HAL
open science

Comportement hygrothermique de matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi en ambiance contrôlée et in-situ

Naima Boumediene

To cite this version:

Naima Boumediene. Comportement hygrothermique de matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi en ambiance contrôlée et in-situ. Génie civil. Université de Rennes; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2022. Français. NNT : 2022REN1S009 . tel-03771440

HAL Id: tel-03771440

https://theses.hal.science/tel-03771440v1

Submitted on 7 Sep 2022

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.

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE RENNES 1
En cotutelle internationale avec
L'ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE SFAX

ECOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : *Génie civil*

Par
Naima BOUMEDIENE

Comportement hygrothermique de matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi en ambiance contrôlée et in-situ

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 13 mai 2022
Unité de recherche : Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique
Thèse N° :

Rapporteurs avant soutenance :

Emmanuel Antczak	Professeur des Universités, Université D'Artois, France
Mouldi Chirgui	Professeur, Ecole nationale d'Ingénieurs de Gabes,Tunisie

Composition du Jury :

Président :	Patrick Salagnac	Professeur, La Rochelle Université, France
Examinateur :	Nejib Hidouri	Professeur, Ecole nationale d'Ingénieurs de Gafsa, Tunisie
Examinateur :	Sylvie Prétot	Maître de conférences, Université de Rennes, France
Co-Dir. de thèse :	Florence Collet	Maître de conférences HDR, Université de Rennes1, France
Co-Dir. de thèse :	Sami Elaoud	Maître de conférences HDR, Ecole nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie

Invité(s)

Lazhar Ayed	Maitres de conférences, Ecole nationale d'Ingénieurs de Gafsa, Tunisie

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à l'Université de Rennes1, l'école doctorale et le Laboratoire LGCGM ainsi qu'à l'école nationale de Sfax et le laboratoire LMFAPEE.

Mon vif remerciement et toute ma gratitude aux Professeurs Emmanuel Antczak et Mouldi Chirgui pour avoir aimablement accepté de rapporter ce travail et de faire partie du jury.

Je remercie vivement le Pr. Patrick Salagnac, qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à mon travail en acceptant de présider le jury de thèse, ainsi qu'à l'examinateur Mr Najib Hidouri.

Je tiens à remercier vivement ma directrice de thèse Madame Florence COLLET, d'abord de m'avoir fait confiance et d'avoir accepté d'encadrer cette thèse.

Je la remercie également pour ses nombreux conseils et ses critiques constructives pour l'élaboration de ce travail. Je la remercie surtout pour ses encouragements durant ces années, ses appuis (de m'avoir assurer le financement en France…).

Egalement, je remercie infiniment ma co-encadrante de thèse Madame Sylvie Prétot pour son suivi, son temps consacré, pour toute aide sur les difficultés rencontrées, ses conseils et pour l'enrichissement scientifique.

Mes premières et dernières reconnaissances vont à vous toutes les deux Florence et Sylvie pour le temps que vous m'avez consacré tout le long de ces trois ans, pour le soutien moral, je n'oublierai jamais vos petits SMS pendant la période de confinement et d'avoir pensé à moi tout le temps.

Je remercie beaucoup Monsieur Sami Elaoud de m'avoir accueilli au LMFAPEE et m'assisté dans ce travail et de m'avoir facilité les formalités administratives du côté de la Tunisie pour le montage de la cotutelle et pour ses encouragements.

Pareillement je remercie beaucoup Monsieur Lazhar Ayed pour ses encouragements et ses conseils pour élaborer ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à l'entreprise Lafarge Holcim France ainsi que Monsieur Florent Dubois pour le contrat de recherche de suivi de la maison rénovée pendant deux ans, ainsi que Monsieur Jean Louzier, propriétaire de la maison, pour son aide lors du suivi expérimental.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues du laboratoire LGCGM pour l'ambiance créée, les encouragements; à Christophe Lanos, le directeur adjoint du laboratoire, et à tous les personnels et les techniciens

Un grand merci à mes belles Sana khaled et Nourhan Mortada pour l'ambiance créée dans notre bureau, pour les moments sincères qu'on a vécus ensembles.

Je remercie mon ami Oussema Choura, mon collègue du laboratoire LMFAPEE pour ses encouragements et ses aides administratives. Bon courage à lui aussi pour finaliser sa thèse.

Mes remerciements vont à ma famille, Mon père Miloud, ma mère Zina et mes deux sœurs Sonia et Ayda

Naima

Résumé

Actuellement, les matériaux de construction isolants biosourcés sont conçus dans le but de réduire les consommations d'énergie et de ressources non renouvelables. Une fois que leurs propriétés multiphysiques sont caractérisées à l'échelle du matériau, il est nécessaire d'étudier leur comportement à l'échelle de la paroi et du bâtiment.

L'étude expérimentale et numérique à l'échelle de la paroi est réalisée en ambiance contrôlée. Le mur d'essai en matériaux bio-sourcés est implémenté comme mur de séparation d'un dispositif bi-climatique, qui permet de simuler des climats intérieurs et extérieurs. Ces climats correspondent à des climats français et tunisiens estivaux et de mi- saison. Les simulations numériques sont réalisées avec le logiciel WUFI Pro 6.5. Le comportement hygrothermique de la paroi est analysé à partir des cinétiques et des profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur. Les résistances thermique et hygrique de la paroi sont identifiées. Le comportement en régime dynamique est caractérisé par l'amortissement et le déphasage de température et de pression de vapeur ainsi que par des bilans de flux.

L'étude in-situ porte sur un bâtiment rénové en béton de chanvre situé en Normandie. Les résultats sont analysés en terme de confort thermique, de consommations énergétiques et de comportement hygrothermique de parois en béton de chanvre.

Mots clés : transfert de chaleur et de masse ; étude expérimentale ; simulation numérique ; dispositif bi-climatique ; paroi en œuvre.

Abstract

Currently, bio-based insulating building materials are designed with the goal of reducing energy and non-renewable resource consumption. Once their multiphysical properties are characterized at the material scale, it is necessary to study their behavior at the wall and building scale.

The experimental and numerical study at the wall scale is performed in a controlled environment. The test wall in bio-sourced materials is implemented as a partition wall of a bi-climatic device, which allows to simulate indoor and outdoor climates. These climates correspond to French and Tunisian summer and mid-season climates. The numerical simulations are performed with the WUFI Pro 6.5 software. The hygrothermal behavior of the wall is analyzed from the kinetics and profiles of temperature, relative humidity and vapor pressure. The thermal and hygric resistances of the wall are identified. The behavior in dynamic regime is characterized by the damping and the phase shift of temperature and vapor pressure as well as by flow balances.

The in-situ study concerns a renovated hemp concrete building located in Normandy. The results are analyzed in terms of thermal comfort, energy consumption and hygrothermal behavior of hemp concrete walls.

Keywords: heat and mass transfer; experimental study; numerical simulation; bi-climatic device; on site wall

Table des matières

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Synthèse bibliographique : comportement hygrothermique des matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi et du bâtiment……5

I.1 Propriétés des matériaux biosourcés 6
I.1.1 Masse volumique et porosité 6
I.1.2 Caractéristiques thermiques 8
I.1.2.1 Conductivité thermique 8
I.1.2.2 Effusivité thermique et capacité thermique..... 10
I.1.3 Caractéristiques hygriques..... 11
I.1.3.1 Isotherme de sorption 11
I.1.3.2 Perméabilité à la vapeur 15
I.1.3.3 Valeur tampon hygrique (MBV) 16
I.2 Etude expérimentale du comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi 18
I.3 Etude expérimentale du comportement hygrothermique à l'échelle du bâtiment 25
I.4 Modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité..... 29
I.4.1 Modèles mathématiques des transferts couplés de chaleur et d'humidité 30
I.4.1.1 Modèle de Philip et De Vries..... 30
I.4.1.2 Modèle de Luikov..... 30
I.4.1.3 Modèle de Kunzel 30
I.4.2 Simulation numérique des phénomènes 31
I.5 Conclusion..... 32

Chapitre II : Présentation des études expérimentales et numériques en conditions contrôlées et des méthodes d'analyse ……33

II.1 Etudes expérimentales 35
II.1.1 Dispositif expérimental..... 35
II.1.1.1 Enceinte et équipements 35
II.1.1.2 Régulation 37
II.1.2 Parois testées et métrologie..... 38
II.1.2.1 Paroi Terre - Chanvre 39
II.1.2.2 La paroi ISOBIO 40
II.1.2.3 Paroi Maïs : paroi avec des panneaux de PVA-chanvre et un parement intérieur en résidus de rafles de maïs 41
II.1.2.4 Paroi Colza : paroi avec des panneaux de résidus de paille de colza .. 42
II.1.2.5 Synthèse des propriétés des matériaux 43

II.1.3 Métrologie 43
II.1.3.1 Présentation des capteurs 43
II.1.3.2 Implantation 45
II.1.4 Sollicitations 48
II.1.4.1 Généralités sur les climats 48
II.1.4.2 Sélection des villes 49
II.1.4.3 Conditions caractéristiques pour une journée type de chaque ville 51
II.1.4.4 Scenarii de températures et d'humidités relatives ambiantes intérieure et extérieure réalisés. 55
II.2 Etudes numériques 58
II.2.1 Equations et modèle de base 58
II.2.2 Modélisation de la paroi Terre - Chanvre 59
II.2.2.1 Définition de la composition 59
II.2.2.2 Maillage 60
II.2.3 Conditions de simulation 61
II.2.3.1 Conditions initiales 61
II.2.3.2 Conditions aux limites 61
II.2.3.3 Période de calcul et pas de temps 61
II.2.4 Type de résultats 61
II.3 Méthodes d'analyse des résultats 62
II.3.1 Calcul de la pression de vapeur 62
II.3.2 Analyse sous conditions de gradients de température et de pression de vapeur constants 62
II.3.3 Analyse sous sollicitations cycliques 63
II.4 Conclusion 64

Chapitre III : Etudes à l'échelle de la paroi en ambiance contrôlée Résultats et discussion 65

III.1 Paroi terre chanvre sous gradients de température et de pression de vapeur constants 67
III.1.1 Cinétiques et profils 67
III.1.2 Flux de chaleur et d'humidité, résistances thermiques et hygriques 74
III.1.3 Bilan de l'étude sous condition de gradients constants de température et d'humidité relative 76
III.2 Paroi terre chanvre sous sollicitations cycliques sans ensoleillement 77
III.2.1 Résultats cinétiques 77
III.2.2 Evolution des profils au cours du dernier cycle 84
III.2.3 Flux de chaleur et d'humidité pendant les variations cycliques quotidiennes 89
III.2.4 Stockage et déstockage de la chaleur et de l'humidité pendant les variations cycliques quotidiennes 91
III.3 Paroi terre chanvre sous sollicitations cycliques avec ensoleillement 94
III.3.1 Résultats cinétiques 94
III.3.2 Profils 98

III.3.3 Flux de chaleur et d'humidité 100
III.3.4 Stockage et déstockage de la chaleur et de l'humidité dans la paroi 101
III.4 Paroi terre chanvre - saison d'été et mi-saison avec une sollicitation hygrique en ambiance intérieure 104
III.4.1 Résultats cinétiques 104
III.4.2 Profils 106
III.4.3 Flux de chaleur et d'humidité 107
III.4.4 Stockage et déstockage de la chaleur et de l'humidité dans la paroi 108
III.5 Comparaison aux autres parois - saison d'été 109
III.5.1 Sous conditions de gradients de température et de pression de vapeur constants 109
III.5.1.1 Profils 109
III.5.1.2 Flux de chaleur et résistances thermiques 111
III.5.2 Sollicitations cycliques – été sans ensoleillement 112
III.5.2.1 Profils et analyse dynamique en température 112
III.5.2.2 Flux de chaleur 115
III.5.2.3 Stockage et déstockage de chaleur 115
III.5.3 Sollicitations cycliques - été avec ensoleillement 116
III.5.3.1 Profils 116
III.5.3.2 Flux de chaleur 120
III.5.3.3 Stockage et déstockage de chaleur 120
III.5.4 Sollicitations cycliques -été avec une sollicitation hygrique en ambiance intérieure 121
III.5.4.1 Profils 121
III.5.4.2 Flux de chaleur 124
III.5.4.3 Stockage et déstockage de chaleur 124
III.6 Conclusion 125

Chapitre IV : Etude in-situ à l'échelle du bâtiment 127

IV.1 Présentation de l'étude 128
IV.1.1 Présentation du bâtiment étudié 129
IV.1.2 Métrologie mise en place : mesures de température et d'humidité relative au sein des parois et en ambiance 130
IV.1.3 Climat de HEUDREVILLE (Eure) 132
IV.1.4 Consignes de chauffage 135
IV.2 Fonctionnement de la métrologie et validation des mesures 135
IV.2.1 Validation de la métrologie sur les ambiances extérieures 135
IV.2.2 Homogénéité de l'ambiance intérieure 136
IV.3 Résultats en saison d'été 138
IV.3.1 Réponse thermique du béton de chanvre en saison d'été 138
IV.3.2 Réponse hygrique du béton de chanvre en saison d'été 142
IV.3.3 Ambiance intérieure et confort en saison d'été 146
IV.4 Résultats en saison d'hiver 147

IV.4.1 Réponse thermique du béton de chanvre en saison d'hiver 148
IV.4.2 Réponse hygrique du béton de chanvre en saison d'hiver 149
IV.4.3 Ambiance intérieure et confort en saison d'hiver 151
IV.5 Conclusion 152

Conclusion générale..... 153

Références..... 155

Annexes A I…… A I-1
Annexes A II……... A II-1

Liste des figures

Figure I-1 : schéma explicative de la porosité ouverte et fermée 7
Figure I-2 : la Conductivité thermique du béton de chanvre sec en fonction de la masse volumique (Cérézo……. 2005) 8
Figure I-3 : évolution de la conductivité thermique du béton de chanvre projeté (formulation mur) en fonction de la masse volumique et de la teneur en eau (Collet and Pretot 2014). 9
Figure I-4 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche des formulations (Abbas 2021) 10
Figure I-5 : Représentation schématique de l'adsorption physique d'eau dans un pore au cours de l'isotherme de sorption (Collet 2004) 12
Figure I-6 : Allure de l'isotherme de sorption (Medjelekh 2017) 12
Figure I-7 : Classification des isothermes de sorption (A) et des cycles d'hystérésis (B) selon la IUPAC (Sing et al. 1984) 12
Figure I-8 : Isothermes de sorption de matériaux - HLC béton de chanvre, AAC béton cellulaire, VPB Briques perforées verticalement (Amziane et Arnaud 2013) 13
Figure I-9 : Isothermes d'adsorption-désorption de bétons de chanvre (PHC : préfabriqué, SHC : projeté, MHC : moulé) (Collet et al. 2013) 13
Figure I-10 : (a) Isothermes de sorption de composites terre-chanvre, (b) corrélation entre la teneur en eau et la teneur en chanvre pour différentes humidités relatives. 13
Figure I-11 : Isothermes de sorption de plusieurs bétons biosourcés disponibles dans la littérature (Lagouin 2021) 14
Figure I-12 : Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau de différentes composites biosourcées (Lagouin 2021) 15
Figure I-13 : Plages de classification des matériaux selon leur valeur MBV pratique (Rode et al. 2005) 16
Figure I-14 : Valeur MBV en fonction de la masse volumique (23°C, 50%HR) (Mazhoud 2017) ... 16
Figure I-15 : Evolution de la valeur MBV en fonction de la masse volumique pour différents composites agro-sourcés (triangles : chanvre-paille, ronds : chanvre-liant agro-sourcé, losange : résidus de rafle de maïs-liants agro-sourcés) (Mazhoud et al. 2018) 17
Figure I-16 : dispositif expérimental (Rahim et al. 2017) 18
Figure I-17 : Dimensions du mur test et localisation des capteurs 18
Figure I-18 : Protocoles d'essai et localisation des capteurs 18
Figure I-19 : Evolution de la température et de l'humidité au sein des murs (gauche : béton de chanvre, droite : béton de colza) 19
Figure I-20 : Sollicitations cycliques imposées côté chambre climatique 18
Figure I-21 : Température et humidité relative à différentes positions lorsque le MCP est placé côté ambiance intérieure du mur 19
Figure I-22 : (a) Flux thermique sur la surface latérale ambiante de l'enveloppe ; (b) Différence de flux thermique entre chaque côté de l'enveloppe et la température imposée (à droite) ; (c) Stockage/libération de chaleur par la surface latérale ambiante ; (d) Stockage/libération de chaleur par l'enveloppe et valeur du rapport (à droite). 20
Figure I-23 : dispositif expérimental (Chennouf et al. 2019) 20
Figure I-24 : l'enceinte utilisée par (Medjelekh et al. 2017) 21
Figure I-25 : Evolution de l'humidité relative au sein de la paroi lors d'un créneau 50-80%HR 21
Figure I-26 : Evolution de l'humidité relative au sein de la paroi lors de sollicitations sous créneaux multiples 21
Figure I-27 : Mur test et instrumentation (Collet et Pretot 2014b) 21
Figure I-28 : Mur test de (Latif et al. 2018) 22
Figure I-29 : Résultats de flux de chaleur et quantité de chaleur stockée (Latif et al. 2018) 22
Figure I-30 : Profils de température et d'humidité relative des différentes compostions des murs dans des scénarios d'hiver et d'été en régime permanent (Palomar et al. 2019) 23
Figure I-31 : Dispositif expérimental et mur test de (Douzane et al. 2016) 24
Figure I-32 : comparaison entre les valeurs U de différents murs 24

