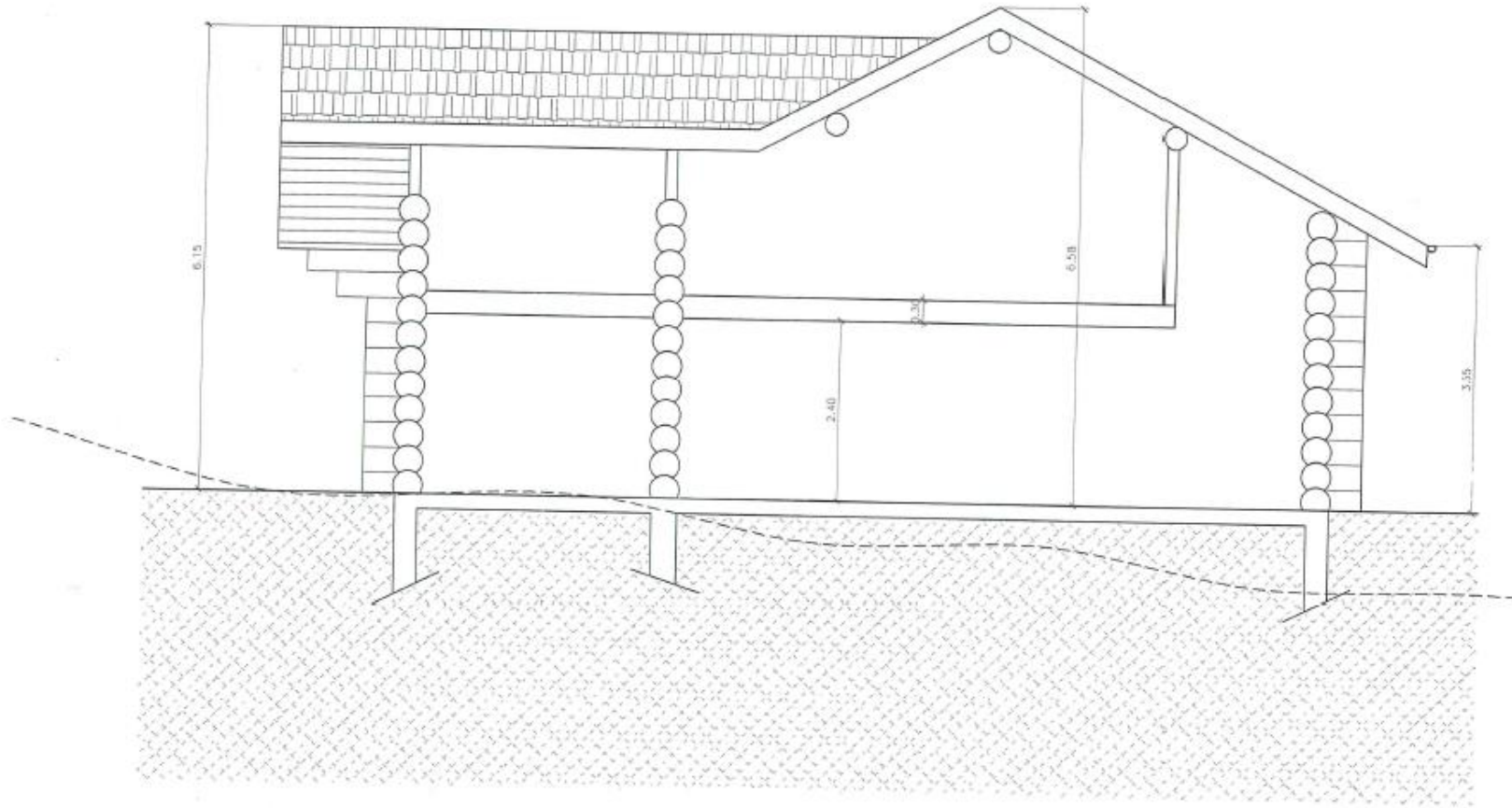


REZ-DE-CHAUSSEE



ETAGE

Figure D 2. Chalet en rondins : plans du rez-de-chaussée et de l'étage



CONSTRUCTION D'UN CHALET BOIS
POUR SCI LE COUAROGE

TYPE "TCHAZAUX" : COUPE A-A

P.C. PLAN N°6

Ech: 1/50e

Date: 10/04/2007

Figure D 3. Chalet en rondins : coupe d'une façade

Maison en panneaux contrecollés massifs

FACADES TYPE T5

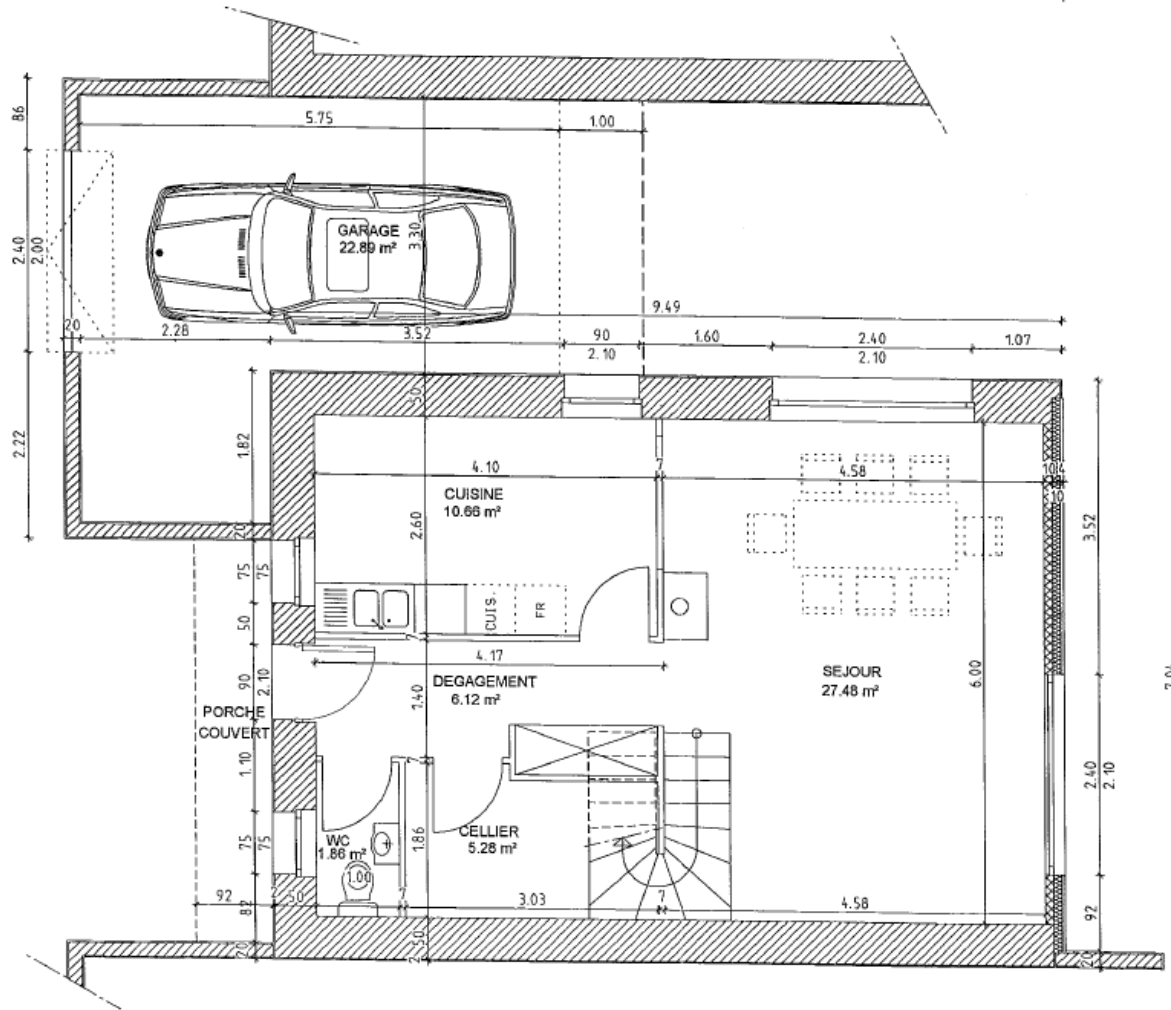
1/100



Figure D 4. Maison en panneaux contrecollés massifs : façades

PLAN RDC TYPE T5

1/50



PLAN R+1 TYPE T5 1/50

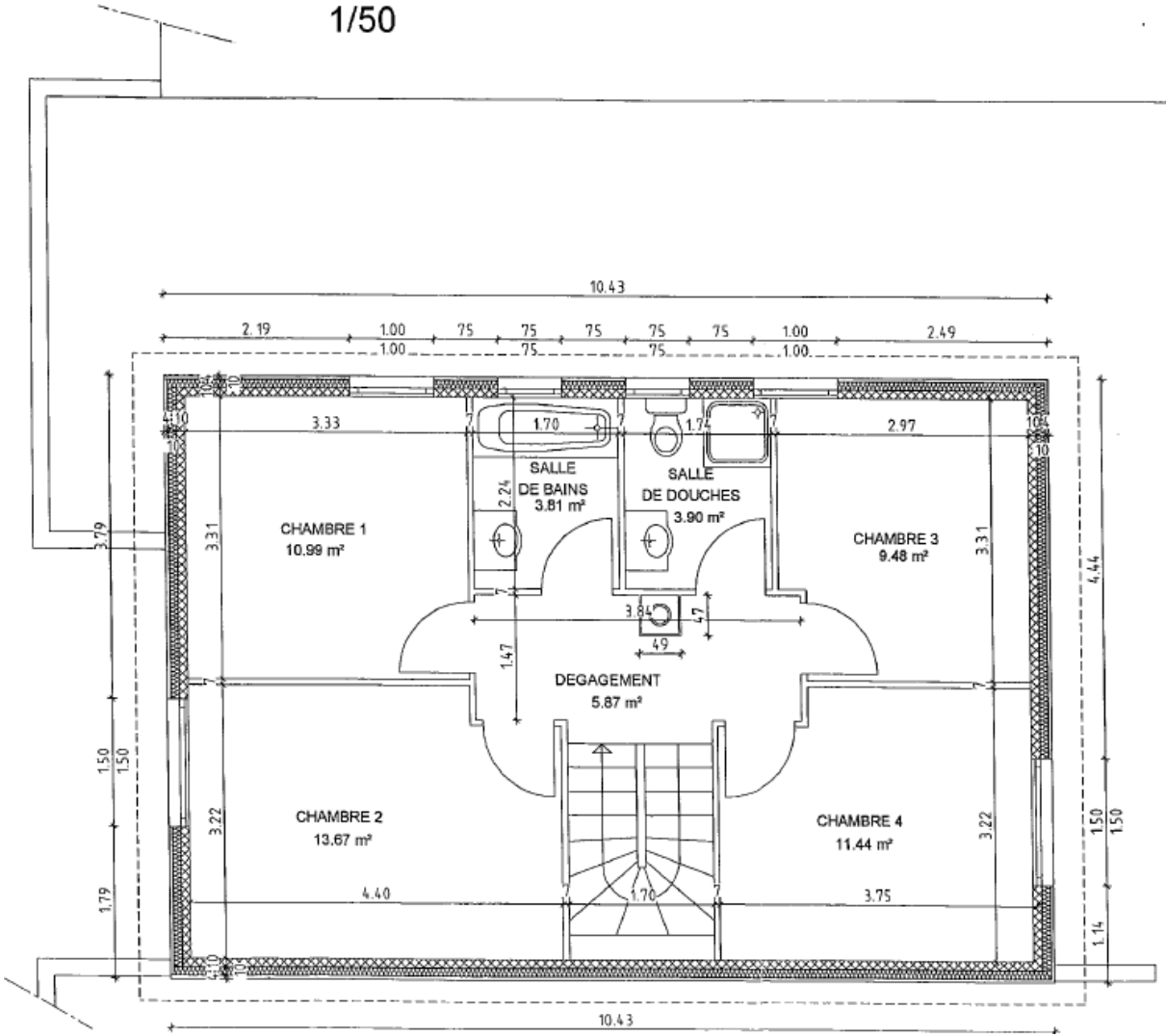


Figure D 5. Maison en panneaux contrecollés massifs : plans du rez-de-chaussée et de l'étage