Figure I-33 : Bâtiment test "Hempod" – Université de Bath 25
Figure I-34 : Température de surface intérieure et extérieure 25
Figure I-35 : Les valeurs U in situ, les valeurs U de conception des systèmes muraux 25
Figure I-36 : implantation des capteurs (Wu et al. 2010) 26
Figure I-37 : implantation des capteurs (Claude 2018) 26
Figure I-38 : Vue de la cellule, composition et instrumentation des parois (Piot et al. 2011)..... 27
Figure I-39 : Cellules tests (Piot et al. 2015)..... 28
Figure I-40 : Instrumentation (Piot et al. 2015) 28
Figure I-41 : Isolation en anas de lin et implantation des capteurs (Brachelet et al. 2020)..... 28
Figure I-42 : Vue et instrumentation de la maison (Medjelekh et al. 2016) 29
Figure I-43 : Maison étudiée, humidité relative intérieure et limites de confort (Medjelekh 2017) .. 29
Figure II-1 : Dispositif expérimental utilisé……35
Figure II-2 : Plages de fonctionnement de l'enceinte bi-climatique : vert chambre 1 simulant l'ambiance intérieure, rouge : chambre 2 simulant l'ambiance extérieure..... 36
Figure II-3 : Convecteurs..... 36
Figure II-4: Evaporateur du groupe frigorifique (1), humidificateur (2) et rampe de diffusion (3) ... 36
Figure II-5: Effet de brassage de l'air – Gauche : chambre intérieure avec brassage de l'air – Droite : chambre extérieure sans brassage de l'air..... 37
Figure II-6: Dispositifs de régulation (a) DR4020, (b) Teddington DZR-45, (c) commutateur manuel de puissance des convecteurs..... 37
Figure II-7: Fonctionnement de l'hygrostat 38
Figure II-8 : Vues intérieure (gauche) et extérieure (droite) des 4 parois testées après les applications des enduits intérieurs et extérieurs 1- Paroi Terre chanvre, 2 – Paroi ISOBIO, 3 – Paroi PVA-Chanvre avec parement en résidus de rafles de maïs, 4 – Paroi en résidus de paille de Colza 38
Figure II-9 : Production du composite – production de la pâte (gauche) et mélange avec le chanvre (droite) 39
Figure II-10 : Mise en œuvre de la paroi terre-chanvre (gauche) et paroi démoulée avant enduit (droite) 39
Figure II-11 : Composition de la paroi Terre - Chanvre 39
Figure II-12 : Mise en œuvre de la paroi ISOBIO - (a) OSB et ossature bois, (b) Biofib Trio 145 mm, (c) panneau CAVAC, (d) membrane intello, (e) Biofib Trio 45 mm, (f) CSB..... 40
Figure II-13 : Constitution de la Paroi ISOBIO - vue en coupe..... 40
Figure II-14 : Production des panneaux PVA-Chanvre – (a) Mélange PVA – chanvre, (b) compactage, (c) étuvage, (d) panneau démoulé 41
Figure II-15 : Mise en œuvre de la paroi - (a) Isolant Biofib Trio posé dans l'ossature bois, (b) panneaux PVA-Chanvre, (c) collage du parement en résidus de rafle de maïs, (d) mise en œuvre de l'enduit 41
Figure II-16 : Composition de la paroi PVA-Chanvre / parement en résidu de rafles de maïs 42
Figure II-17 : Production de panneaux de résidus de paille de colza – (a) macération, (b) filtration, (c) résidus de paille de colza, (d) moulage, (e) panneau de résidus de paille de colza démoulés. 42
Figure II-18 : Mise en œuvre; (a) Isolant Biofib Trio, (b) Panneau en résidus de paille de colza.... 42
Figure II-19 : Composition de la paroi en résidus de colza 43
Figure II-20 : Capteurs sensirion SHT 35 - (a) préparation des capteurs, (b) précision en température, (c) précision en humidité relative 44
Figure II-21 : Vérification des capteurs - (a) solutions salines, (b) courbes d'ajustement..... 44
Figure II-22 : (a) fluxmètre HFP01 - Hukseflu , (b) l'anémomètre TSI 8475 44
Figure II-23 : capteurs placés dans le terre-chanvre 45
Figure II-24 : capteurs placés aux interfaces et à mi- épaisseur de l'isolant 45
Figure II-25 : capteurs placés de chaque côté de la membrane 45
Figure II-26 : Instrumentation des parois en surface et en ambiance - (a) côté intérieur, (b) côté extérieur 45
Figure II-27 : Implantation des capteurs dans les parois : (a) Paroi Terre-Chanvre, (b) Paroi ISOBIO, c) Paroi Maïs : en panneaux de PVA-chanvre avec un parement intérieur en résidus de rafles de maïs, (d) Paroi Colza : en panneaux de résidus de paille de colza..... 46

Figure II-28 : Types de climats en France - 1 : montagnard (Pontarlier), 2 : semi-continental (Strasbourg), 3 : océanique dégradé (Paris), 4 : océanique altéré (Rennes), 5 : océanique franc (Brest), 6 : méditerranéen altéré (Digne), 7 : Bassin du Sud-Ouest (Toulouse), 8 : méditerranéen franc (Montpelier et Ajaccio). 48
Figure II-29 : Types de climats en Tunisie - 1 : humide (Tabarka), 2 : subhumide (Bizerte), 3 : semi-aride à hiver doux (Tunis), 4 : semi-aride à hiver frais (Elkef), 5 : aride à hiver doux (Sfax et Djerba), 6 : aride à hiver frais (Kairouan), 7 : désertique saharien (Tozeur). 49
Figure II-30 : Températures moyennes des min (gauche) et des max (droite) source météo France 1981-2010 ('Méteo France' 2022) 49
Figure II-31 : Humidité relative moyenne pendant 1985-2015, ('World Weather, Time and Date' 1998) (gauche) durée d'ensoleillement pendant 1991-2010, source météo France ('Méteo France' 2022) 50
Figure II-32 : Températures moyennes des minimums (gauche) et des maximums (droite) 1961-1990 ('Méteo Tunisie' 2022) 51
Figure II-33 : Humidité relative moyenne sur la période 2005-2015 (gauche) ('World Weather, Time and Date' 1998) et durée d'ensoleillement sur la période 1961-1990 (droite) ('Méteo Tunisie' 2022) 51
Figure II-34 : Evolution des températures à Rennes en août 2017 ('World Weather, Time and Date' 1998) 52
Figure II-35 : Température moyenne des minimums (gauche) et des maximums (droite) pour Aout pendant 2011-2019, ('Méteo France' 2022) 52
Figure II-36 : Cycles journaliers type aout 2017 pour Rennes ('World Weather, Time and Date' 1998) 52
Figure II-37 : Températures et humidités relatives caractéristiques des villes françaises pendant les différentes saisons 54
Figure II-38 : Températures et humidités relatives caractéristiques des villes tunisiennes pendant les différentes saisons 54
Figure II-39 : Points de consigne intérieurs et extérieurs pendant le test 55
Figure II-40 : Climats simulés des villes françaises et tunisiennes : détail d'un cycle journalier 56
Figure II-41 : Rayonnement solaire au mois d'août ('Diagramme Solaire Intéractif' 2022) – (a) Rennes, (b) Brest 57
Figure II-42 : Climat simulé avec ensoleillement – (a) Rennes, (b) Brest 57
Figure II-43 : Climat simulé de Rennes été sans ensoleillement avec sollicitation hygrique à l'intérieur. 58
Figure II-44 : Présentation générale du logiciel WUFI 58
Figure II-45 : Les propriétés physiques d'entrée pour le logiciel 59
Figure II-46 : Isothermes de sorption des matériaux de la paroi Terre - Chanvre 60
Figure II-47 : Evolution de la conductivité thermique de l'enduit chaux-chanvre (LHR) en fonction de la teneur en eau volumique 60
Figure II-48 : Maillage et position des moniteurs 60
Figure II-49 : Position des capteurs et des moniteurs 60
Figure II-50 : exemple d'ajustement du profil initial de la pression de vapeur 61
Figure II-51 : Identification de la phase de décalage Δt entre la surface et un point donné et de l'amplitude à la surface et en un point donné (exemple de l'amplitude de température ΔT) 63
Figure III-1 : Cinétique de température pendant la phase stabilisation des climats (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba. 68
Figure III-2 : Cinétiques de pression de vapeur pendant la phase stabilisation des climats (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba. 69
Figure III-3 : Profils de température sous gradients de température et de pression de vapeur constants, valeurs moyennes théoriques, expérimentales et numériques sur les dernières 24 h de la phase de stabilisation pour les climats de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba. 72
Figure III-4 : Profils de pression de vapeur sous température et gradients de pression de vapeur constants, valeurs moyennes théoriques, expérimentales et numériques sur les dernières 24 h de la phase de stabilisation pour les climats de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba. 73

Figure III-5 : Cinétiques expérimentales de la température pendant les cycles dynamiques à plusieurs profondeurs dans le mur pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba. 78
Figure III-6 : Cinétiques expérimentales de l'humidité relative pendant les cycles dynamiques à plusieurs profondeurs dans le mur pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba. 79
Figure III-7 : Cinétiques expérimentales de la pression de vapeur pendant les cycles dynamiques à plusieurs profondeurs dans le mur pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba. 80
Figure III-8 : Variation de la température dans la paroi au cours du dernier cycle stabilisé pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba. Résultats expérimentaux : lignes continues ; résultats numériques : lignes pointillées. 82
Figure III-9 : Variation de la pression de vapeur dans la paroi au cours du dernier cycle stabilisé pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba. Résultats expérimentaux : lignes continues ; résultats numériques : lignes pointillées. 83
Figure III-10 : Paramètres thermiques dynamiques en fonction de l'emplacement pour toutes les villes (×/o : calculé pendant le pas de température croissant/décroissant) : (a) Déphasage de la température et valeur théorique pour une couche WFH de 28,8 cm, (b) variation relative de l'amplitude de température par rapport à l'amplitude en surface. 84
Figure III-11 : Paramètres hygriques dynamiques en fonction de l'emplacement pour toutes les villes (×/o : calculés pendant l'étape de pression de vapeur croissante/décroissante) : (a) Déphasage de la pression de vapeur, (b) variation relative de l'amplitude de pression de vapeur par rapport à l'amplitude en surface. 84
Figure III-12 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Rennes. Gauche : valeurs expérimentales ; droite : valeurs numériques. 86
Figure III-13 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Toulouse. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques. 86
Figure III-14 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Strasbourg. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques. 87
Figure III-15 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Brest. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques. 87
Figure III-16 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Kairouan. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques. 88
Figure III-17 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Djerba. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques. 88
Figure III-18 : Flux de chaleur expérimentaux et numériques sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba. 89
Figure III-19 : Flux d'humidité numériques sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba. 90
Figure III-20 : Chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle : (a, b, c) résultats expérimentaux, (a) surface intérieure, (b) surface extérieure, (c) total des deux surfaces, (d, e, f) résultats numériques, (d) surface intérieure, (e) surface extérieure, (f) total des deux surfaces. 92
Figure III-21 : Humidité numérique entrante et sortante pendant le dernier cycle sur chaque surface du mur et total des deux surfaces. 93

Figure III-22 : Cinétique expérimentale de la (a, b) température, (c, d) humidité relative, (e, f) pression de vapeur à plusieurs profondeurs dans le mur, pendant les cycles dynamiques, pour le climat avec ensoleillement de : (a, c, e) Rennes, (b, d, f) Brest. 95
Figure III-23 : Variation de la température dans la paroi au cours du dernier cycle stabilisé pour le climat avec ensoleillement de : (a) Rennes, (b) Brest. Résultats expérimentaux : lignes continues ; résultats numériques : lignes pointillées. 96
Figure III-24 : Variation de la pression de vapeur dans la paroi au cours du dernier cycle stabilisé pour le climat avec ensoleillement de : (a) Rennes, (b) Brest. Résultats expérimentaux : lignes continues ; résultats numériques : lignes pointillées 96
Figure III-25 : Paramètres thermiques dynamiques en fonction de l'emplacement pour Rennes et Brest dans le cas des sollicitations avec ensoleillement (×/o : calculé pendant le palier de température croissant/décroissant) : (a) Déphasage de la température, (b) Variation relative de l'amplitude de température. 97
Figure III-26 : Paramètres hygriques dynamiques en fonction de l'emplacement pour Rennes et Brest dans le cas des sollicitations avec ensoleillement (x/o : calculés pendant le palier de pression de vapeur croissante/décroissante) : (a) Déphasage de la pression de vapeur, (b) Variation relative d'amplitude. 97
Figure III-27 : Profils de température et de pression de vapeur au cours du dernier cycle dynamique avec ensoleillement pour le climat de Rennes. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques. 99
Figure III-28 : Profils de température et de pression de vapeur au cours du dernier cycle dynamique avec ensoleillement pour le climat de Brest. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques. 99
Figure III-29 : Flux de chaleur expérimentaux et numériques sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers avec ensoleillement pour le climat de : (a) Rennes, (b) Brest. 100
Figure III-30 : Flux d'humidité numériques sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers avec ensoleillement pour le climat de : (a) Rennes, (b) Brest. 100
Figure III-31 : Chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle avec ensoleillement : (a, b, c) résultats expérimentaux, (a) surface intérieure, (b) surface extérieure, (c) total des deux surfaces, (d, e, f) résultats numériques, (d) surface intérieure, (e) surface extérieure, (f) total des deux surfaces. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III-32 : Humidité numérique entrante et sortante pendant le dernier cycle avec ensoleillement sur chaque surface du mur et total des deux surfaces. 103
Figure III-33 : Cinétiques expérimentales de la (a) température, (b) humidité relative, (c) pression de vapeur pendant les cycles dynamiques à plusieurs profondeurs dans le mur. 105
Figure III-34 : Cinétiques de (a) température et de (b) pression de vapeur dans la paroi au cours du dernier cycle stabilisé Résultats expérimentaux : lignes continues ; résultats numériques : lignes pointillées. 105
Figure III-35 : Paramètres thermiques et hygriques dynamiques en fonction de l'emplacement pour Rennes dans le cas des sollicitations hygriques intérieure et par rapport à la sollicitation en ambiance extérieure (×/o : calculé pendant le palier de température croissant/décroissant) : (a) Déphasage de la température, (b) Variation relative de l'amplitude de température, (c) Déphasage de la pression de vapeur, (d) variation relative de l'amplitude de pression de vapeur. 106
Figure III-36 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques. 107
Figure III-37 : Evolution des (a) Flux de chaleur expérimentaux et numériques et (b) flux d'humidité numériques sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers. 107
Figure III-38 : Chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle sous sollicitation hygrique en ambiance intérieure : (a) résultats expérimentaux, (b) résultats numériques et (c) humidité numérique entrante et sortante pendant le dernier cycle sur chaque surface du mur et total des deux surfaces. 108
Figure III-39 : Profils de température sous gradients de température et de pression de vapeur constants, valeurs moyennes théoriques et expérimentales sur les dernières 24 h de la

phase de stabilisation : (a) Paroi terre chanvre (b) paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza. 110
Figure III-40 : Profils de pression de vapeur sous gradients de température et de pression de vapeur constants, valeurs moyennes théoriques et expérimentales sur les dernières 24 h de la phase de stabilisation : (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (c) Paroi Colza. 111
Figure III-41 : Profils de température pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza 113
Figure III-42 : Profils d'humidité relative pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza 113
Figure III-43 : Profils de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza 114
Figure III-44 : Paramètres thermiques dynamiques en fonction de l'emplacement par rapport à la sollicitation en ambiance extérieure pour les différentes parois sans ensoleillement (x/o : calculé pendant le palier de température croissant/décroissant) : (a) Déphasage de la température, (b) Variation relative de l'amplitude de température. 114
Figure III-45 : Flux de chaleur expérimentaux sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers des parois : (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza..... 115
Figure III-46 : Chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle :résultats expérimentaux, (a) surface intérieure, (b) surface extérieure, (c) total des deux surfaces 116
Figure III-47 : Profils de température pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique avec ensoleillement (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza. 118
Figure III-48 : Profils d'humidité relative pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique avec ensoleillement (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza..... 118
Figure III-49 : Profils de la pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique avec ensoleillement, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza..... 119
Figure III-50 : Paramètres thermiques dynamiques en fonction de l'emplacement par rapport à la sollicitation en ambiance extérieure pour les différentes parois avec ensoleillement (x/o : calculé pendant le palier de température croissant/décroissant) : (a) Déphasage de la température, (b) Variation relative de l'amplitude de température. 119
Figure III-51 : flux de chaleur expérimentaux sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers des parois : (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza..... 120
Figure III-52 : Chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle : résultats expérimentaux, (a) surface intérieure, (b) surface extérieure, (c) total des deux surfaces 121
Figure III-53 : profils de la température pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza 122
Figure III-54 : profils d'humidité relative pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza. 123
Figure III-55 : profils de la pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza. 123
Figure III-56 : flux de chaleur expérimentaux sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers des parois : (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza..... 124
Figure III-57 : chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle : (a, b, c) résultats expérimentaux, (a) surface intérieure, (b) surface extérieure, (c) total des deux surfaces 125

Figure IV-1 : Façade principale (Sud-sud est) du bâtiment avant et après rénovation 127
Figure IV-2 : Localisation de l'instrumentation 128
Figure IV-3 : Implantation des capteurs en partie courante du béton de chanvre sur la paroi sud (C) et nord (E) 129
Figure IV-4 : Implantation des capteurs au sein du béton de chanvre en paroi sud 129
Figure IV-5 : Implantation des capteurs à l'interface béton de chanvre-enduit intérieur et en surface intérieure (en attente) en paroi sud 129
Figure IV-6 : Implantation des capteurs à l'interface béton de chanvre - enduit extérieur et en surface extérieure (en attente) en paroi sud 129
Figure IV-7 : Implantation des capteurs en ambiances extérieure et intérieure en paroi sud 129
Figure IV-8 : Implantation des capteurs au sein du béton de chanvre en paroi nord 130
Figure IV-9 : Implantation des capteurs l'interface béton de chanvre-enduit intérieur et en surface intérieure (en attente) en paroi nord 130
Figure IV-10 : Implantation des capteurs en surface et en ambiance extérieures en paroi nord .. 130
Figure IV-11 : Implantation du capteur en ambiance intérieure en paroi nord 130
Figure IV-12: Température moyenne des maximums, minimums et moyens annuels type d'Evreux (Eure) ('World Weather, Time and Date' 1998) 1985-2015 131
Figure IV-13 : Humidité relative moyenne type station d'Evreux (Eure) ('World Weather, Time and Date' 1998) 1985-2015 131
Figure IV-14: les températures moyennes des maximums et des minimums annuels, les records, ensoleillement, et précipitations type d'Evreux (Eure) ('Méteo France' 2022) 1981-2010 132
Figure IV-15 : Comparaison des années 2018, 2019 et 2020 aux normales mensuelles (1981-2010) – haut : températures, bas : précipitations 133
Figure IV-16: Séquence météorologique de juin 2020 133
Figure IV-17: Comparaison des mesures d'ambiance extérieure, côté Nord et côté Sud, avec les données météo France - août 2019, février 2020 134
Figure IV-18 : Comparaison des mesures d'ambiance extérieure au pas horaire, côté Nord et côté Sud, avec les données météoblue ; couverture nuageuse et précipitation – haut : 01-16 août 2019, bas : 14-29 février 2020 135
Figure IV-19 : Température i et humidité relative ambiantes intérieures en été au voisinage des parois C : sud, E: nord et G : plancher haut 136
Figure IV-20 : Température et humidité relative ambiantes intérieures en hiver au voisinage des différentes parois (C : sud, E: nord G : plancher haut), bâtiment chauffé 136
Figure IV-21: Ambiance intérieure et météo en juin et juillet 2020 137
Figure IV-22 : Evolution cinétique des températures au sein des parois en périodes représentatives (juin et juillet 2020), gauche : paroi sud, droite : paroi nord. 138
Figure IV-23 : Evolution cinétique des températures au sein des parois en période chaude (juin 2020), gauche : paroi sud, droite : paroi nord. 138
Figure IV-24: Evolution cinétique des températures au sein des parois lors de journées avec de faibles amplitudes de températures avec un temps nuageux et pluvieux (juillet 2020), gauche : paroi sud, droite : paroi nord. 138
Figure IV-25 : Déphasage et amplitude relative à l'amplitude en surface extérieure de la température sur l'épaisseur de la paroi sud en période représentative (17/06/2020), nuageuse (14/07/2020) et chaude ensoleillée (23/06/2020) 139
Figure IV-26 : Profils de Températures au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en période représentative (15 juin 2020 nuageuse et 21 juillet 2020 ensoleillée). 140
Figure IV-27 Profils de températures au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en périodes chaudes (gauche : 25 juin 2020) et en période de faible variations journalières par temps nuageux (droite : 14 juillet 2020) 140
Figure IV-28 : Evolution cinétique au sein de la paroi sud en période représentative (juin 2020), gauche : humidité relative, droite Pv 141
Figure IV-29 : Evolution cinétique d'humidité relative au sein de la paroi sud en périodes chaudes (juin 2020), gauche : humidité relative, droite Pv 141
Figure IV-30 : conditions météo à Heudreville en juin 2020 ('Méteo Blue' 2022) 141