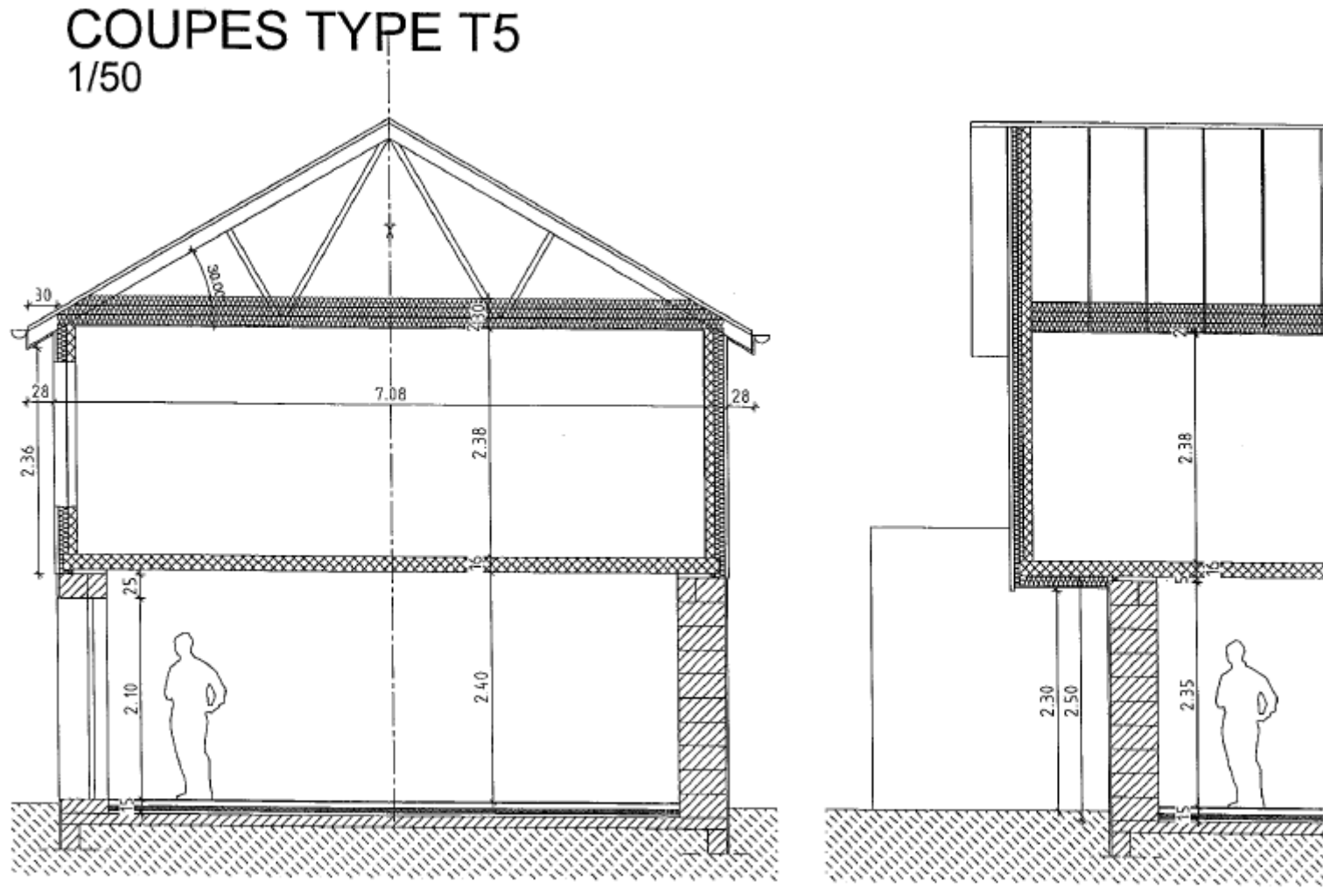
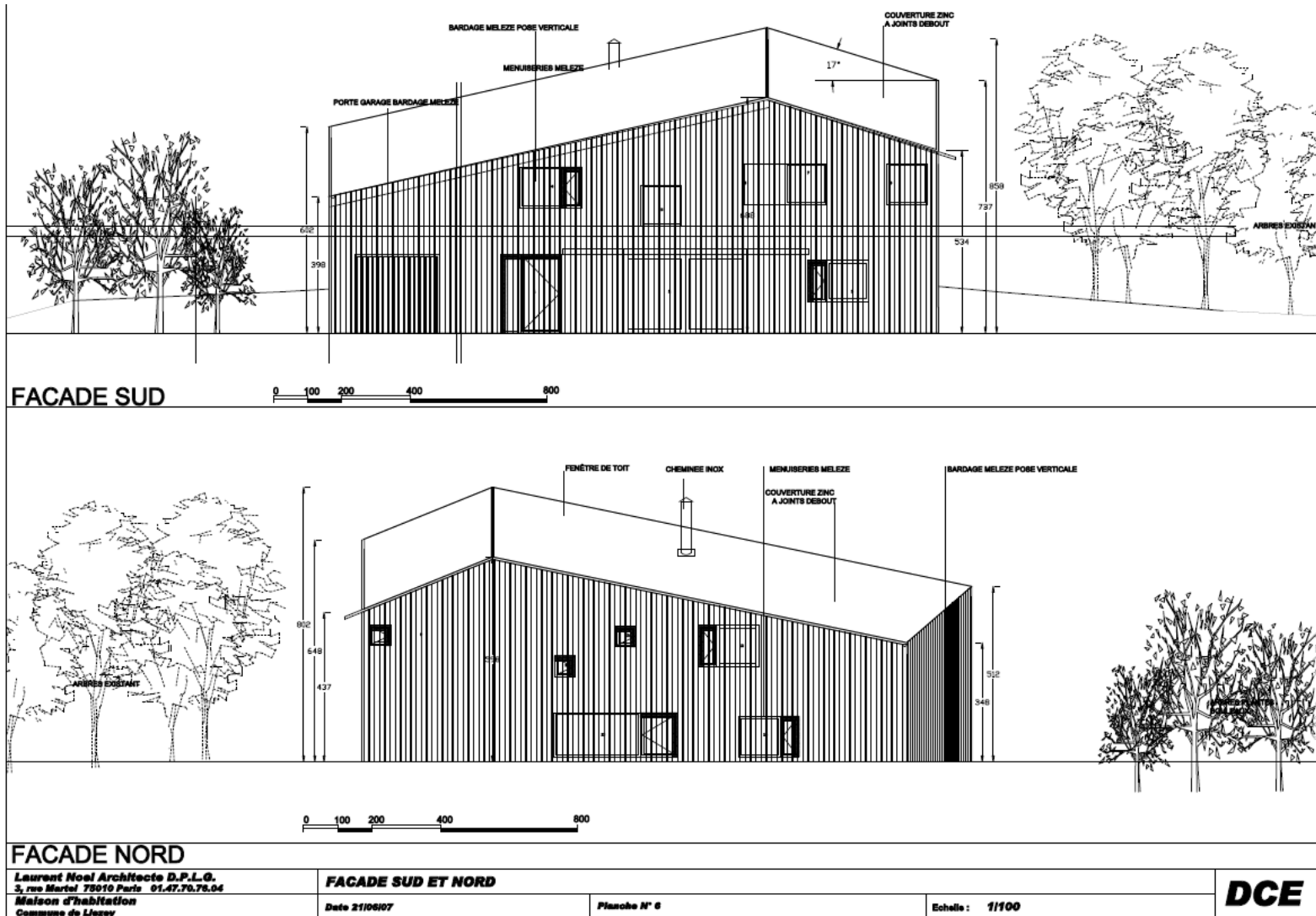


Figure D 6. Maison en panneaux contrecollés massifs : coupe d'une façade

Maison en ossature bois



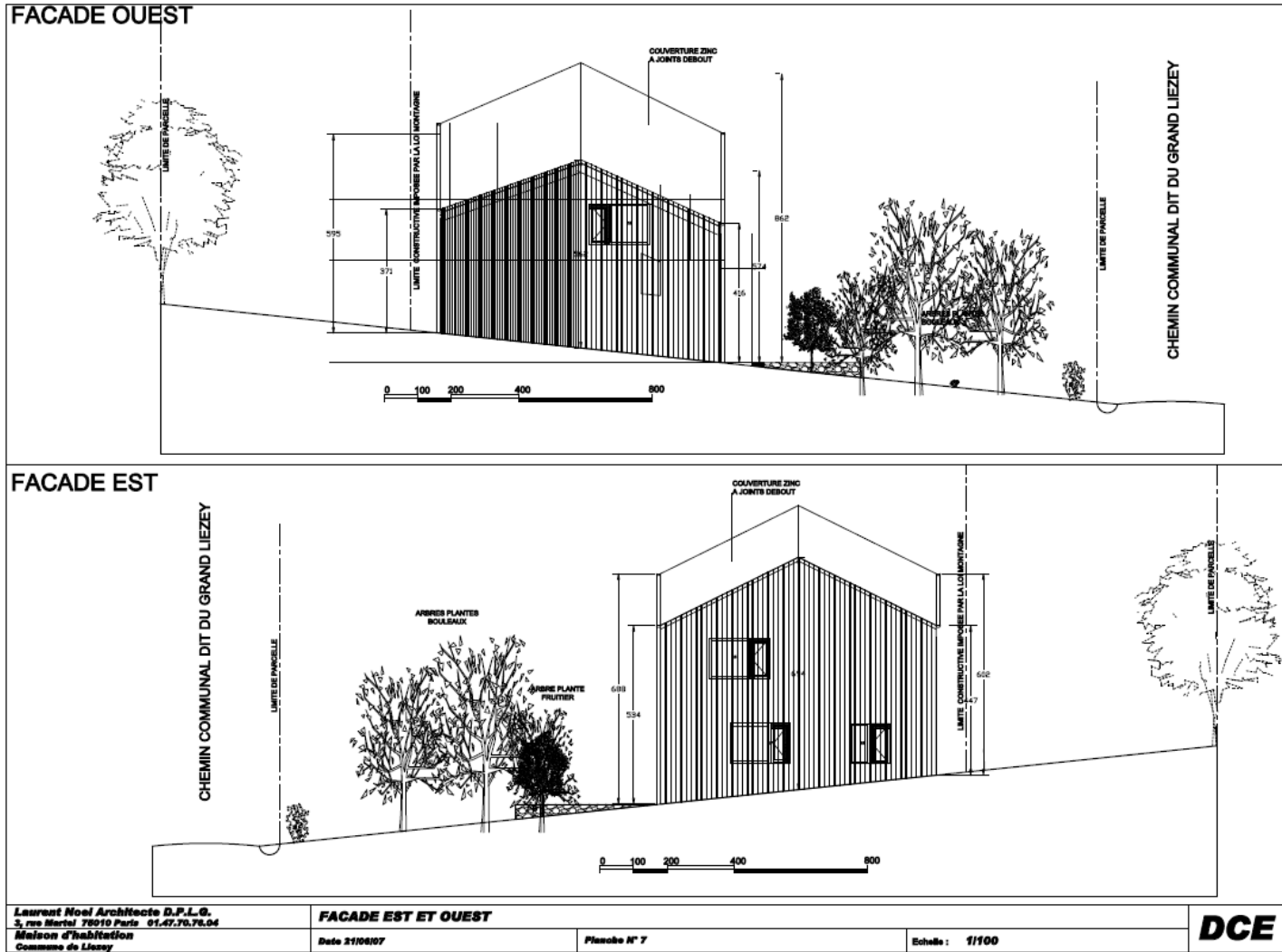


Figure D 7. Maison en ossature bois : façades

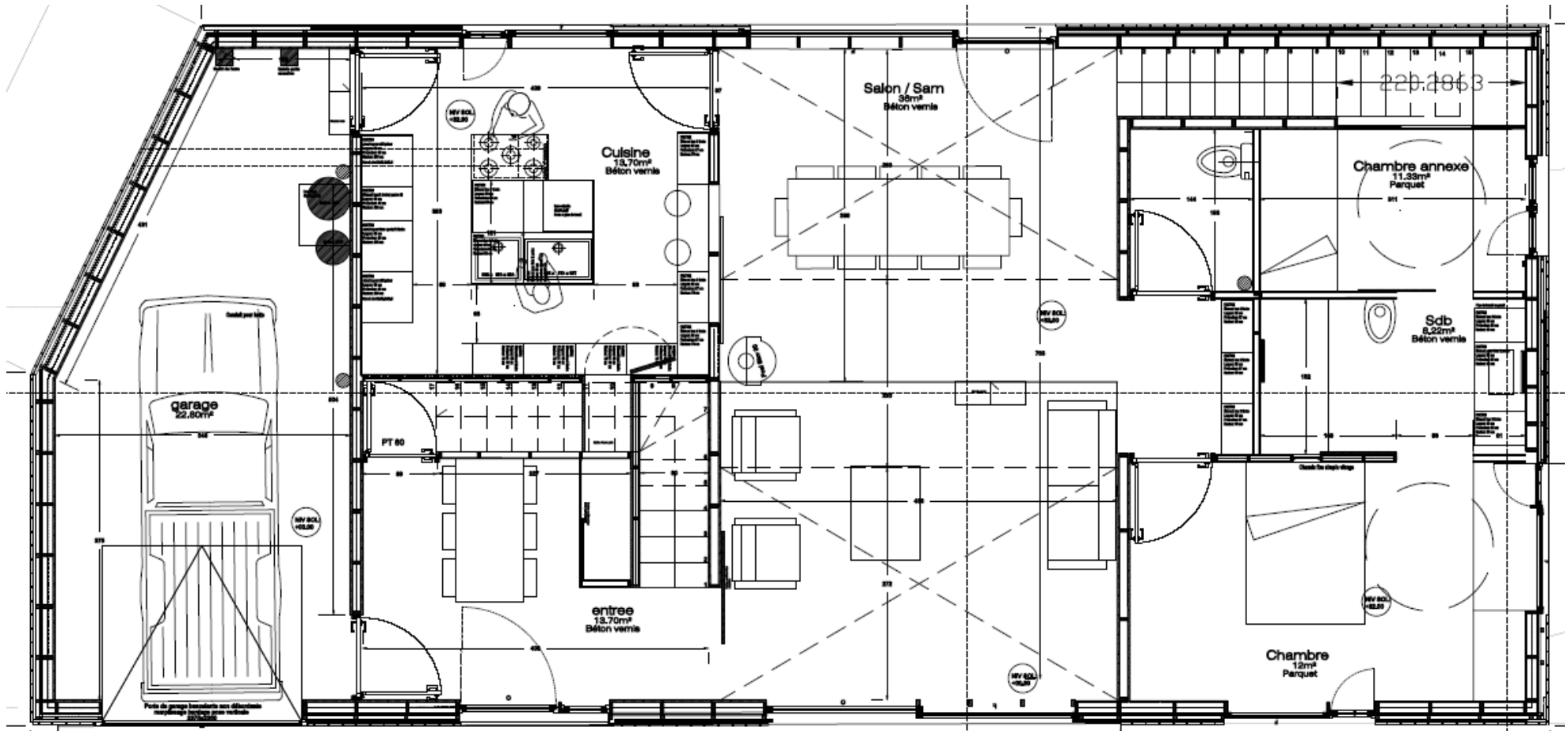


Figure D 8. Maison en ossature bois : plan du rez-de-chaussée



Figure D 9. Maison en ossature bois : plan de l'étage

COUPE C-C

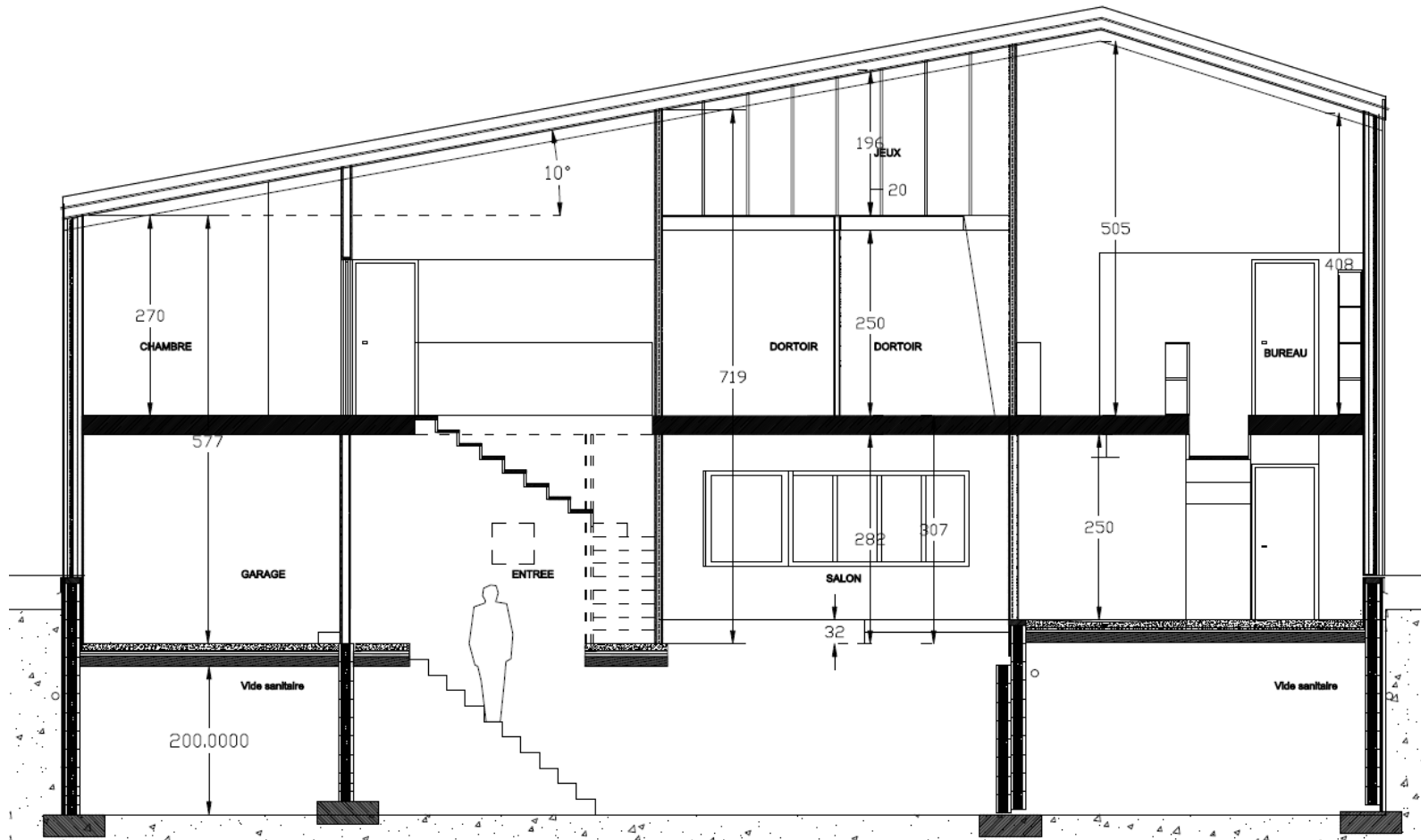


Figure D 10. Maison en ossature bois : coupe de la façade sud

Bâtiment en ossature bois

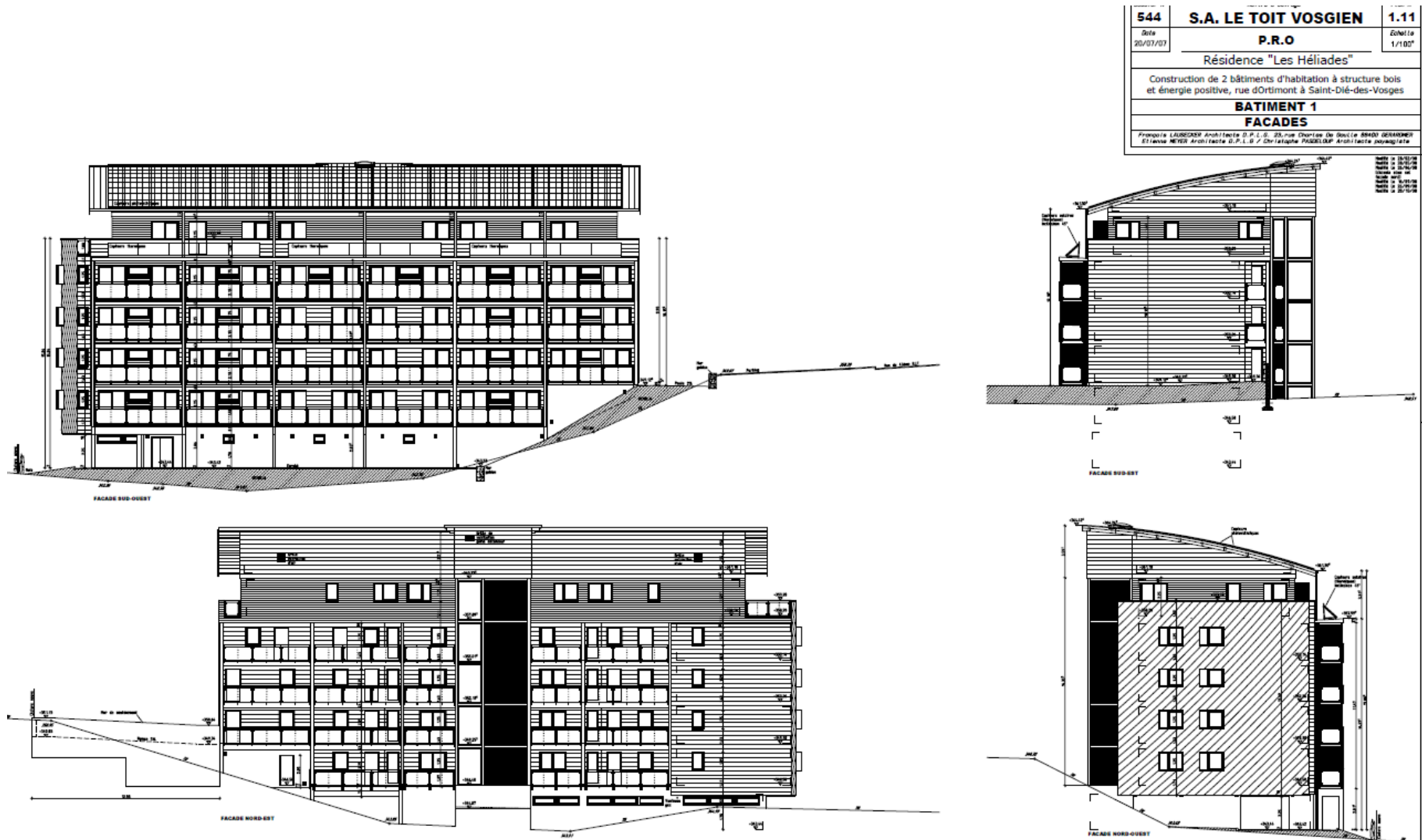


Figure D 11. Bâtiment en ossature bois : façades

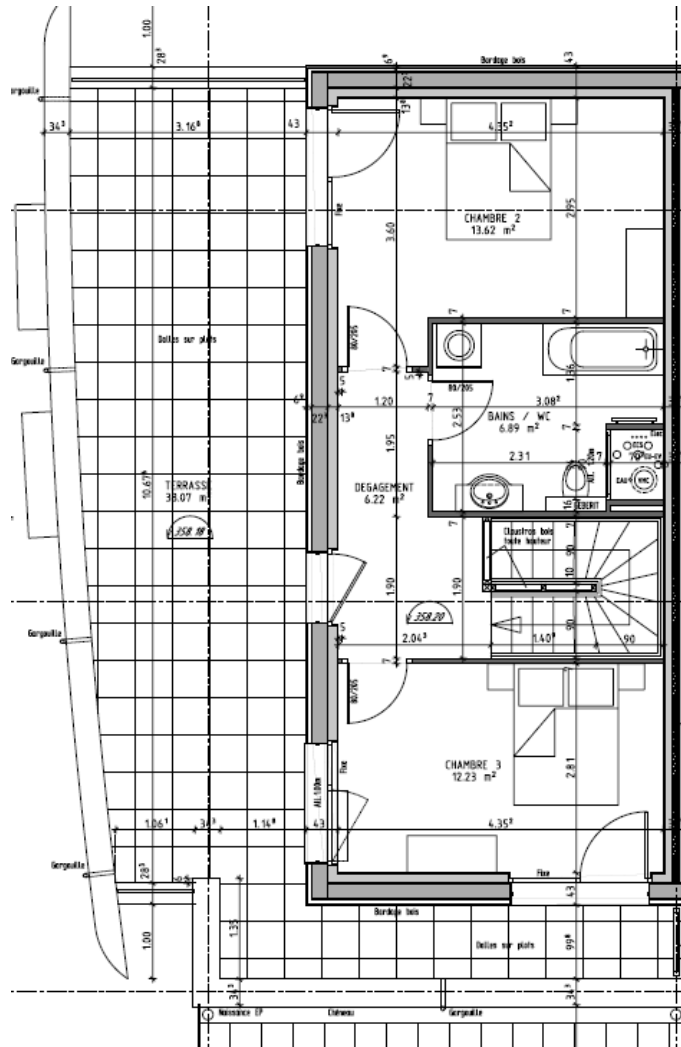


Figure D 12. Bâtiment en ossature bois : plan de l'appartement instrumenté

ANNEXE E : Propriétés des matériaux entrant dans la composition des différentes parois testées