Figure IV-31 : Evolution de la température, de l'humidité relative et de la pression de vapeur en ambiance extérieure sud (Cext), en surface extérieure de la paroi sud (C6) et dans la paroi (C4)..... 142
Figure IV-32 : Déphasage et amplitude relative à l'amplitude en surface extérieure de la pression de vapeur sur l'épaisseur de la paroi sud en période représentative (17/06/2020), nuageuse (14/07/2020) et chaude ensoleillée (23/06/2020) 142
Figure IV-33 : Profils d'humidité relative au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en période représentative (15 juin et 21 juillet 2020). 143
Figure IV-34 Profils d'humidité relative au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en périodes chaudes (gauche : 25 juin 2020) et en période de faible variations journalières par temps nuageux (droite : 14 juillet 2020) 143
Figure IV-35 : Profils d'humidité relative au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en période représentative (15 juin et 21 juillet 2020). 144
Figure IV-36 Profils d'humidité relative au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en périodes chaudes (gauche : 25 juin 2020) et en période de faible variations journalières par temps nuageux (droite : 14 juillet 2020) 144
Figure IV-37 : Evolution des Températures d'ambiances intérieures et extérieures des parois sud et nord pour les périodes représentatives des normales saisonnières (haut juin 2018 et 2020), et pour des périodes chaudes (bas août 2019 et juin 2020) 145
Figure IV-38: Diagrammes de confort pour juin et juillet 2020 : polygone de confort – 1 point toutes les heures (gauche) et diagramme de confort adaptatif – valeurs moyennes sur 24h (droite) 146
Figure IV-39 : Ambiance intérieure et météo en novembre 2019 (gauche) et février 2020 (droite) 146
Figure IV-40 : Profils de température températures au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud sur des jours représentatifs de l'hiver sans soleil (gauche : 18/11/2019 et 05/02/2020) et avec soleil (droite : 19/11/2019 et 06/02/2020)..... 147
Figure IV-41 : Profils d'humidité relative au sein de la partie courante en béton de chanvre sur des jours représentatifs de l'hiver sans soleil (gauche) et avec soleil (droite). 148
Figure IV-42: Cinétique d'humidité relative au mois de février 2020, en partie courante en béton de chanvre..... 148
Figure IV-43 : Profils de pression de vapeur au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud sur des jours représentatifs de l'hiver sans soleil (gauche : 18/11/2019 et 05/20/2020) et avec soleil (droite : 19/11/2019 et 06/02/2020)..... 149
Figure IV-44 : Report des ambiances intérieures sur le polygone de confort en novembre 2019 (gauche) et février 2020 (droite) – 1 point toutes les 5 minutes..... 150

Liste des tableaux

Tableau II-1 : Plages de température et d'humidité relative des chambres climatiques 35
Tableau II-2 : Propriétés multi-physiques des matériaux utilisés dans les parois test 43
Tableau II-3 : Instrumentation des parois - référence des capteurs et profondeur par rapport à la surface intérieure 47
Tableau II-4 : Ambiances intérieures 53
Tableau II-5 : Températures et humidités relatives caractéristiques des villes françaises et tunisiennes sélectionnées, cellules grisées : essai non réalisé, écriture de couleur : conditions similaires 53
Tableau II-6 : Teneur en eau volumique à 80 % et paramètres du modèle GAB des matériaux de la paroi Terre - Chanvre 60
Tableau II-7 : Position des moniteurs 60
Tableau III-1 : Flux de chaleur expérimentaux et valeurs R_h à la fin de la phase de stabilisation .. 75
Tableau III-2 : Flux de chaleur numérique et valeurs R_h à la fin de la phase de stabilisation 75
Tableau III-3 : Flux de chaleur numériques et valeurs R_h après 180 jours sous des gradients de température et de pression de vapeur constants. 75
Tableau III-4 : Flux d'humidité numériques et valeurs R_m à la fin de la phase de stabilisation. 76
Tableau III-5 : Flux d'humidité numériques et valeurs R_m après 300 jours. 76
Tableau III-6 : Flux de chaleur expérimentaux et valeurs R_h à la fin de la phase de stabilisation. 111
Tableau IV-1 : Dosage des mortiers et bétons de chanvre 128
Tableau IV-2: Synthèse des capteurs en partie courante du béton de chanvre (C : paroi sud et E : paroi nord) 131

Nomenclature

Symboles latins

a	Diffusivité thermique [m².s^{-1}]
C_1, C_2	Paramètres d'ajustement du model GAB [-]
C_p	Chaleur massique [J/(kg.K)]
D_φ	Coefficient de diffusion en phase liquide [kg.m/s]
e	Epaisseur [m]
E	Effusivité thermique [J·K^{-1}·m^{-2}·s$^{-1/2}$]
G	Perméance de la paroi [kg/(m².s.Pa)]
h	Coefficients de transfert thermique [W/ m^2.K]
H	Enthalpie [J]
HR	Humidité relative [%]
L_v	Chaleur latente de vaporisation [J/kg]
m	Masse [kg]
MBV	Valeur tampon hydrique [g/m² %HR]
Pv_{sat}	Pression partielle de la vapeur d'eau saturée dans l'air [Pa]
Pv	Pression de vapeur [Pa]
Q_h	Chaleur totale de la paroi [W/m²]
Q_m	Quantité d'eau totale de la paroi [kg/m²]
R_h	Résistance thermique de conduction de la paroi [m².K/W]
R_m	Résistance hygrique interne de la paroi [m².s.Pa/kg]
S	Surface d'échange [m^2]
S_d	Épaisseur d'air équivalente [m]
t	Temps [h ou s]
T	Température [°C]
U	Coefficient de transmission thermique des parois [W.m^{-2}.K^{-1}]
w	Teneur en eau massique [g/g]
w_{mono}	Teneur en eau massique monomoléculaire [g/g]
W	Teneur en eau volumique [kg/m^3]
W_{80}	Teneur en eau volumique à 80% HR [kg/m^3]

Symboles Grecs

α	Absorptivité [-]
β	Coefficient de transfert d'humidité [kg/(m².s.Pa)]
λ	Conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
δ_p	Perméabilité à la vapeur du matériau [$kg.s^{-1}.m^{-1}.Pa^{-1}$]
ρ	Masse volumique [kg/m^3]
ε	Porosité [-]
μ	facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau du matériau [-]
φ	Humidité relative [-]
φ_h	Densité de flux de chaleur [W/m^2]
φ_m	Densité de flux d'humidité [$kg/(m^2.s)$]
ϕ_r	Rayonnement solaire direct normal [$W.m^{-2}$]
π_{air}	Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air 1,85E10-10 [kg/(m.s.Pa)]

Indices

0	Relatif à l'état sec
e	Relatif à l'ambiance extérieur
h	Relatif au phénomène thermique
i	Relatif à l'ambiance intérieur
m	Relatif au phénomène hygrique
max	Relatif au maximum
min	Relatif au minimum
s	Relatif à la surface

Introduction générale

Le développement durable est un enjeu crucial dans le contexte actuel et pour les prochaines décennies. La nécessité de limiter l'impact de l'activité humaine sur l'environnement est devenue un enjeu prioritaire dans de nombreux secteurs. Le secteur du bâtiment représente une des plus grandes sources de consommation d'énergie. Selon l'Agence Internationale de l'Energie, la construction et l'utilisation des bâtiments représentent environ 36% de la consommation mondiale d'énergie en 2017, dont 30% pour la phase d'utilisation (Figure 1) ('IEA (2018), Buildings: Tracking Clean Energy Progress' 2018).

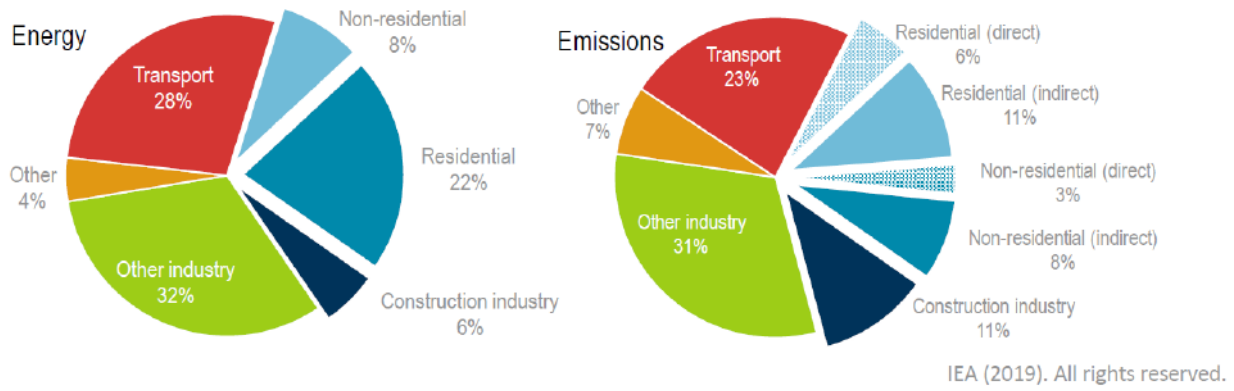


Figure 1 : Consommation énergétique et émissions mondiales par secteur ('IEA (2018), Buildings: Tracking Clean Energy Progress' 2018)

En France, en 2019, le secteur du bâtiment représente 43% de la consommation d'énergie et 14% des émissions de gaz CO_2. Le chauffage représente 65% de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel et 43% dans le secteur tertiaire. La part d'énergie consommée pour le refroidissement est faible pour le secteur résidentiel et représente 9% dans le secteur tertiaire ('Données et Études Statistiques' 2022).

Dans les pays à climat chaud, le recours aux systèmes de climatisation est souvent à l'origine de pics de consommations énergétiques très élevés. En Tunisie, par exemple, le secteur du bâtiment représente 27% de la consommation totale d'énergie du pays (16% pour le secteur résidentiel et 11% pour le secteur tertiaire) ('Agence Nationale Pour La Maitrise de l'énergie' 2013). Selon (Bettaieb 2018), depuis 2000, le pic de consommation électrique s'est déplacé vers le milieu de la journée en été du fait de l'utilisation intensive de la climatisation, utilisation qui s'accentue en lien avec l'augmentation du nombre de climatiseurs de 28% observée entre 1999 et 2004 (Daouas, Hassen, and Aissia 2010).

Dans ce contexte, le développement de matériaux de construction à faibles impacts environnementaux et à hautes performances hygrothermiques s'intensifie afin de réduire à la fois la consommation d'énergie et de matières premières non renouvelables tout en assurant un confort élevé pour les occupants. Dans ce cadre, les matériaux biosourcés font l'objet de nombreuses études qui montrent qu'ils sont susceptibles de répondre à ces objectifs. Les matériaux développés sont caractérisés d'un point de vue multiphysique, et en particulier thermique et hygrique, à l'échelle du matériau. Il s'agit ensuite d'analyser leur comportement hygrothermique à des échelles plus importantes telles que celles de la paroi ou du bâtiment afin de valider leurs performances, en considérant des parois multicouches. A ces échelles, il est possible de mettre en évidence les effets

d'inertie thermique et hydrique susceptibles d'engendrer des réductions de consommation énergétique et un meilleur confort en toute saison. En hiver, l'inertie thermique contribue à l'optimisation des apports solaires en les déphasant entre le jour et la nuit à condition qu'elle soit accompagnée d'une isolation performante. En été, elle garantit un meilleur confort en accumulant la chaleur au cours de la journée et en l'évacuant la nuit par la ventilation concourant de cette façon à réduire les pics de température à l'intérieur du bâtiment le jour suivant. En toutes saisons, l'inertie hygrique contribue à la régulation passive de l'humidité relative ambiante intérieure.

Cette thèse propose une étude expérimentale et numérique du comportement hygrothermique des matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi et du bâtiment. Elle s'inscrit dans le cadre d'une cotutelle entre le Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique de l'Université de Rennes1 en France et le laboratoire de Génie Mécanique des Fluides Appliquées, Génie des Procédés et Environnement à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax ENIS de l'Université de Sfax en Tunisie. Les matériaux investigués font suite aux travaux précédents au LGCGM portant sur le développement de différents matériaux bio-sourcés.

La première échelle de caractérisation est celle de la paroi. Au niveau expérimental, le mur test est implanté en mur séparatif de deux chambres climatiques contrôlées en température et humidité. Ce mur est constitué de quatre parois multicouches mettant respectivement en jeu divers matériaux bio-sourcés : une paroi composée d'un composite terre chanvre développé dans le cadre de la thèse de (Mazhoud 2017), une solution issue du projet ISOBIO ('Isobio Project' 2015), une paroi incluant des panneaux réalisés avec un composite à base de paille de colza (Viel 2018) et une paroi dont le parement intérieur est constitué d'un composite issu de rafles de maïs (Viel 2018). Le mur test est alors soumis à différentes sollicitations : des gradients de température et de pression de vapeur constants ou des cycles dynamiques. Les températures et humidités relatives considérées sont basées sur des jours types correspondant à des climats français ou tunisiens. Du fait du fonctionnement du dispositif expérimental, les parois sont étudiées sous des climats représentatifs d'été. Dans un premier temps, l'ensoleillement n'a pas été considéré, ce qui est représentatif de jours nuageux, de parois situées au nord ou qui subissent des effets de masques. L'ensoleillement a été ensuite pris en compte en calculant une température et une humidité relative équivalentes à partir du rayonnement solaire. Enfin, l'effet d'une charge hydrique en ambiance intérieure a été envisagé.

Les mesures expérimentales incluent la température et l'humidité relative en ambiance, en surface et à différentes positions dans les parois, ainsi que les flux de chaleurs échangés sur les faces intérieures et extérieures des parois. Les mesures de température et d'humidité relative au cours du temps et à différentes positions permettent le calcul des pressions de vapeur aux mêmes instants et aux mêmes positions. A partir de ces mesures, il est possible d'analyser les cinétiques des différentes grandeurs, l'évolution de leurs profils sur un jour type. Les essais réalisés sous gradient de température et de pression de vapeur constants permettent d'évaluer les résistances thermiques des parois. Les essais réalisés en cycle dynamique sont analysés vis-à-vis des variations d'amplitude du signal par rapport au signal de surface, des déphasages et des bilans de flux de chaleur échangés lors d'une journée. L'analyse porte d'abord sur la paroi terre-chanvre pour plusieurs climats, puis compare aux résultats obtenus pour les autres parois. Au niveau numérique, la paroi terre chanvre est étudiée à l'aide du logiciel commercial WUFI Pro 6.5 basé sur le modèle de KUNZEL (Künzel 1995). Les mêmes phases de sollicitations sont considérées pour comparaison avec les résultats expérimentaux. L'étude sous gradient constant de température et de pression de vapeur a également été poursuivie numériquement jusqu'au régime permanent. Les résultats numériques permettent en plus d'accéder aux résistances hygriques et aux flux d'humidité échangés lors d'une journée.

La deuxième échelle de caractérisation est celle du bâtiment. Elle concerne un bâtiment rénové en béton de chanvre située en Normandie. Cette étude présente les températures, humidités relatives et pressions de vapeur en ambiance, en surface et au cœur des parties courantes en béton de chanvre, pour des saisons d'été et d'hiver, sous forme de cinétiques et de profils. Le confort thermique est également évalué.

Le travail de thèse présenté dans ce mémoire s'articule de la façon suivante :

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique générale sur les propriétés hygrothermiques des matériaux biosourcés, sur des études menées tant à l'échelle de la paroi que du bâtiment ainsi que sur des outils de simulations qui peuvent être utilisés pour réaliser ces études numériquement.

Le deuxième chapitre s'intéresse aux méthodes utilisées pour l'étude à l'échelle de la paroi. Il décrit le dispositif expérimental utilisé, les compositions des parois étudiées et leur instrumentation. Il donne les sollicitations retenues pour l'étude, établies à partir des différents climats français et tunisiens. Il présente ensuite le logiciel utilisé pour les simulations et détaille le traitement des données expérimentales et numériques.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux et numériques obtenus sous différentes sollicitations et leur analyse dans l'étude à l'échelle de la paroi.

Le quatrième chapitre est dédié à l'étude expérimentale sur le bâtiment rénové en béton de chanvre et situé en Normandie. Il présente les méthodologies et la métrologie avant de détailler les résultats.

Chapitre I Synthèse bibliographique : comportement hygrothermique des matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi et du bâtiment

Sommaire

I.1 Propriétés des matériaux biosourcés 6
I.1.1 Masse volumique et porosité 6
I.1.2 Caractéristiques thermiques 8
I.1.2.1 Conductivité thermique 8
I.1.2.2 Effusivité thermique et capacité thermique 10
I.1.3 Caractéristiques hygriques 11
I.1.3.1 Isotherme de sorption 11
I.1.3.2 Perméabilité à la vapeur 15
I.1.3.3 Valeur tampon hygrique (MBV) 16
I.2 Etude expérimentale du comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi 18
I.3 Etude expérimentale du comportement hygrothermique à l'échelle du bâtiment 25
I.4 Modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité 29
I.4.1 Modèles mathématiques des transferts couplés de chaleur et d'humidité 30
I.4.1.1 Modèle de Philip et De Vries 30
I.4.1.2 Modèle de Luikov 30
I.4.1.3 Modèle de Kunzel 30
I.4.2 Simulation numérique des phénomènes 31
I.5 Conclusion 32

L'enveloppe d'un bâtiment est soumise à des gradients de température et d'humidité (différence entre l'ambiance intérieure et extérieure) et est ainsi le siège d'un grand nombre de phénomènes d'échanges thermiques et hygriques, couplés et transitoires. Le comportement hygrothermique de l'enveloppe conditionne les besoins énergétiques du bâtiment et le confort ressenti par les usagers. Dans des conditions extrêmes ou en cas de mauvaise conception, le comportement hygrothermique peut aussi être la cause de dommages causés à l'enveloppe (dommages structurels, réduction de la capacité d'isolation thermique, condensation superficielle, développement de moisissures préjudiciables à la fois à l'esthétique du bâtiment et à la santé des occupants).

Le contexte environnemental actuel a conduit au développement de matériaux bio-sourcés pour la conception des enveloppes de bâtiment et à leur caractérisation multiphysique. Une fois les propriétés hygrothermiques connues, il est nécessaire de s'intéresser au comportement à l'échelle de la paroi puis à l'échelle du bâtiment.

Dans un premier temps, ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les propriétés hygrothermiques de matériaux bio-sourcés. Ensuite il présente différentes études réalisées à l'échelle de la paroi ou du bâtiment permettant d'identifier les différents dispositifs et traitements des résultats.

I.1 Propriétés des matériaux biosourcés

Les matériaux biosourcés sont des matériaux dont la matière première est issue de biomasse animale ou végétale. L'intérêt pour ces matériaux a nettement augmenté ces deux dernières décennies. Ils peuvent être utilisés en remplacement des matériaux de construction classiques, tant en neuf qu'en rénovation des bâtiments. Ils doivent présenter des propriétés multiphysiques au moins équivalentes à celles des matériaux qu'ils remplacent. En outre, ils présentent un intérêt en terme de stockage carbone.

Les matériaux biosourcés peuvent assurer une ou plusieurs fonctions dans le domaine de la construction : matériau porteur ou de remplissage, isolant, enduit.

Les ressources dont ils sont issus sont nombreuses : le bois, la paille, le chanvre, la laine de mouton, le lin, la balle de céréales, le liège, le coton, le colza, la moelle de maïs et de tournesol…Ces ressources conduisent à des matières premières sous différentes formes : fibres, granulats.

I.1.1 Masse volumique et porosité

Le milieu poreux est caractérisé par les trois phases qui le composent ; phase solide, phase liquide et phase gazeuse. Les phases liquide et gazeuse sont contenues dans les espaces vides ou les cavités du matériau (les pores). La phase solide forme quant à elle la matrice solide.

La masse volumique apparente ρ_{app} est le ratio de la masse de l'échantillon sur son volume :

$$\rho_{app} = \frac{m_{sec}}{V_t} \qquad \text{I-1}$$

Avec m_{sec} (kg) est la masse sèche et V_t (m^3) est le volume total de l'échantillon.

La porosité est la fraction volumique de pores dans le matériau. Elle ne dépend pas des fluides qui les remplissent. Elle est comprise entre 0 et 1. La porosité peut être ouverte ou fermée. La porosité totale correspond à la somme des porosités ouverte et fermée (Figure I-1) :

$$n = \frac{Vpores}{Vt} \qquad \text{I-2}$$

Avec n est la porosité (-), V_{pores} est le volume des pores et V_t est le volume total du matériau.

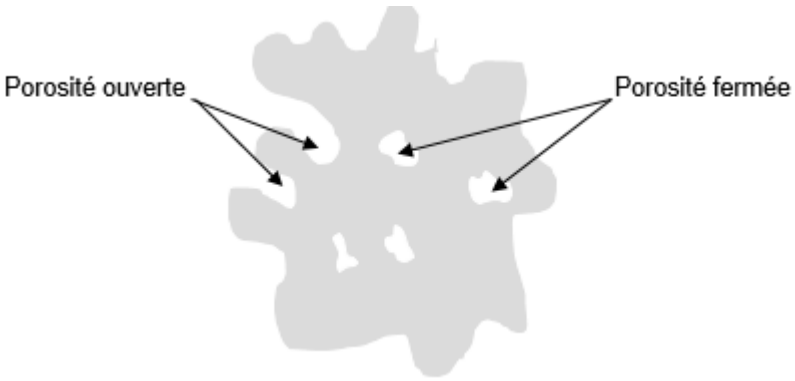


Figure I-1 : schéma explicative de la porosité ouverte et fermée

Selon les fonctions pour lesquelles ils sont utilisés, les matériaux bio-sourcés présentent différentes gammes de masses volumiques.

Les isolants présentent des masses volumiques comprises entre 20 et 70 kg/m^3, comme par exemple la laine de chanvre 25 à 35 kg/m^3, la laine de lin 20 à 25 kg/m^3, la ouate de cellulose 30 à 70 kg/m3, les bottes de paille 75 kg/m^3 (technique de l'ingénieur 2012).

Les composites présentent une large gamme de masse volumique qui dépend de leur composition (type de granulats, type de matrice liante) et de leur mode de fabrication. En outre, leur formulation (dosage en liant) est adaptée à l'usage auquel ils sont destinés.

Les composites développés dans le cadre de la thèse de Marie Viel (Viel 2018) sont fabriqués avec différents types de granulats (chènevottes, anas de lin, paille de colza, rafles de maïs) et des liants agro-sourcés (extraits de lin, extraits de rafles de maïs, liqueur noire…). Les composites fabriqués à base de chènevottes, anas de lin, paille de colza présentent des masses volumiques de 100 à 200 kg/m^3 avec une porosité totale de l'ordre de 80-90 %. Ceux produits avec des rafles de maïs sont plus denses, avec une masse volumique de l'ordre de 500 kg/m^3 et une porosité totale d'environ 60%.

Trois matériaux issus de l'agriculture sont étudiés dans la thèse de Palumbo (Palumbo 2015): Paille d'orge, moelle de tournesol et bale de riz en vrac. Ils sont liés avec une matrice à base d'amidon ou de l'alginate avec addition de sulfate de calcium. Les masses volumiques sont comprises entre 20 et 240 kg/m^3. Elle a démontré qu'il existe d'importantes variations de la microstructure des agrégats végétaux, influant sur les propriétés des matériaux obtenus. La paille d'orge, très poreuse, possède une porosité bimodale autour de 2 µm et 10 µm alors que la balle de riz sera plus dense avec une porosité unimodale autour de 8 µm. Au sein d'une même variété, un agrégat végétal, selon sa provenance, c'est-à-dire selon le climat sous lequel il a été cultivé et le traitement qu'il a subi, possédera une microstructure particulière.

Le béton de chanvre est un mélange de chènevottes, de liant et d'eau. Pour des liants à base de chaux, (Collet et Pretot 2014) rapportent l'effet de la formulation sur la masse volumique et la porosité. Pour des formulations de type toit, les masses volumiques sont de 250 kg/m^3 avec des porosités totales de l'ordre de 85 %, pour des formulations de type mur elles sont respectivement de l'ordre de 400 kg/m^3 et 75 à 80%. Pour les bétons de chanvre, des valeurs sont similaires aux valeurs citées précédemment sont trouvées dans (Chabannes et al. 2014) : 350 à 600 kg/m^3, avec des porosités de 75 à 83%, ainsi que dans (Rahim et al. 2015) autour de 480 kg/m^3 et (Del Valle-Zermeño et al. 2016) qui trouvent une masse volumique apparente de 600 kg/m^3.

Pour des composites à base de chanvre avec une matrice à base de terre, selon le dosage en chanvre, des masses volumiques comparables à celles des bétons de chanvre sont obtenues dans (Mazhoud et al. 2018), entre 370 à 580 kg/m^3 ainsi que dans (Busbridge et Rhydwen 2010), 320 à 750 kg/m^3.

(Chabannes et al. 2014) ont également étudié des composites à base de chaux et de balle de riz, les masses volumiques sont plus fortes : 500 à 740 kg/m^3, avec des porosités totales entre 56% et 65%.

(Lagouin et al. 2019) ont étudiés deux types de bio-agrégats disponibles localement issus du maïs et du tournesol, et deux types de matrices de liant, à base de métakaolin et de chaux. Les masses volumiques obtenues sont de l'ordre de 500 kg/m3, avec des porosités d'environ 70 %.

(Wei et al. 2019) ont réalisé une étude comparative de composites à base de tige broyée de maïs, avec deux types de liant : du ciment de phosphate de magnésium et du ciment Portland ordinaire, avec des dosages granulats / liant identiques. Ils obtiennent des masses volumiques de 785 kg/m^3 avec une porosité totale de 65 % avec le ciment portland et 950 kg/m^3 et 60% pour le ciment de phosphate de magnésium.

Enfin, (Brouard 2018) a développé des composites à base d'argile avec différents granulats : des tiges de colza, des écorces et de la moelle de tournesol. Les masses volumiques obtenues sont de 250 à 430 kg/m^3 pour l'argile-colza, 400 à 580 kg/m^3 pour l'argile – écorce de tournesol, 230 à 350 kg/m^3 pour l'argile – moelle de tournesol et 250 à 450 kg/m^3 pour l'argile - écorce et moelle de tournesol.

I.1.2 Caractéristiques thermiques

I.1.2.1 Conductivité thermique

Dans un milieu poreux, à l'échelle microscopique, les phénomènes de convection et de rayonnement s'additionnent à la conduction. Dans les conditions usuelles rencontrées dans les bâtiments, la convection et le rayonnement sont négligeables car ils sont très faibles par rapport à la conduction. Le terme conductivité thermique associé à l'échelle macroscopique inclus l'ensemble des phénomènes se produisant à l'échelle microscopique.

La densité de flux thermique transféré est relié au gradient de température par la loi de Fourier selon l'équation :

$$\varphi = -\lambda.\mathrm{grad}T \qquad \text{I-3}$$

Avec : λ est la conductivité thermique apparente du matériau en W.m^{-1}.K^{-1}

La conductivité thermique représente une propriété intrinsèque du matériau, elle présente son aptitude à se laisser traverser par la chaleur. A l'échelle d'une paroi plane, la résistance thermique est déterminé comme le rapport de l'épaisseur du matériau sur la conductivité thermique.

De façon générale, la conductivité thermique dépend de la masse volumique, de la température et de la teneur en eau.

La dépendance linéaire entre conductivité thermique et masse volumique est observée dans de nombreux travaux (Cérézo 2005), (Collet et al. 2015), (Dartois et al. 2017), (Nguyen et al. 2016) et (Benfratello et al. 2013).

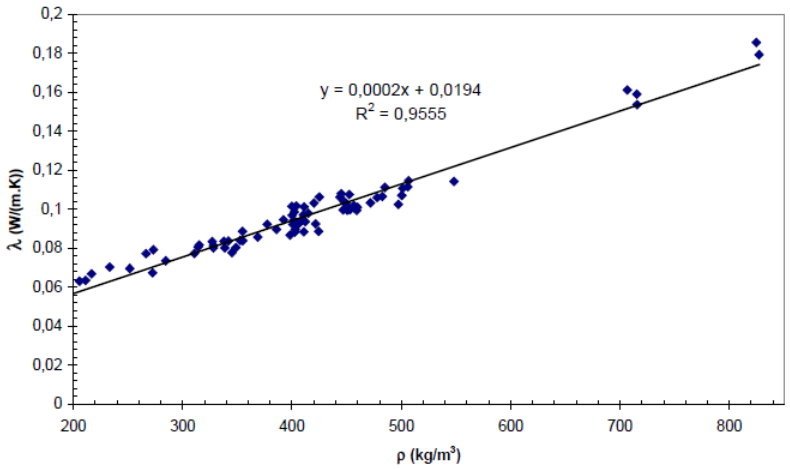


Figure I-2 : la Conductivité thermique du béton de chanvre sec en fonction de la masse volumique (Cérézo 2005)

L'effet de la teneur en eau sur la conductivité thermique est étudié sur différents matériaux tels que du béton de chanvre, des enduits à base de chaux, de la bentonite et du pisé (Cérézo 2005), (Evrard 2006), (Evrard 2008), (Tang et al. 2008) (Hall et Allinson 2009), (De Bruijn et Johansson 2013), (Collet et Pretot 2014), (Tran Le et al. 2020). Ils ont constaté que la conductivité augmente avec la teneur en eau et proposent des corrélations reliant ces deux paramètres. Différentes méthodes d'homogénéisation sont utilisées, comme par exemple dans (Collet et Pretot 2014) où l'évolution de la conductivité en fonction de la masse volumique et de la teneur en eau est modélisée par méthode auto-cohérente (Figure I-3).

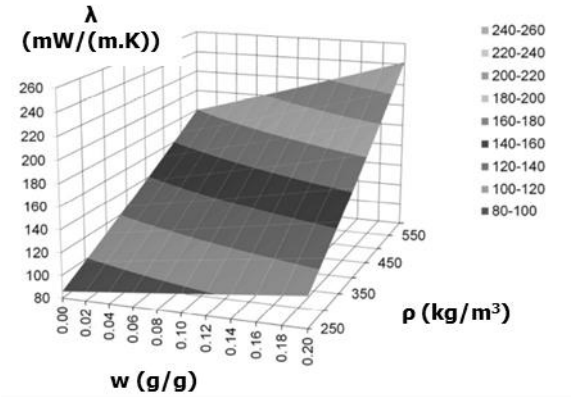


Figure I-3 : évolution de la conductivité thermique du béton de chanvre projeté (formulation mur) en fonction de la masse volumique et de la teneur en eau (Collet and Pretot 2014).

La conductivité des bétons de chanvre est faible, en lien avec leur faible masse volumique (Cérézo 2005) , (Collet 2004) , (Nguyen 2010), (Collet et al. 2013). Elle est généralement comprise entre 0,06 et 0,19 W/ (m.K) pour des masses volumiques sèches variant de 200 à 850 kg/m^3. (Dhakal et al. 2017) donnent des conductivités entre 0,074 et 0,103 W/(m.K). (Walker et al. 2014) déterminent des valeurs de conductivité thermique entre 0,117 et 0,138 W/(m.K) pour des bétons de chanvre de masses volumiques comprises entre 510 et 630 kg/m3. La même plage de valeurs a été mesurée par (De Bruijn et Johansson 2013), (Dinh et al. 2015), (Evrard 2008) pour des bétons de chanvre à base de chaux et de métakaolin. (Benfratello et al. 2013) donnent des conductivités entre 0,0899 et 0,1408 W/(m.K) pour des masses volumiques comprises entre 369 et 611 kg/m^3.

Pour le béton contenant des tiges broyées de tournesol (Magniont et al. 2012) trouvent des valeurs de conductivité comprises entre 0,115 et 0,25 W/(m.K).

Pour les bétons de liège, (Sotehi 2010) étudie les conductivités thermiques en fonction de la teneur en granulats et de la teneur en eau. L'objectif est de réaliser un béton isolant, porteur et de maniabilité fluide, facile à mettre en œuvre. Plus la teneur en liège est importante, plus la conductivité thermique est faible. Elle constate une augmentation significative de la conductivité entre 0 et 10% de teneur en eau puis une augmentation plus faible dans l'intervalle [10%, 15%].

Pour les composites en terre chanvre, et comme pour les bétons de chanvre, les conductivités thermiques sont corrélées au dosage en chanvre et à la masse volumique. Les conductivités sont comprises entre 0,09 à 0,22 W/(m.K) (Busbridge et Rhydwen 2010) et entre 0,09 à 0,12 W/(m.K) au point sec (Mazhoud et al. 2018).

Les composites à base d'argile avec différents granulats : des tiges de colza, des écorces et de la moelle de tournesol développés dans (Brouard 2018) ont des conductivités thermiques. Les 0,065 à 0,08 W/(m.K) pour l'argile-colza, 0,10 à 0,14 W/(m.K) pour l'argile – écorce de tournesol, 0,06 à 0,08 W/(m.K) pour l'argile – moelle de tournesol et 0,07 à 0,010 W/(m.K) pour l'argile - écorce et moelle de tournesol.

Pour les composites en chanvre amidon, Il a été constaté que la masse volumique des composites élaborés à l'amidon est inférieure à celle du béton de chanvre-chaux (Umurigirwa-Vasseur 2014) et (Le et al. 2014). Ainsi les conductivités des composites à base d'amidon sont inférieures à celles des bétons de chanvre. Selon (Tran Le et al. 2010) les valeurs des conductivités sont respectivement de 0,057 W(m.K) pour une masse volumique de 159 kg/m^3 et 0,0617 W/(m.K)

pour 176 kg/m^3 pour les composites chanvre-amidon contre 0,1 W/(m.K) pour le béton chanvre chaux.

(Abbas 2021) a élaboré une comparaison de la conductivité thermique de quelque matériaux biosourcés en regroupant les données de conductivité en fonction de la masse volumique sèche.

$$\lambda=0{,}2216\ \rho_{sec}+0{,}0132 \qquad \text{I-4}$$

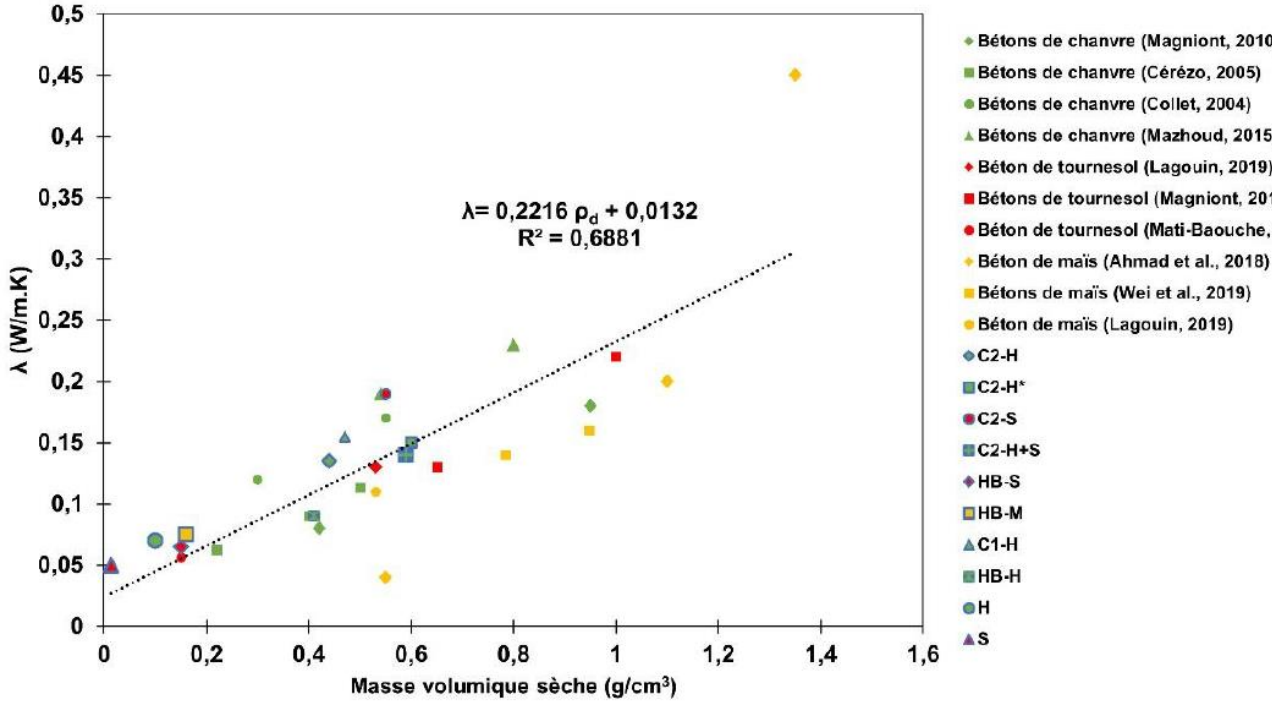


Figure I-4 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche des formulations (Abbas 2021)

Pour les composites totalement agrosourcés étudiés dans (Viel 2018), les liants utilisés permettent d'obtenir des masses volumiques faibles conduisant à des conductivités thermiques entre 65 et 80 mW/ (m.K) pour la majorité des composites. Les composites réalisés avec du chanvre présentent les conductivités thermiques les plus faibles (67 à 79 mW/ (m.K)) et ceux réalisés avec des résidus de rafle de maïs ont les conductivités les plus élevées (128 à 148 mW/(m.K)). La droite d'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique présente une pente plus importante pour les composites que pour les matières premières en vrac. Pour les composites à base de chanvre, les masses volumiques et les conductivités thermiques des composites sont similaires quel que soit le mode de collage utilisé (à base de paille de blé ou d'autre liant agro-sourcé), à l'exception des composites au PLA pour lesquels les valeurs obtenues à la fois en masse volumique et en conductivité thermique sont plus importantes. L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique est beaucoup plus faible lorsque l'on considère uniquement les composites à base de chanvre (pente 43% plus faible que celle de l'ensemble des composites). Les conductivités thermiques obtenues s'approchent de la valeur normative pour être considéré comme isolant thermique destiné au bâtiment (65 mW/ (m.K)).