| Parois | Matériaux | Fonction | Nom commercial | épaisseur [mm] | Masse volumique [kg/m ³] | Conductivité thermique λ [W/m.K] | Chaleur spécifique [J/kg.K] | Coefficient μ [-] | S _d [m] | Source des données |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|----------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
| Panneaux contrecollés fibre de bois | Panneaux contrecollés | structure | KLH | 94 | 450 | 0,1 | 1600 | 100 | - | TH-U + mesure CSTB (1) |
| | ouate de cellulose | isolant | ouate Nr Gaïa | 250 | 65 | 0,043 | 2100 | 1 | - | Avis technique |
| | fibre de bois | isolant | steico protect type H | 40 | 265 | 0,048 | 2100 | 5 | - | Fiche technique |
| | crépis | crépis | Fema | | | | | | | |
| Panneaux contrecollés fibre de bois | Panneaux contrecollés | structure | KLH | 94 | 450 | 0,1 | 1600 | 100 | - | TH-U + mesure CSTB (1) |
| | fibre de bois | isolant | steico therm | 120 | 160 | 0,039 | 2100 | 5 | - | Fiche technique |
| | fibre de bois | isolant | steico protect type H | 60 | 265 | 0,048 | 2100 | 5 | - | Fiche technique |
| | crépis | crépis | Fema | | | | | | | |

| Parois | Matériaux | Fonction | Nom commercial | épaisseur [mm] | Masse volumique [kg/m ³] | Conductivité thermique λ [W/m.K] | Chaleur spécifique [J/kg.K] | Coefficient μ [-] | S _d [m] | Source des données |
|------------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------|----------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Ossature fibre de bois | plaque de plâtre + cellulose | parement intérieur | fermacell | 12,5 | 1000-1250 | 0,32 | 1623 | 13 | - | Fiche technique |
| | air | vide technique | - | 40 | | R = 0,18 | | | 1 | TH-U |