I.1.2.2 Effusivité thermique et capacité thermique

La capacité thermique d'un matériau quantifie la chaleur nécessaire pour augmenter sa température sans changer de phase.

$$Q=m\ Cp\ \Delta T \qquad \text{I-5}$$

Avec m, la masse (kg), C_p la chaleur massique J/(kg.K) pour les matériaux de génie civil, elle est comprise entre 800 et 1800 J/(kg.K), ΔT l'élévation de température (K).

Cette propriété varie selon la formulation du matériau. Pour des bétons de chanvre, les valeurs trouvées dans la littérature sont de 1068 J/(kg.K) dans (Walker et Pavía 2015), 1394 J/(kg.K) dans (Haik et al. 2020) et 1530 J/(kg.K) dans (Evrard 2008).

La diffusivité thermique est la capacité d'un matériau à diffuser la chaleur c'est-à-dire sa capacité à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. C'est le rapport entre sa capacité à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique).

$$a = \frac{\lambda}{\rho Cp} \qquad \text{I-6}$$

Avec *a* est la diffusivité thermique (m^2s^{-1}), λ est la conductivité thermique (W/(m.K)), ρ est la masse volumique (kg/m^3), C_p est la chaleur massique (J/(kg.K)).

L'effusivité thermique est la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle dépend de sa capacité à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique). Cette propriété est calculée à partir de la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique.

$$E = \sqrt{\lambda \rho Cp} \qquad \text{I-7}$$

Avec, *E* est l'effusivité thermique ($J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$), λ est la conductivité thermique (W/(m.K)), ρ est la masse volumique (kg/m^3), C_p est la chaleur massique (J/(kg.K)).

Pour une formulation de chaux chanvre, (Evrard 2008) trouve une diffusivité thermique de 1,5*10-7 m²/s et une effusivité de 267 ($J/(m^2.K.s^{1/2})$). (Chabannes et al. 2014) trouvent une valeur comparable de l'effusivité, de l'ordre de 270 $J/(m^2.K.s^{1/2})$.

I.1.3 Caractéristiques hygriques

I.1.3.1 Isotherme de sorption

Les matériaux hygroscopiques ont la capacité de fixer l'humidité existante dans l'air ambiant.

Les mécanismes de fixation de l'eau à l'échelle microstructurales, présentent trois phases distinctes (Figure I-5):

• Phase 1 : Adsorption mono-moléculaire

L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à couvrir toute la surface externe des pores. Une monocouche de molécules d'eau est ainsi formée. Il est important de signaler que l'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface (force de Van der Waals). Ce mode de fixation d'eau se produit dans le cas de faibles humidités relatives.

• Phase 2 : Adsorption poly-moléculaire

Les molécules d'eau sont adsorbées sur la première couche de molécules d'eau. L'isotherme est généralement linéaire dans cette zone.

• Phase 3 : Condensation capillaire

Dans les hygrométries les plus élevées, les couches polymoléculaires se rejoignent et forment un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque. L'eau est maintenue à la surface des pores par des forces capillaires, ce qui engendre le remplissage des pores les plus fins puis des pores plus gros. Cela montre que la nature poreuse du matériau à un rôle essentiel dans les transferts hydriques. En effet plus le diamètre des pores est petit, plus la condensation capillaire a lieu à une humidité relative faible.

Pour une courbe d'isotherme d'adsorption et de désorption, la relation entre l'humidité relative et la teneur en eau d'un matériau poreux n'est pas univoque. En effet, pour une humidité relative donnée, le matériau poreux tend vers une teneur en eau différente pour la phase d'adsorption que celle de la phase de désorption. Ce comportement est qualifié de phénomène d'hystérésis (Figure I-6).

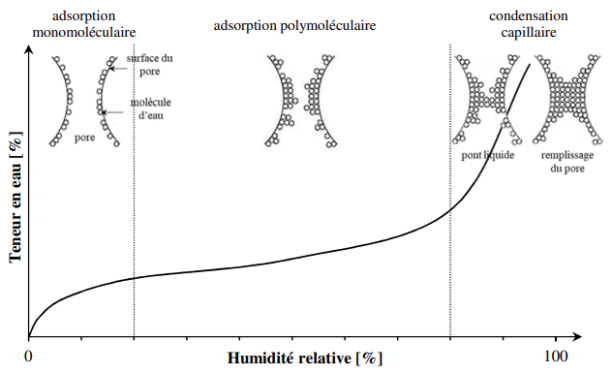


Figure I-5 : Représentation schématique de l'adsorption physique d'eau dans un pore au cours de l'isotherme de sorption (Collet 2004).

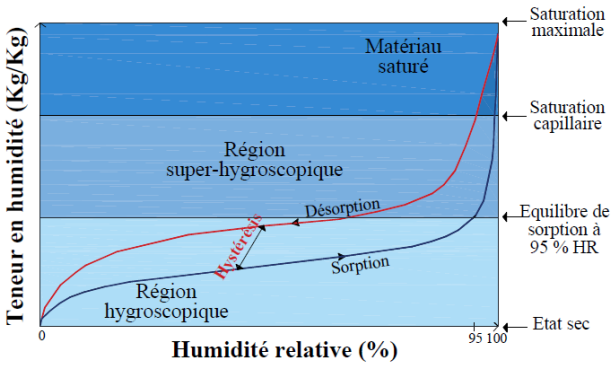


Figure I-6 : Allure de l'isotherme de sorption (Medjelekh 2017)

La capacité hydrique ξ se définit comme la pente de la courbe isotherme de sorption.

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial Hr} \qquad \text{I-8}$$

La classification faite par la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) (Sing et al. 1984) définit six catégories d'isothermes (Figure I-7). L'interprétation d'une isotherme expérimentale se fait donc en la décomposant en plusieurs portions en fonction des isothermes types (Ferroukhi 2015). Une classification existe aussi pour les phénomènes d'hystérésis selon quatre types différents.

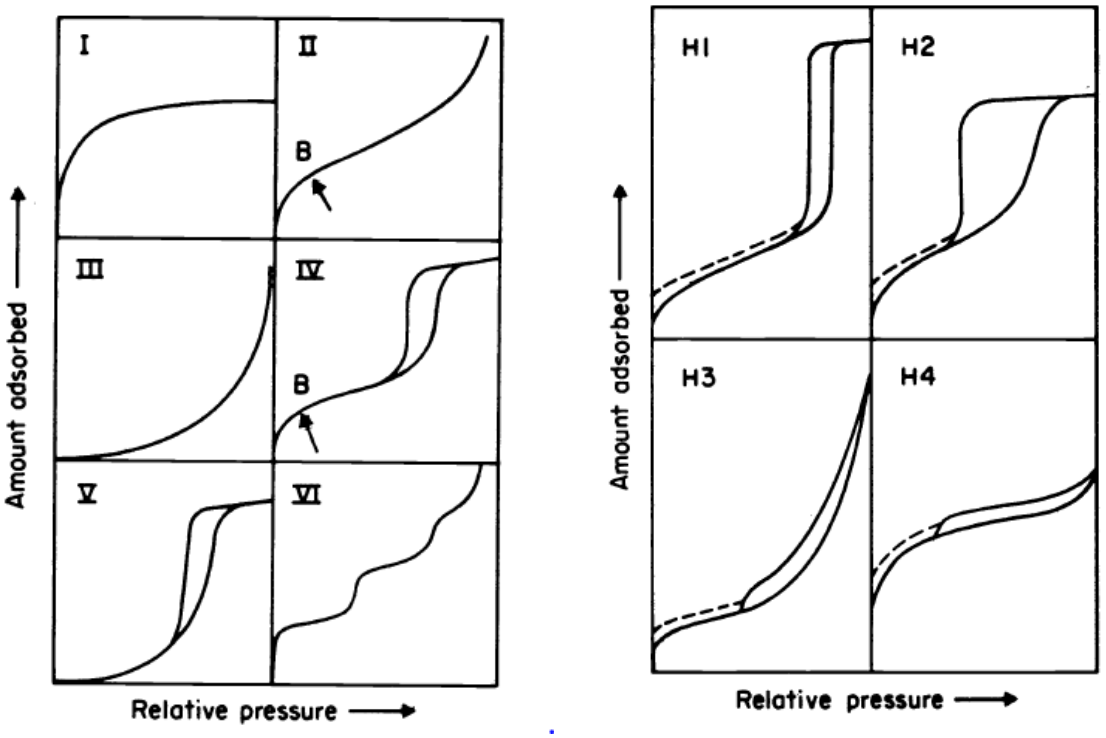


Figure I-7 : Classification des isothermes de sorption (A) et des cycles d'hystérésis (B) selon la IUPAC (Sing et al. 1984)

Les bétons de chanvre sont des matériaux fortement hygroscopiques présentant une isotherme sigmoïde, caractéristique des milieux macroporeux (Collet 2004), (Cérézo 2005), (Evrard 2008), (Chamoin 2013) et (De Bruijn et Johansson 2013). Comparativement à d'autres matériaux,

leur aptitude à stocker l'eau est plus importante (Amziane et Arnaud 2013) (Figure I-8). Les isothermes de sorption présentent une hystérésis importante entre la branche d'adsorption et la branche de désorption. Elles sont impactées par la formulation des matériaux (Figure I-9) (Collet et al. 2013).

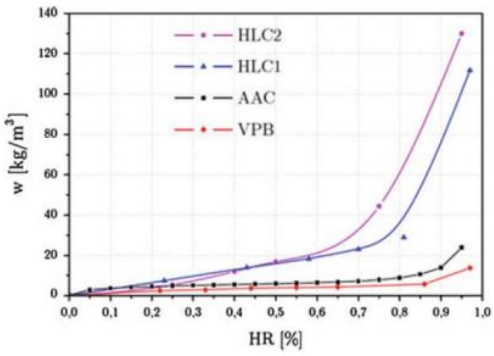


Figure I-8 : Isothermes de sorption de matériaux - HLC béton de chanvre, AAC béton cellulaire, VPB Briques perforées verticalement (Amziane et Arnaud 2013)

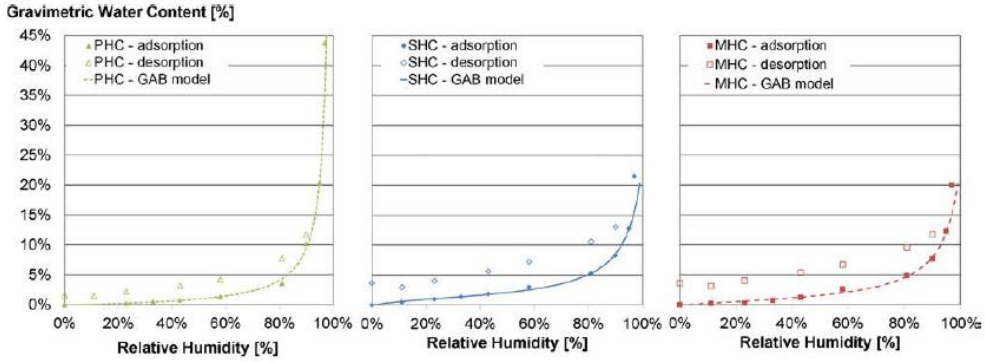


Figure I-9 : Isothermes d'adsorption-désorption de bétons de chanvre (PHC : préfabriqué, SHC : projeté, MHC : moulé) (Collet et al. 2013)

(Mazhoud et al. 2021) donnent une corrélation entre la teneur en eau et la formulation pour des composites terre-chanvre (Figure I-10).

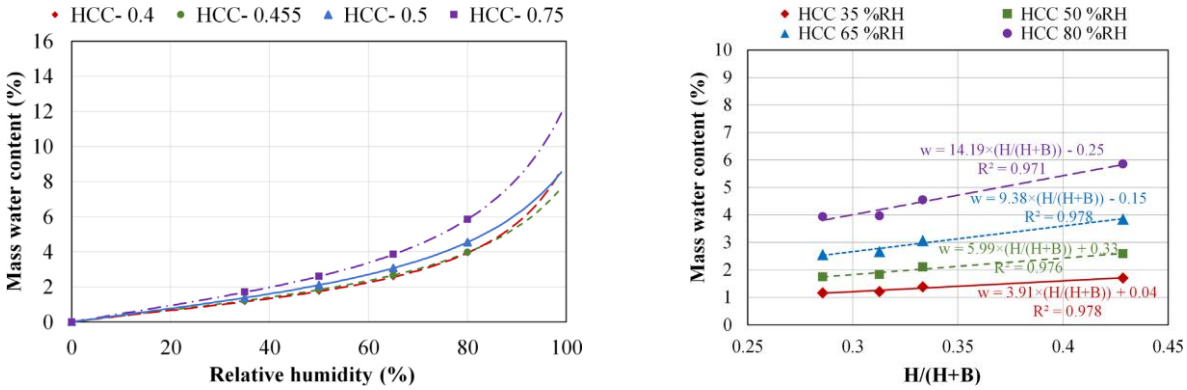


Figure I-10 : (a) Isothermes de sorption de composites terre-chanvre, (b) corrélation entre la teneur en eau et la teneur en chanvre pour différentes humidités relatives.

Les isothermes de sorption de nombreux composites biosourcés sont présentés dans (Lagouin 2021) (Figure I-11).

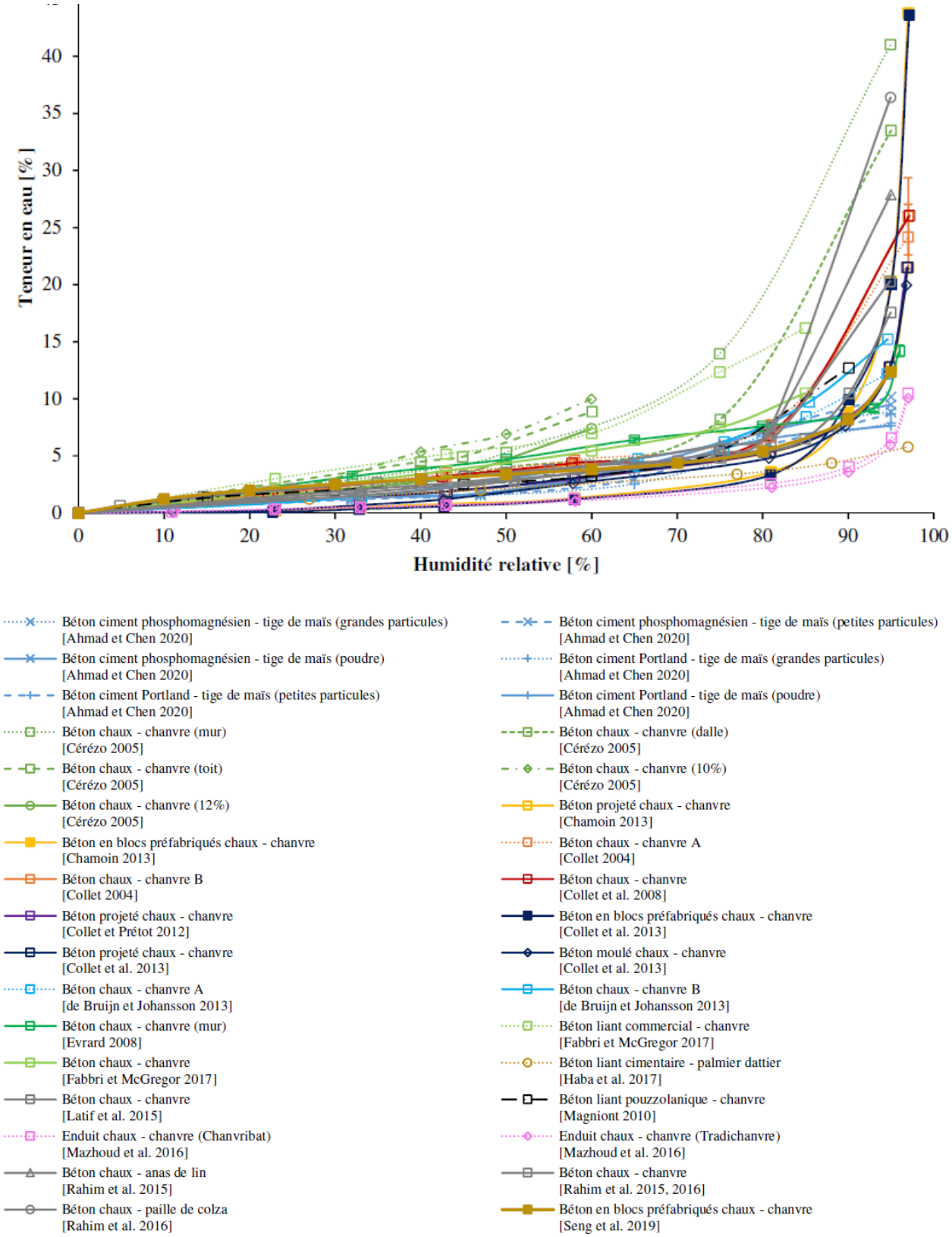


Figure I-11 : Isothermes de sorption de plusieurs bétons biosourcés disponibles dans la littérature (Lagouin 2021)

I.1.3.2 Perméabilité à la vapeur

La capacité d'un matériau à se laisser traverser par la vapeur est caractérisée par la perméabilité à la vapeur, δp (kg/(m.s.Pa)), ou le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, μ [-]

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \qquad \text{I-9}$$

avec, δa (kg/(m.s.Pa)) la perméabilité à la vapeur de l'air, dont la valeur dépend de la température et de la pression.

Comme indiqué dans la synthèse bibliographique élaborée par (Lagouin 2021) les facteurs de résistance à la vapeur des composites biosourcés sont proches les uns des autres et comparables à celui du béton cellulaire (Figure I-12).

On retrouve ainsi dans la littérature pour le béton de chanvre, une perméabilité à la vapeur de $2{,}23 \cdot 10^{-11}$ kg/(m.s.Pa) dans (Rahim et al. 2015), 5.10^{-11} kg/(m.s.Pa) dans (Collet et al. 2013), de $5{,}64.10^{-11}$ kg/(m.s.Pa) dans (Chamoin 2013) et de $6{,}68.10^{-11}$ kg/(m.s.Pa) dans (Vu et al. 2015). L'humidité relative peut influencer cette propriété, (Collet et al. 2013) et (Mazhoud et al. 2016) montrent que la perméabilité à la vapeur du béton de chanvre augmente avec l'humidité relative, pouvant augmenter de trois fois entre les ambiances sèches et les ambiances humides. Pour le béton de tige broyée de maïs, (Ahmad et Chen 2020) déterminent une valeur de l'ordre de $1{,}614.10^{-11}$ kg/(m.s.Pa).

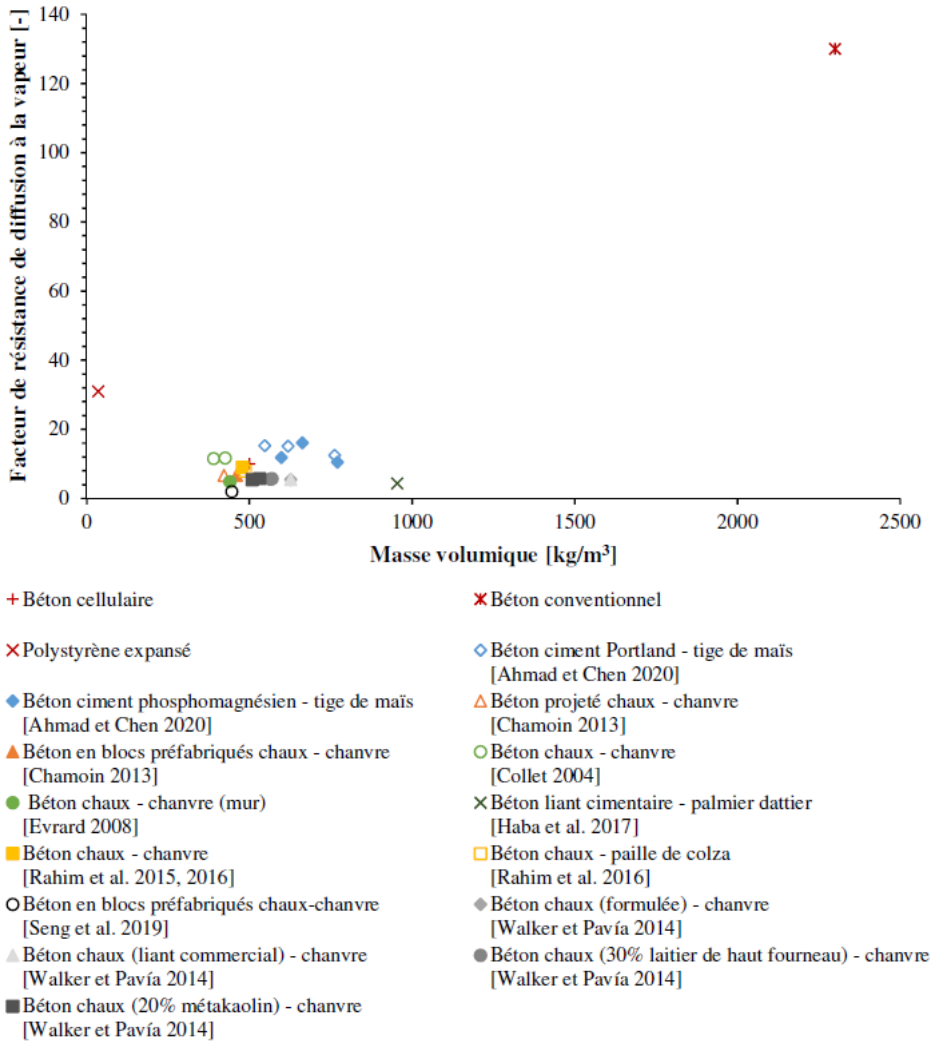


Figure I-12 : Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau de différentes composites biosourcées (Lagouin 2021)

I.1.3.3 Valeur tampon hygrique (MBV)

La valeur tampon hygrique ou « Moisture Buffer Value (MBV)», caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air ambiant.

Différents protocoles existent pour mesurer la valeur MBV, qui se définit comme :

$$MBV_{pratique} = \frac{\Delta m}{A.\Delta HR} \qquad \text{I-10}$$

MBV est la valeur tampon hygrique (g/ (m^2.%HR)), Δm est la variation de masse durant la phase d'adsorption ou désorption (g), A est la surface d'échange (m^2), ΔHR est la différence HR_{haute}/ HR_{basse} sont les humidités relatives haute et basse au cours du cycle (%).

Le protocole le plus répandu en Europe est celui de la méthode Nordtest (Rode et al. 2005) pour lequel les échantillons, étanchés sur toutes les faces sauf une, sont exposés à des paliers successifs d'humidité relative (8h à 75 %HR et 16h à 33 %HR), à une température de 23°C et pour une vitesse d'air inférieure à 0,1 m/s. Un classement est associé à ce protocole (Figure I-13).

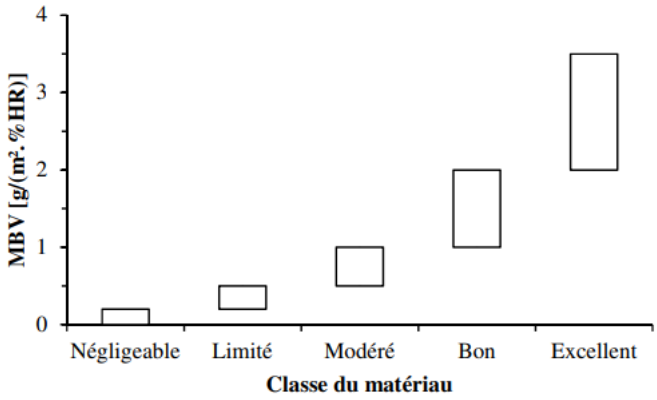


Figure I-13 : Plages de classification des matériaux selon leur valeur MBV pratique (Rode et al. 2005)

Différentes études sur des bétons de chanvre conduisent à des valeurs MBV comprises entre 1,9 et - 2,4 g/(m2.%HR) (Collet et Pretot, 2012), (Dubois et al 2012) (Collet et al. 2013), (Lelievre et al. 2014), ((Rahim et al. 2015). Ce qui les classe très bons, voire excellents régulateurs hygriques.

Pour les composites terre-chanvre, (Mazhoud 2017) montre que les formulations à base de terre sont d'excellents régulateurs hygriques et présentent des performances légèrement supérieures à celles des bétons de chanvre réalisés avec un liant à base de chaux. (Figure I-14).

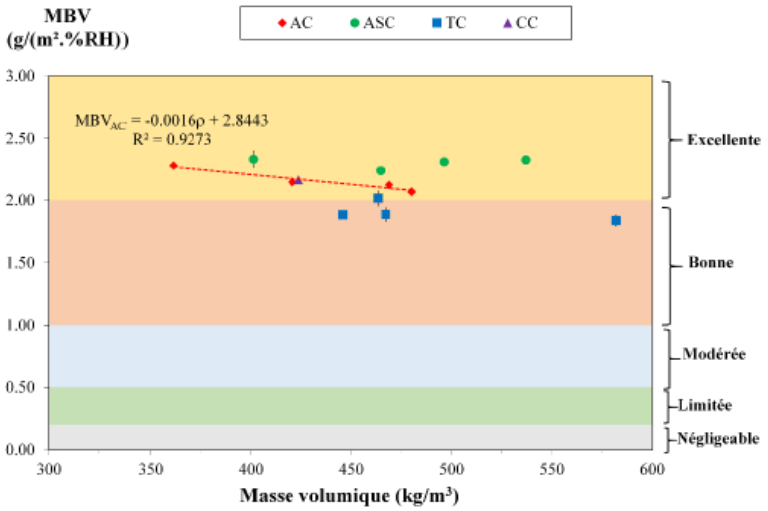


Figure I-14 : Valeur MBV en fonction de la masse volumique (23°C, 50%HR) (Mazhoud 2017)

Pour différents bétons de tige de maïs, (Ahmad et al. 2020) trouvent des valeurs de MBV comprise entre 1,4 et 3,4 g/(m^2·%HR).

Les composites totalement agrosourcés étudiés dans (Viel 2018) présentent des valeurs MBV qui dépendent du type de granulats et du type de liant utilisé. Ces composites sont tous classés excellents régulateurs hygriques avec des valeurs MBV autour de 2,05 g/(m^2.%HR) pour le chanvre-lignine et chanvre-mélasse, de 2,20 à 2,27 g/(m^2.%HR) pour les composites réalisés à partir de la paille de blé, 2,42 g/(m^2.%HR) pour les composites réalisés avec les polysaccharides et de 3,12 à 3,16 g/(m^2.%HR) pour les composites réalisés avec les extraits de rafle de maïs, les extraits de fines de lin et la liqueur noire. Les composites réalisés avec les résidus de rafles de maïs sont tous excellents régulateurs hygriques. De la même façon, la lignine conduit à la valeur MBV la plus faible (3,99 g(m^2.%HR)) alors que les extraits de rafle de maïs, les extraits de lin et la liqueur noire conduisent aux valeurs les plus fortes, comprises entre 4,79 et 5,08 g/(m^2.%HR).

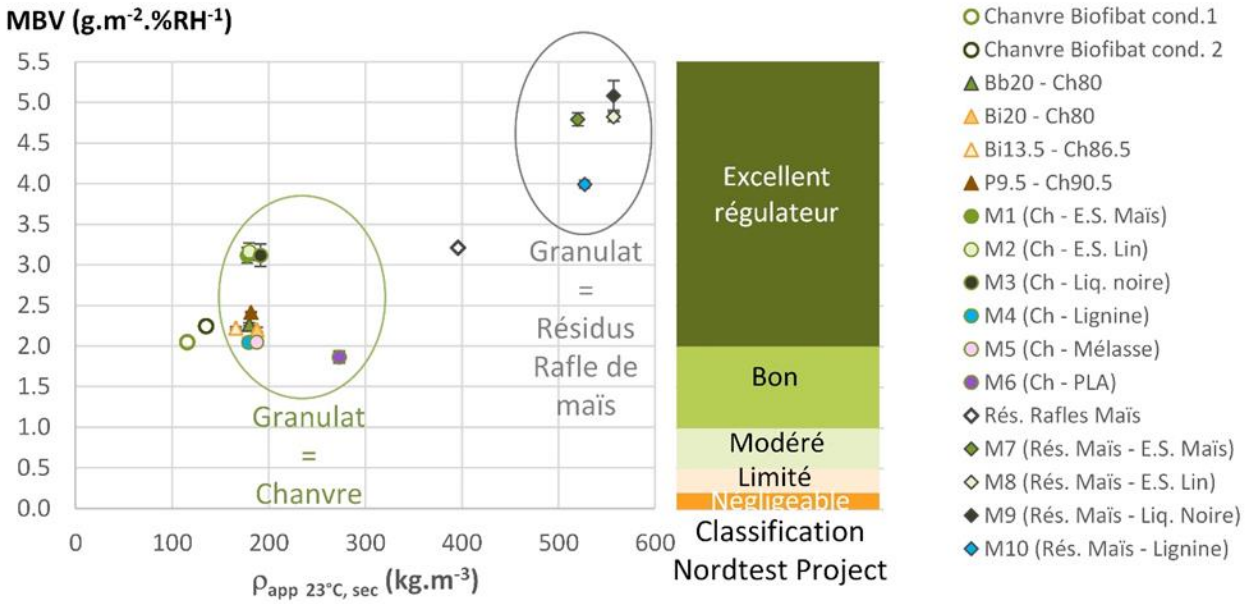


Figure I-15 : Evolution de la valeur MBV en fonction de la masse volumique pour différents composites agro-sourcés (triangles : chanvre-paille, ronds : chanvre-liant agro-sourcé, losange : résidus de rafle de maïs-liants agro-sourcés) (Mazhoud et al. 2018)

Toutefois, la qualité de régulateur tampon hydrique est bien sûr impactée par la mise en œuvre d'un enduit sur le matériau. Cet impact est plus ou moins important selon l'enduit considéré. Ainsi, (Collet et Pretot 2012), montrent que pour une même épaisseur d'enduit, l'impact est moindre avec enduit ouvert type chaux-chanvre (réduction de 8 %), alors qu'il est notable avec un enduit fermé de type sable-chaux (réduction de 50%).

I.2 Etude expérimentale du comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi

L'étude bibliographique réalisée sur les matériaux montre la diversité des formulations possibles pour valoriser les ressources bio-sourcées. Ces solutions présentent de très bonnes performances hygrothermiques à l'échelle du matériau, il convient désormais de s'intéresser aux performances à l'échelle de la paroi.

Cette section s'intéresse aux études menées à l'échelle de la paroi sur différentes enveloppes, bio-sourcées ou non. Pour identifier les différents phénomènes hygrothermiques, ces études peuvent être réalisées selon plusieurs configurations en ambiance contrôlée à l'aide d'une chambre climatique, d'un seul côté ou des deux côtés et selon différentes sollicitations : des gradients de température et de pression de vapeur constants, des cycles sous forme de palier, des cycles sinusoïdaux….

L'étude de (Rahim et al. 2017) porte sur le comportement hygrothermique de deux murs de dimension réelle en béton de chanvre (HLC) et en béton de colza (SLC) qui sont soumis à des conditions climatique contrôlées d'un côté et à l'ambiance du laboratoire de l'autre.

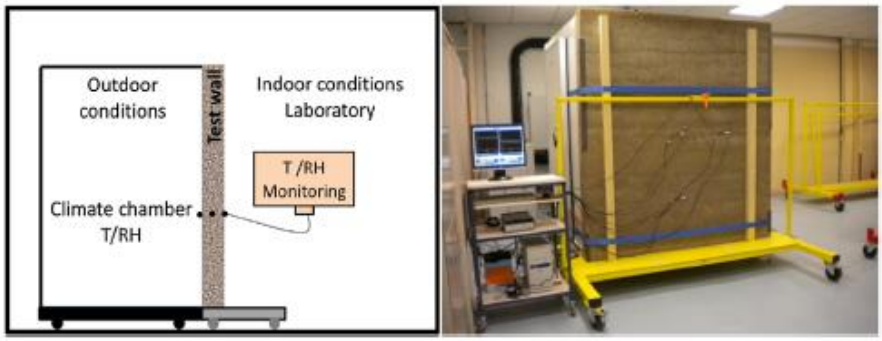


Figure I-16 : dispositif expérimental (Rahim et al. 2017)

Les dimensions du mur d'essai sont de 2 m de long, 2 m de haut et 17 cm d'épaisseur.

Chaque mur est équipé de capteurs pour enregistrer la température et l'humidité relative des ambiances intérieure et extérieure et au sein du mur d'essai, avec une précision de 0,1 ° C et 3%HR. Les capteurs sont inclinés à 45 ° par rapport au plan vertical afin de réduire les perturbations de la mesure et les cavités dans lesquelles ils sont insérés sont comblées avec du silicone. Différentes zones sont instrumentées : une zone centrale pour laquelle plusieurs capteurs sont placés à différentes profondeurs et des zones périphériques avec un seul capteur (Figure I-17 et Figure I-18).

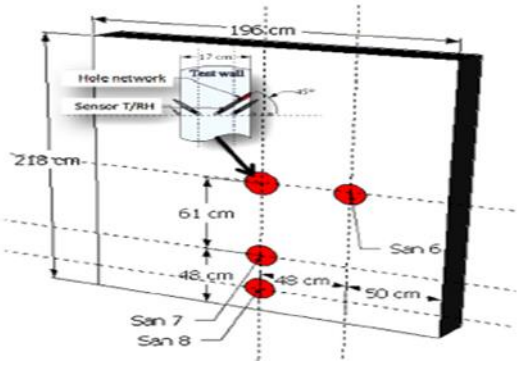


Figure I-17 : Dimensions du mur test et localisation des capteurs

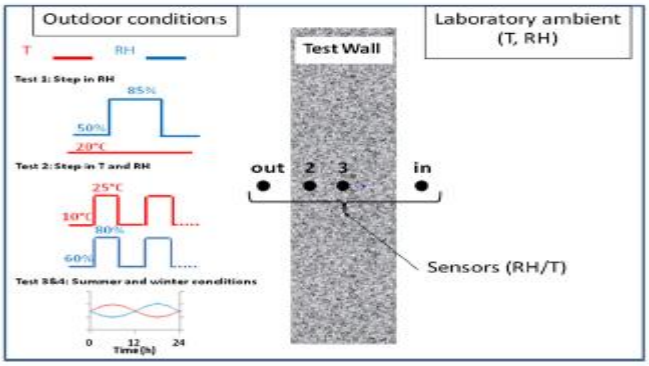


Figure I-18 : Protocoles d'essai et localisation des capteurs

Différents tests ont été effectués. Le premier est réalisé en conditions isothermes (20°C) et avec des paliers d'humidité relative (10 jours à 50 %HR – 7 jours à 85 %HR – puis 50 %HR). Le deuxième test fait varier à la fois la température et l'humidité relative selon des créneaux de 24 heures : 25°C ; 80%HR – 10°C ; 60%HR. Les troisièmes et quatrièmes tests produisent des cycles sinusoïdaux de 24 heures simulant des conditions hivernales (5-15°C ; 80-50 %HR) et des conditions estivales (20-30 °C ; 45-70 %HR).

Les résultats montrent que les phénomènes de changement de phase se produisant dans le mur influencent les variations de température et d'humidité relative. La réponse hygrothermique du mur met en évidence un fort couplage entre la température et l'humidité relative. Les auteurs indiquent qu'en cas de conditions sinusoïdales, les résultats ont montré que l'effet de la température sur le profil HR est plus important. Malgré leur faible capacité thermique spécifique, ces matériaux présentent une inertie thermique non négligeable.

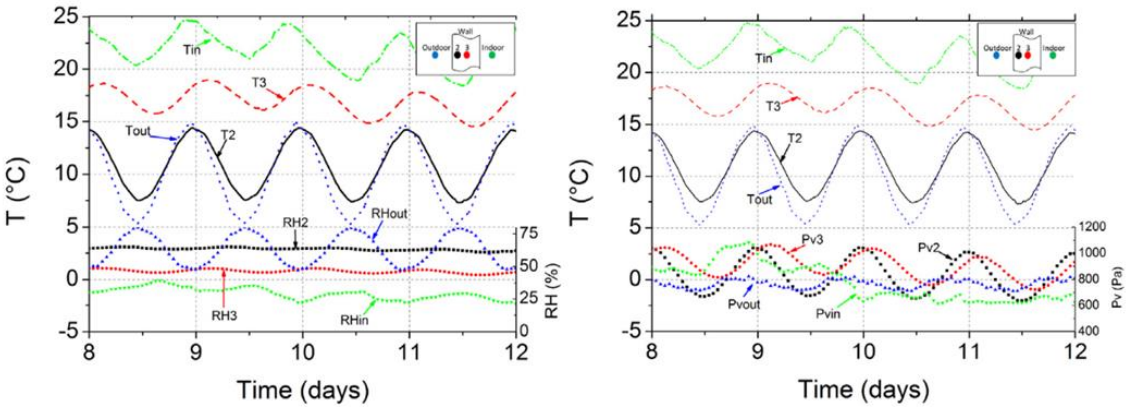


Figure I-19 : Evolution de la température et de l'humidité au sein des murs (gauche : béton de chanvre, droite : béton de colza)

(Wu et al. 2021) étudient une solution multicouche intégrant une couche en béton de chanvre et une couche de matériau à changement de phase (MCP) de façon à optimiser la position de celle-ci dans la paroi. Le mur test de 50 cm * 50 cm est implanté entre une chambre climatique simulant l'ambiance extérieure d'un côté et l'ambiance du laboratoire de l'autre (Figure I-20). La sollicitation est réalisée sous forme de créneaux après une stabilisation de 2 jours, sans indiquer de critères de stabilisation. Les parois sont instrumentées en température, en humidité relative et en flux de chaleur. L'analyse du comportement hygrothermique repose sur l'étude des amortissements et déphasages issus des cinétiques (Figure I-21) ainsi que des bilans en chaleur sur chaque surface de la paroi (Figure I-22).