| | panneau en bois multifonction | contreventement | MFP Wodego | 12 | 700 | 0,13 | 1600 | 50-100 | - | Fiche technique |
| | fibre de bois | isolant | sylvactis 55FX | 200 | 55 | 0,036 | 2000 | ≤ 2 | - | Fiche technique |
| | fibre de bois | pare-pluie | Homatherm UD35 | 35 | 270 | 0,046 | 2100 | 9 | - | Fiche technique |
| | air ventilé | | | | | R = 0,13 | | | | TH-U |
| | épicéa | bardage | - | 21 | 450 | | 1600 | 100 | - | |
| Madrier | épicéa | parement intérieur | - | 19 | 450 | 0,13 | 1600 | 100 | - | TH-U |
| | air | vide technique | - | 40 | | R = 0,18 | | | 1 | TH-U |
| | Frein-vapeur hygrovariable | barrière vapeur | Isover Vario KM Duplex | 0,05 | - | - | - | - | 0,2 - 5 | Fiche technique |
| | Fibre de bois + chanvre | isolant | Isonat plus 45 kg | 120 + 40 | 45 | 0,038 | 2100 | ≤ 2 | - | Fiche technique |
| | épicéa | structure | - | 70 | 450 | 0,13 | 1600 | 100 | - | TH-U |