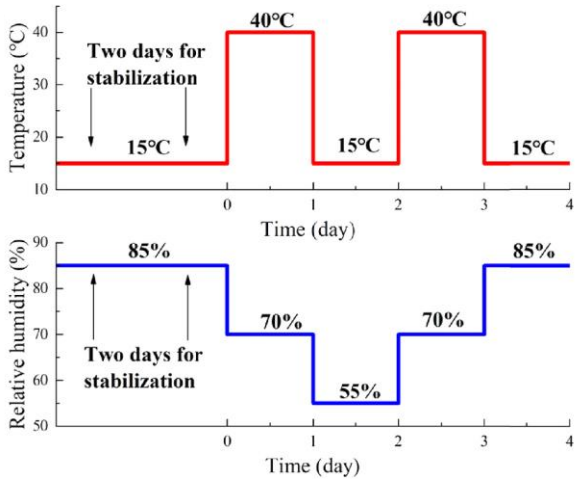


Figure I-20 : Sollicitations cycliques imposées côté chambre climatique

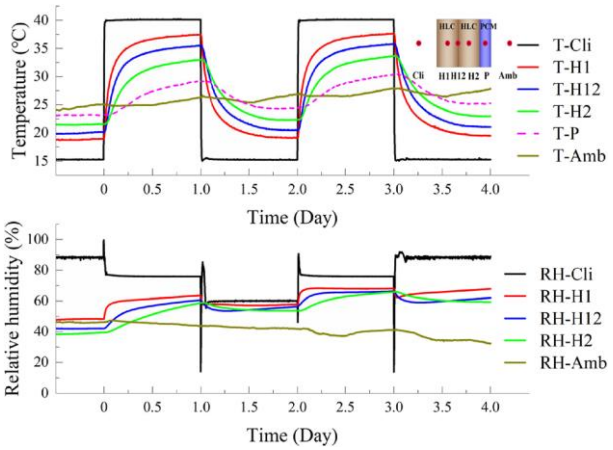


Figure I-21 : Température et humidité relative à différentes positions lorsque le MCP est placé côté ambiance intérieure du mur

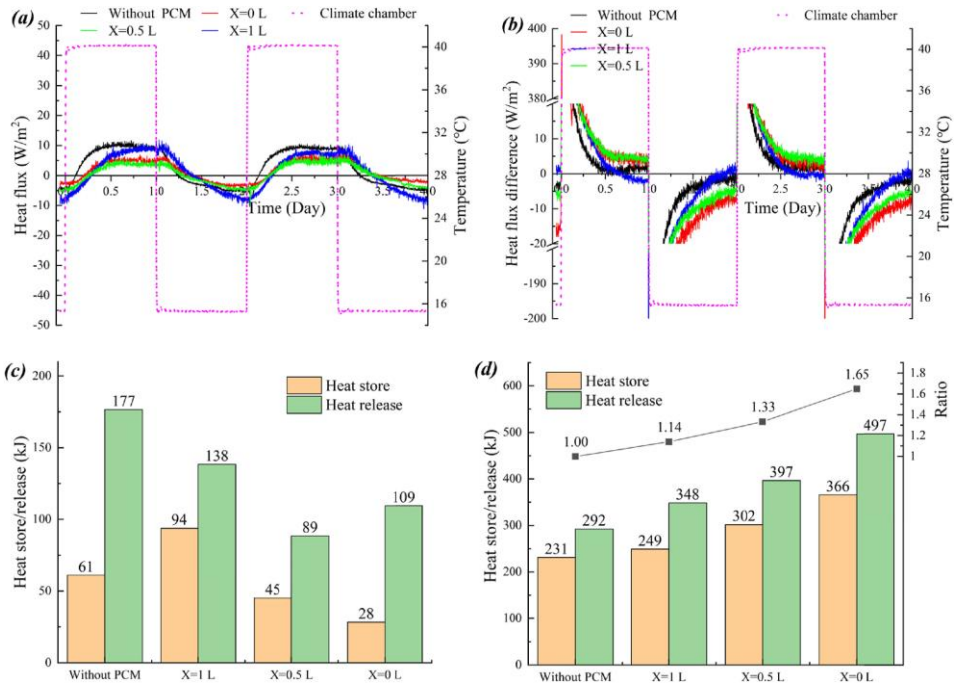


Figure I-22 : (a) Flux thermique sur la surface latérale ambiante de l'enveloppe ; (b) Différence de flux thermique entre chaque côté de l'enveloppe et la température imposée (à droite) ; (c) Stockage/libération de chaleur par la surface latérale ambiante ; (d) Stockage/libération de chaleur par l'enveloppe et valeur du rapport (à droite).

L'étude de (Chennouf et al. 2019) porte sur le comportement hygrothermique d'un mur en béton de palmier. Celui-ci constitue un face d'une cellule isolée dont l'ambiance n'est pas contrôlée et qui est placée dans une chambre climatique qui régule les conditions climatiques autour de la cellule (Figure I-23). Après stabilisation à 23 °C et 50 % pendant une semaine, sans critère de stabilisation, l'essai est réalisé sous différents types de cycles avec des sollicitations soit en température, soit en humidité, soit en température et en humidité. Les résultats de cette étude montrent la bonne capacité du matériau à stocker/déstocker la chaleur et l'humidité ainsi qu'une forte influence du transfert de chaleur sur le comportement hygrique, à travers la présence de phénomènes de sorption / désorption.

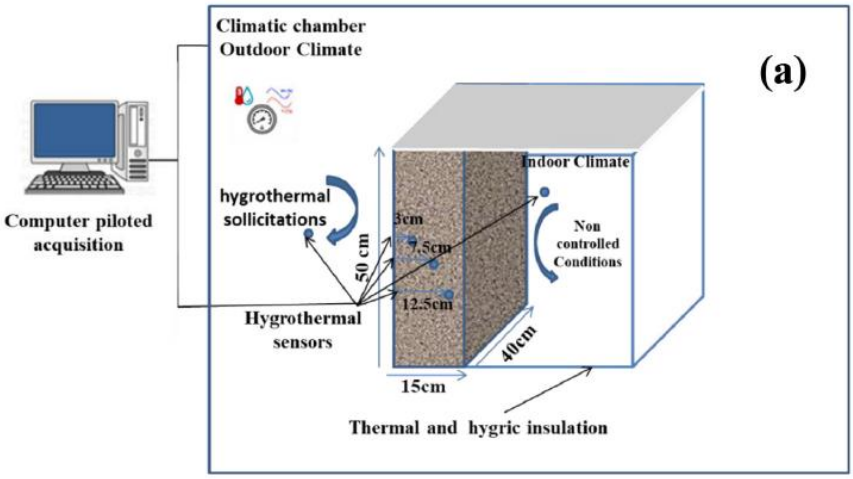


Figure I-23 : dispositif expérimental (Chennouf et al. 2019)

Les travaux de (Medjelekh et al. 2017) portent sur le comportement thermo-hydrique d'un mur en brique de terre crue. Le dispositif est composé de deux enceintes climatiques autonomes en termes, de régulations thermique et hydrique d'une part, et de bilan enthalpie et hydrique d'autre part. Les deux enceintes sont séparées par un mur d'une hauteur de 2m40 et d'une largeur de 2m50 avec une épaisseur pouvant atteindre 50 cm. Ces chambres sont formées de panneaux sandwich constituées de 150 mm de mousse rigide de polyuréthane et revêtues de peaux métalliques de 0,63 mm d'épaisseur (Figure I-24).

Le bilan enthalpique de chaque chambre est assuré par le traitement d'air mesuré par une batterie à eau glycolée, et les températures d'entrée et de sortie de celle-ci. Le bilan hydrique s'appuie sur une différenciation entre un comptage de l'eau pulvérisée et une pesée automatique des condensats recueillis. Les murs sont instrumentés de thermo-hygromètres capacitifs installés à différentes profondeurs, afin de mesurer les gradients thermique et hydrique durant les différents essais. L'instrumentation est complétée par des sondes de température de surface (thermocouples).

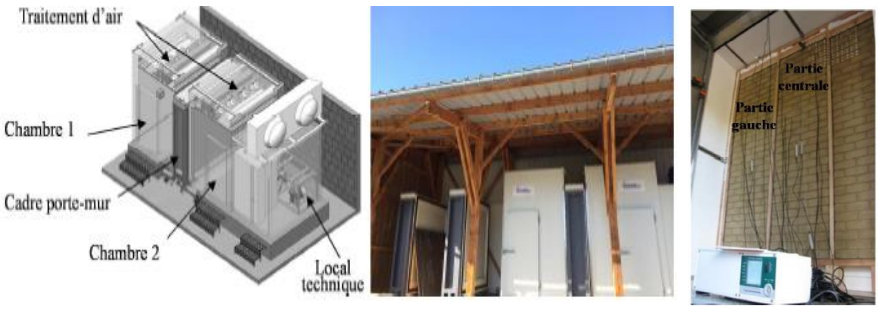


Figure I-24 : l'enceinte utilisée par (Medjelekh et al. 2017)

Cet équipement a permis de suivre les évolutions de température et d'humidité au sein des parois de différents types sous diverses sollicitations (créneau 50 – 80 %HR ou créneaux multiples à 80% par pas de 30 minutes…) et de mettre en évidence les effets du couplage entre flux de chaleur et transfert de masse.

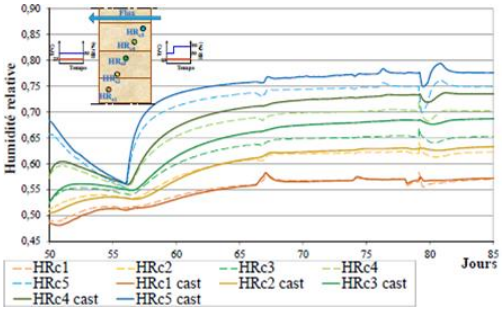


Figure I-25 : Evolution de l'humidité relative au sein de la paroi lors d'un créneau 50-80%HR

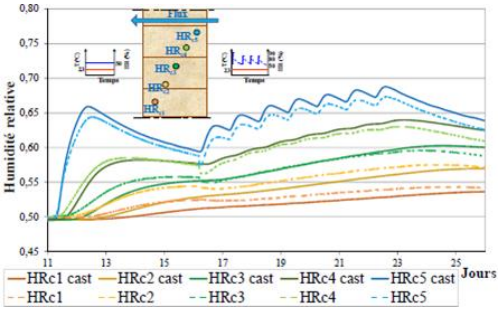


Figure I-26 : Evolution de l'humidité relative au sein de la paroi lors de sollicitations sous créneaux multiples

L'étude de (Collet et Pretot 2014b) repose sur une configuration avec ambiances contrôlées des deux côtés d'une paroi en béton de chanvre avec une ossature bois, dans un premier temps nue puis enduite. Différentes sollicitations sont réalisées permettant d'obtenir des situations avec des gradients de température seuls, des gradients de pression de vapeur seul et des gradients simultanés de température et d'humidité. De plus, ces gradients peuvent être dans le même sens ou opposés. Il a été montré que les temps caractéristiques des phénomènes hygriques sont beaucoup plus longs que ceux des phénomènes thermiques. La diffusion de vapeur se produit de façon homogène dans toute l'épaisseur du matériau et l'ossature ne perturbe pas le comportement hygrothermique de la paroi. Celle-ci ne constitue pas un pont thermique du fait des conductivités thermiques équivalentes du bois et du béton de chanvre. Des phénomènes de sorption-désorption sont identifiés mais pas de risque de condensation interne. La mise en place de l'enduit retarde les phénomènes hygriques.

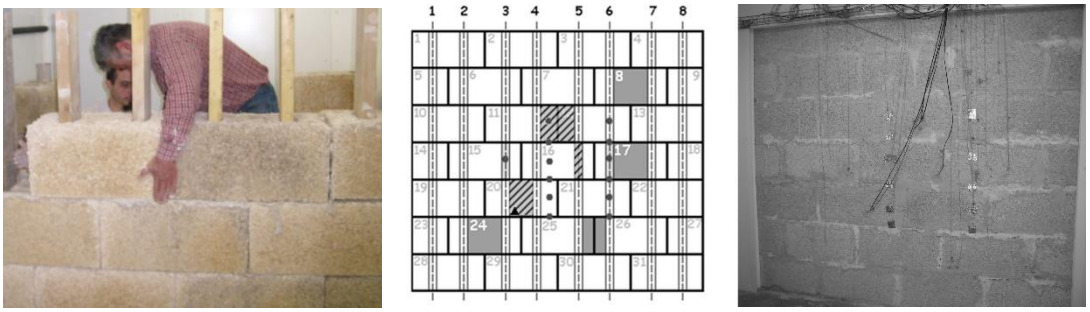


Figure I-27 : Mur test et instrumentation (Collet et Pretot 2014b)

L'étude de (Latif et al. 2018) porte sur une configuration en ambiances contrôlées des deux côtés pour tester trois compositions de murs différentes avec des isolations différentes : panneau en laine minérale, panneau en fibres de bois et panneau Biond (bi-couche composé de fibres de bois et de chanvre-chaux). Des sollicitations sont réalisées dans des conditions stables et dynamiques à l'extérieur ou à l'intérieur. Les conditions stables correspondent aux conditions ambiantes intérieures et extérieures au Royaume-Uni pendant l'hiver (20°C ; 60%HR) à l'interieur et (5°C ; 90%HR) à l'extérieur. Les conditions dynamiques en extérieur sont basées sur la température moyenne et l'humidité relative diurnes pendant l'hiver (20°C ; 50%HR) à l'intérieur et des cycles répétés avec des paliers de 6 heures à (20°C ; 80%HR) et 6 heures (5°C ; 90%HR) à l'extérieur. Les conditions dynamiques en intérieur correspondent à un changement cyclique de température intérieure et des conditions extérieures constantes à (5°C ; 90%HR), simulant un chauffage intermittent. Les parois sont équipées en mesure de flux ainsi qu'en mesure de température et d'hygrométrie au sein du mur. Les coefficients de transmission surfaciques mesurés sont les mêmes pour les trois compositions de murs aussi bien pour les essais en conditions stables que dynamiques côté extérieur. Pour le cas où la sollicitation simule un chauffage intermittent, le mur réalisé avec le panneau Biond montre la plus grande capacité de stockage et de libération de la chaleur alors que celui réalisé avec le panneau de laine minérale montre la plus faible (Figure I-29). En termes de gestion de l'humidité, le panneau Biond montre la plus grande capacité d'amortissement de l'humidité dans la structure du panneau. Les auteurs concluent que l'inertie thermique et hygrique supérieure du panneau Biond peut être utile pour atténuer la surchauffe des habitations et réduire la condensation interstitielle.

Figure I-28 : Mur test de (Latif et al. 2018)

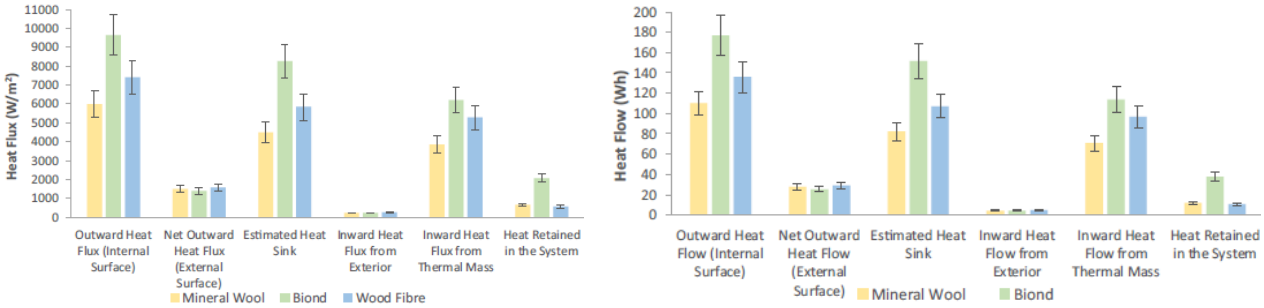


Figure I-29 : Résultats de flux de chaleur et quantité de chaleur stockée (Latif et al. 2018)

(Palomar et al. 2019) utilisent également une enceinte bi-climatique pour étudier les performances hygrothermiques de différentes compositions de murs dans des conditions stables d'hiver et d'été respectivement (12°C ; 80%HR) et (31°C ; 40%HR) coté extérieur et (23°C ; 50%HR) coté intérieur. Les murs sont de la composition suivante ; REF(S), est un mur simple de référence il a été construit avec une couche de 103 mm d'épaisseur de briques perforées verticalement et un mortier de ciment pour joints, (REF(D)) est un mur double de référence, il a été construit avec deux couches, des briques pleines de 35 mm et des briques de 103 mm, avec une cavité d'air non ventilée de 40 mm entre les deux. La face intérieure des deux murs a été recouverte de 15 mm de plâtre. Ensuite, le côté extérieur des deux murs a été enduit d'un mortier de chaux et ciment perméable de 25 mm. Cette étude montre que la stabilisation hygrothermique du mur est atteinte d'abord dans les couches extérieures, puis dans les couches intérieures. Elle met également en évidence le phénomène de condensation interne, dans les deux murs doubles dans le cas sans ou avec enduit extérieur double et dans les deux cas de sollicitations (Figure I-30).