| Parois | Matériaux | Fonction | Nom commercial | épaisseur [mm] | Masse volumique [kg/m ³] | Conductivité thermique λ [W/m.K] | Chaleur spécifique [J/kg.K] | Coefficient μ [-] | S _d [m] | Source des données |
|-------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Ossature ouate | plaque de plâtre + cellulose | parement intérieur | fermacell | 12,5 | 1000-1250 | 0,32 | 1623 | 13 | - | Fiche technique |
| | air | vide technique | - | 40 | | R = 0,18 | | | 1 | TH-U |
| | frein-vapeur hygrovARIABLE | barrière vapeur | Intello | 0,2 | - | - | - | - | 7,5/25-10 | Fiche technique |
| | ouate de cellulose | isolant | ouate Nr Gaïa | 250 | 65 | 0,043 | 2100 | 1 | - | Avis technique |
| | OSB | contreventement | OSB Kronoply | 9 | 650 | 0,13 | 1600 | 148 | - | Fiche technique |
| | fibre de bois | support d'enduit | Hofatex Systherm | 40 | 210 | 0,044 | 2100 | 5 | - | Fiche technique |
| | crépis | enduit de marouflage | | Sto Levell Uni | - | 1300 | 0,87 | - | 15-35 | - |
| enduit de parement | | | Stolit K | - | 1700-1900 | 0,7 | - | - | 0,25 - 0,3 | Fiche technique |
| Ossature laine de verre | plaque de plâtre + cellulose | parement intérieur | fermacell | 12,5 | 1000-1250 | 0,32 | 1623 | 13 | - | Fiche technique |
| | air | vide technique | - | 40 | | R = 0,18 | | | 1 | TH-U |
| | pare-vapeur | barrière vapeur | Dörken delta reflex | 0,025 | - | 0,17 | - | - | 150 | Fiche technique |
| | laine de verre | isolant | Isoconfort 35 | 140 | 35 | 0,035 | 1030 | 1 | - | Fiche technique |
| | OSB | contreventement | OSB Kronoply | 9 | 650 | 0,13 | 1600 | 148 | - | Fiche technique |
| | polystyrène | support d'enduit | Sto PS 15 SE | 40 | 15 | 0,038 | 1500 | 20-50 | - | Fiche technique |
| | crépis | enduit de marouflage | | Sto Elastofibre | - | | 0,7 | - | - | 150 |
| enduit de parement | | | Stolit K | - | 1700-1900 | 0,7 | - | - | 0,25 - 0,3 | Fiche technique |

Résumé

Les matériaux hygroscopiques, et tout particulièrement le bois et ses dérivés possèdent des propriétés complexes rendant difficile la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse dans les parois incluant ces matériaux. De ce fait, très peu d'outils numériques sont aujourd'hui capables de prédire correctement la performance hygrothermique de l'habitat bois. L'objectif de ce travail est de caractériser expérimentalement les transferts chaleur-masse dans les parois des constructions bois afin de valider un outil numérique destiné à simuler le comportement hygrothermique des parois comportant des matériaux hygroscopiques.

Dans un premier temps, les notions théoriques et les études antérieures sur les transferts couplés chaleur – masse sont présentés. Ensuite, nous donnons un descriptif détaillé du dispositif expérimental conçu pour caractériser les transferts couplés chaleur-masse dans les parois. Les expériences de caractérisation des performances hygrothermiques des parois fournies par les industriels partenaires du projet TRANSBATIBOIS dans lequel s'inscrit cette thèse sont également abordées. Nous détaillons par la suite les expériences réalisées ainsi que la phase de confrontation des résultats expérimentaux avec les résultats prédits par le code numérique BuildingPore et l'outil commercial WUFI. La troisième partie de ce travail est consacrée aux expérimentations à l'échelle de l'enveloppe. Nous y présentons une analyse de la performance hygrothermique et des consommations énergétiques des constructions bois à travers le suivi de modules-test exposés au climat extérieur. La dernière partie du travail est consacrée aux dispositifs de suivi de bâtiments.

Mots-clés : Transferts couplés chaleur-masse, dispositifs expérimentaux, bois, matériaux hygroscopiques, paroi, enveloppe, expérimentation, validation.

Abstract

Coupled heat and moisture transfer through hygroscopic materials, particularly wood and wood-based products are difficult to model. This is partly due to some specific and complex properties of these materials that are often not included in numerical models. Currently, only a few numerical models are able to predict accurately the hygrothermal performance of wooden building envelope. The aim of this work is to assess the heat and moisture transfer in wooden building envelope through experiments and validate the prediction capacity of a numerical model developed to simulate hygrothermal behavior of envelope including wooden materials.

After giving a theoretical reminder of the coupled heat and moisture transfer through building envelope and reporting the results of previous studies in this field, we will give details of the experimental investigation on heat and moisture transfer through timber walls. Firstly, the experimental apparatus used for the wall tests is presented. Then, we will analysis the hygrothermal performance of wooden walls provided by the partners of the TRANSBATIBOIS project in which this work was achieved. Experimental works achieved for Buildingpore model validation and results of the comparisons between experimental assessment and numerical predictions with Buildingpore and WUFI are also reported. The third part of this study deals with the experimental assessment of wooden building envelopes exposed to climatic conditions. An analysis of the hygrothermal performance and the energy consumption of wooden test-cells is performed and reported in this part. The latest part concerns experimental works on buildings.

Keywords : Coupled heat and mass transfer, experimental apparatus, wood, hygroscopic materials, walls, envelope, experience, validation