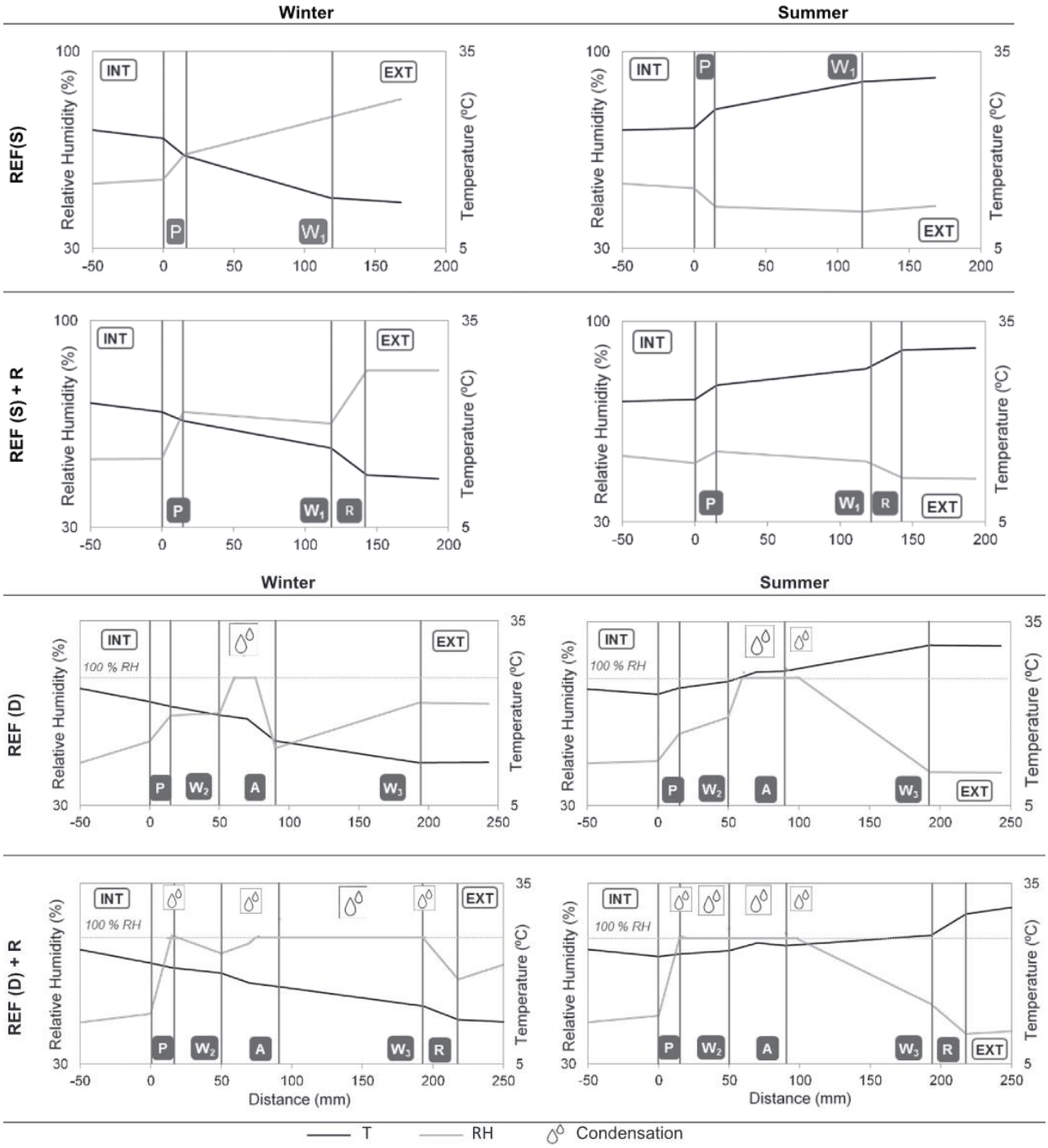


Figure I-30 : Profils de température et d'humidité relative des différentes compostions des murs dans des scénarios d'hiver et d'été en régime permanent (Palomar et al. 2019)

L'étude de (Douzane et al. 2016) porte sur un mur en bottes de paille implanté dans une chambre bi-climatique régulée en température des deux côtés. Ce mur est constitué d'une ossature en bois comprenant des montants en bois, des lisses haute et basse d'une section de 345 × 45 mm. Les bottes de paille comprimées de 440 mm d'épaisseur sont placées entre les montants en bois, espacés de 800 mm les uns des autres. Côté intérieur, un parement est réalisé avec des plaques de plâtre de 13 mm d'épaisseur. Sur la face extérieure, un enduit à la chaux a été appliqué directement sur les bottes de paille (épaisseur moyenne de 35 mm). Après stabilisation du mur à 18°C, une sollicitation thermique a été appliquée sur le côté extérieur du mur en imposant une température de 30°C. La température superficielle extérieure est stabilisée après environ 15 heures tandis que le flux de chaleur mesuré sur les deux côtés montre que l'état d'équilibre est atteint après 20 heures d'essai. La résistance thermique calculée à partir des mesures expérimentales montre une bonne performance comparé à différents murs couramment utilisés dans le bâtiment (Figure I-32).

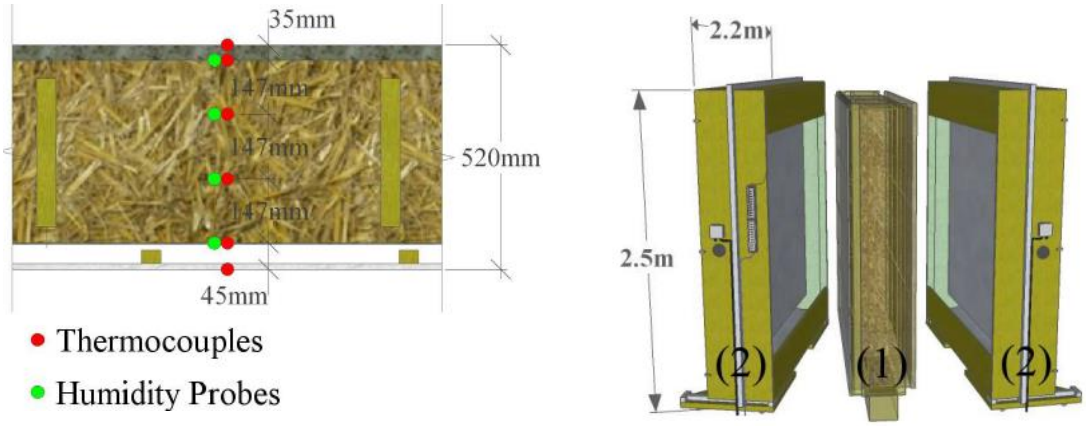


Figure I-31 : Dispositif expérimental et mur test de (Douzane et al. 2016)

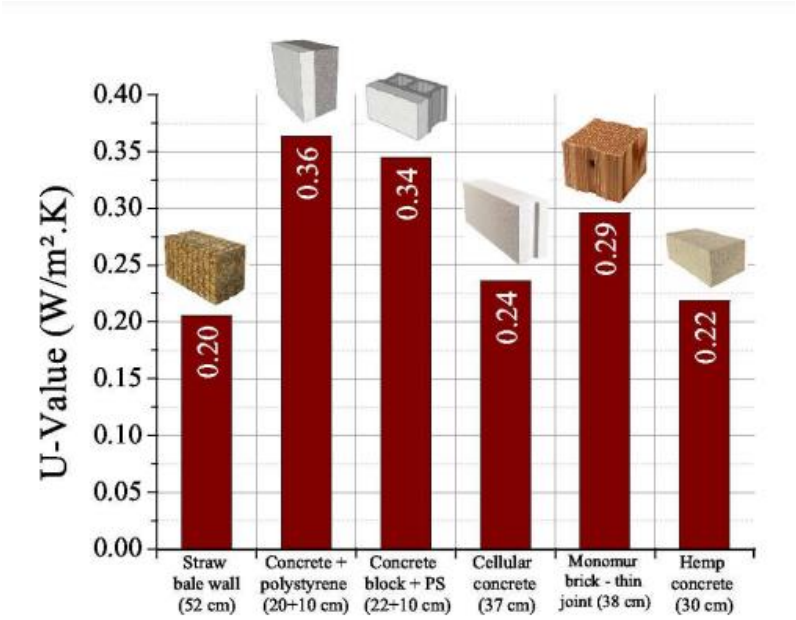


Figure I-32 : comparaison entre les valeurs U de différents murs

I.3 Etude expérimentale du comportement hygrothermique à l'échelle du bâtiment

Après avoir étudié les performances à l'échelle de la paroi, les études du comportement hygrothermique à l'échelle de l'enveloppe s'intéressent au comportement hygrothermique des parois in-situ, au confort hygrothermique et aux performances énergétiques. Les études recensées ici présentent différentes configurations, cellules tests ou rénovation, ainsi que les différentes analyses dressées.

(Shea et al. 2012) étudient un bâtiment test avec des parois en béton de chanvre. Ce bâtiment est chauffé et les consommations sont mesurées, la température et l'humidité relative sont mesurées en ambiance et en surface des murs, l'ensoleillement est mesuré pour estimer les gains solaires. Les auteurs soulignent que l'utilisation du coefficient de transmission surfacique U seul n'est pas suffisante pour caractériser le comportement de l'enveloppe quand celle-ci est soumise à des conditions climatiques réelles. Pour une meilleure caractérisation, ils suggèrent l'utilisation d'un paramètre dynamique, correspondant à la quantité de chaleur stockée et déstockée sur 24 heures, pour introduire les effets d'inertie.

Figure I-33 : Bâtiment test "Hempod" – Université de Bath

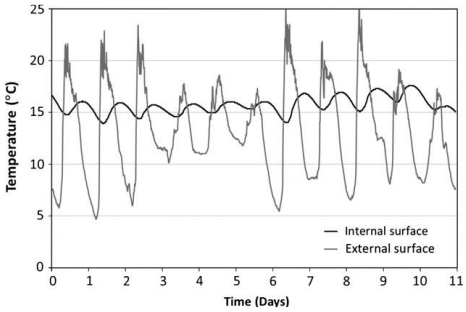


Figure I-34 : Température de surface intérieure et extérieure

(Latif et al. 2016) étudient cinq bâtiments test construits au Building Research Park de Wroughton, au Royaume-Uni. Ces bâtiments présentent chacun un type de mur différent : maçonnerie en blocs de béton; panneaux muraux à ossature bois remplis en béton de chanvre (HempCell), en polyisocyanurate (PIR); en fibre de bois; et en laine minérale. Les cellules d'essai inoccupées sont chauffées à une température intérieure moyenne élevée de 25 ± 0,5°C pendant une période de 18 jours au cours d'un mois d'hiver. Pour estimer le coefficient de transmission surfacique des parois, cinq méthodes sont utilisées. Elles sont basées sur la mesure des consommations de chauffage et des températures intérieure et extérieure. Elles incluent différents traitements des données : prise en compte des infiltrations d'air, des gains solaires et de l'inertie, calcul sur la période nuit uniquement, calcul des moyennes sur des durées différentes. Pour la méthode prenant en compte la apports solaires et l'inertie thermique (HLC méthode 5), les valeurs obtenues sont comparables aux valeurs calculées à partir des compositions de parois pour l'ensemble des murs, à l'exception du mur en blocs de béton pour lequel les valeurs mesurées sont supérieures de 32,8 % aux valeurs attendues (Figure I-35), alors que pour les autres méthodes, le U est sous-estimé.

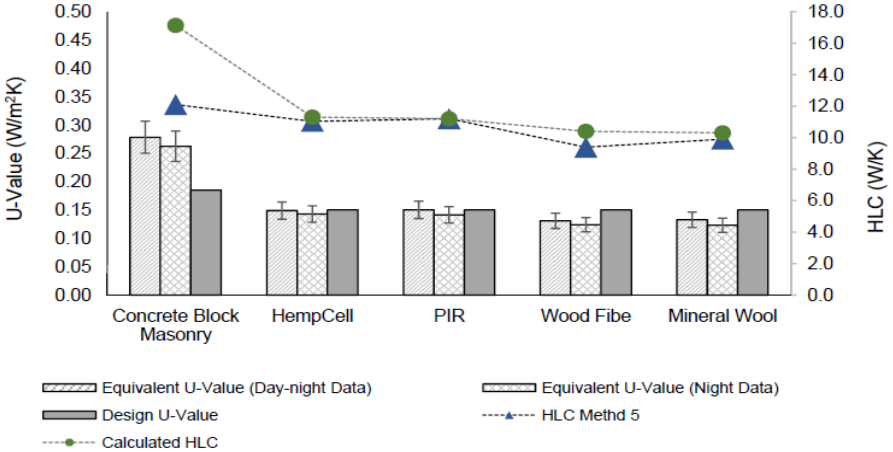


Figure I-35 : Les valeurs U in situ, les valeurs U de conception des systèmes muraux

(Wu et al. 2010) étudie le comportement thermique d'un mur composé de briques d'argile côté intérieur, de briques d'argile allégées avec des copeaux de bois côté extérieur recouverte d'un enduit à la chaux résistant à l'eau. Le mortier utilisé pour leur assemblage est également à base d'argile brute. Les capteurs développés permettent de mesurer simultanément le flux et la température sur la surface intérieure et extérieure du mur (Figure I-36). Le suivi sur une période d'un an après fabrication permet de montrer que les caractéristiques thermophysiques évoluent en lien avec le séchage naturel des matériaux. La conductivité thermique, la diffusivité et l'effusivité se stabilisent à des valeurs 30% à 50 % plus faibles que les valeurs initiales. A l'issue du séchage, la conductivité thermique équivalente du mur est de 0,30 W/(m.K), en accord avec la valeur théorique obtenue à partir des mesures en laboratoire.

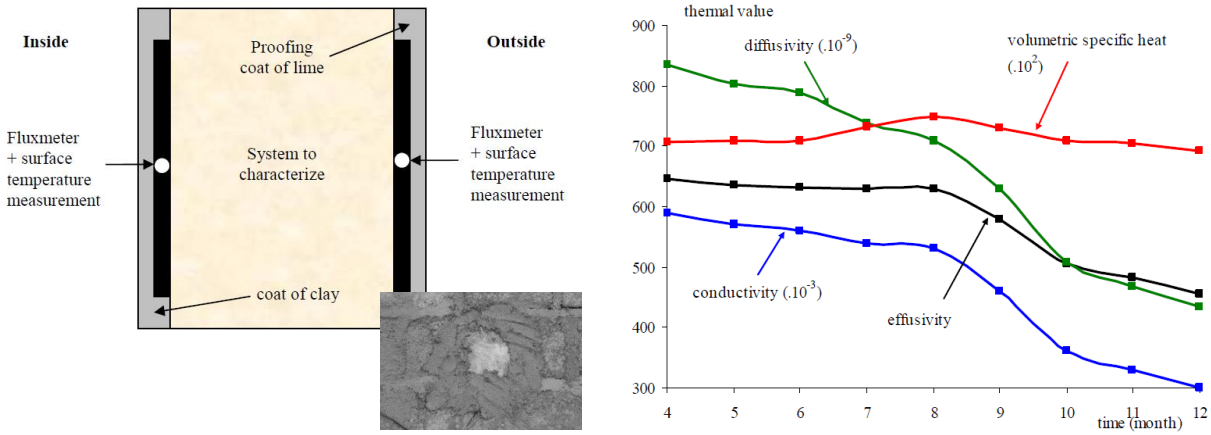


Figure I-36 : implantation des capteurs (Wu et al. 2010)

(Claude 2018) a réalisé un suivi du comportement hygrothermique de deux bâtiments anciens, un bâtiment en brique et un bâtiment en pan de bois, avant et après rénovation. Le suivi est réalisé dans des logements vacants au sein desquels une occupation est simulée à l'aide d'humidificateurs et de convecteurs électriques. Le dispositif expérimental comprend : des hygro-thermomètre placés à l'intérieur du mur au centre, des capteurs de pression à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, des thermocouples placés en contact avec les parois, sol, plafond et l'interface isolant mur, des fluxmètres fixés en surface intérieure du mur à l'aide d'une graisse conductrice et un pyranomètre pour la mesure du flux solaire (Figure I-37). Le coefficient de transmission surfacique avant rénovation, estimé par mesure de flux et de températures de surface pendant 10 jours, est de 1,35 $W.m^{-2}.K^{-1}$ pour la paroi brique et de 2,85 $W.m^{-2}.K^{-1}$ pour la paroi à pan de bois. Ces valeurs diffèrent des valeurs calculées à partir des caractéristiques des matériaux, en lien avec des défauts de planéité du mur, engendrant des résistances de contact, avec l'influence du flux solaire non pris en compte par la méthode de calcul et avec les hypothèses sur les propriétés des matériaux. Après rénovation avec 15 cm de béton de chaux-chanvre côté intérieur, le coefficient de transmission surfacique est réduit à 0,36 $W.m^{-2}.K^{-1}$ pour le bâtiment en brique et à 0,57 $W.m^{-2}.K^{-1}$ pour le bâtiment en pan de bois. Les enregistrements montrent que l'isolation chaux-chanvre modifie également l'inertie de transmission de la paroi, en augmentant le déphasage et l'amortissement.

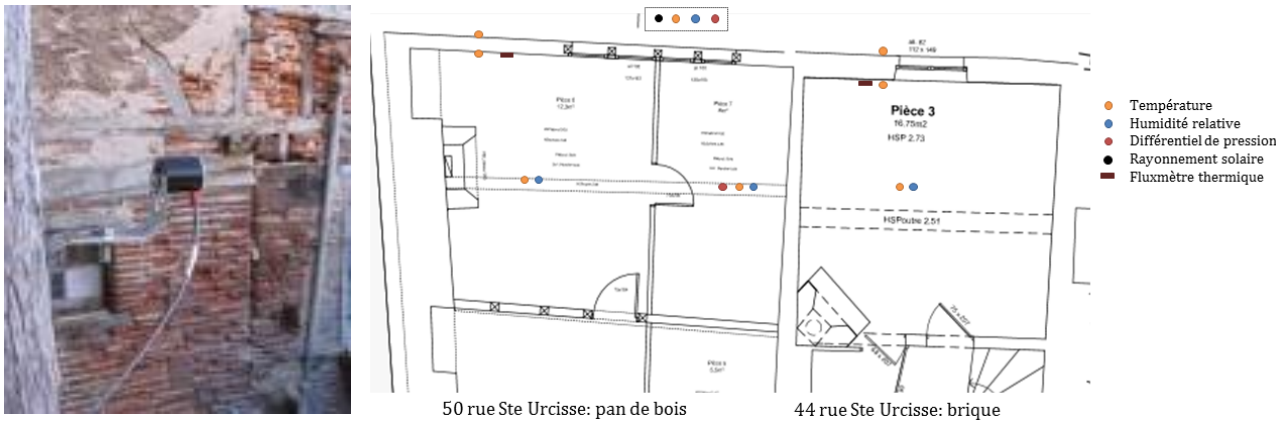


Figure I-37 : implantation des capteurs (Claude 2018)

Pour mettre en évidence l'effet du comportement thermique sur le comportement hygrique, (Piot et al. 2011) ont utilisé une cellule-test en bois de dimensions représentatives d'une salle de séjour (dimensions intérieures de 4,56×4,55×2,36m^3) et construite sur une plateforme d'exposition du CSTB à Saint-Martin d'Hères Grenoble, ce site est entouré de montagnes à l'Est et à l'Ouest (Figure I-38). La paroi se compose d'un matériau de finition à l'intérieur, d'une laine minérale de 160 mm entre les montants, d'un panneau de particules de 10mm à l'extérieur (agissant comme un matériau de contreventement), recouvert d'un pare-vapeur (Sd = 78 m). Le bardage est composé de planches de mélèze (20mm d'épaisseur, 80mm de hauteur), espacées verticalement de 1 cm. Les planches sont maintenues ensemble au moyen de tasseaux verticaux, créant ainsi une lame d'air ventilée de 27 mm entre le bardage et le mur lui-même. Les plancher et plafond sont isolés avec 400 mm de laine minérale avec 2 pare-vapeur pour atteindre Sd=150m. La porte de la maison test a été isolée avec du polystyrène. La maison test est également équipée d'un système de ventilation, d'un dispositif de chauffage, et d'un système de génération de vapeur. Les murs sont instrumentés avec un fluxmètre et avec des thermocouples et des thermo-hygromètres à différentes épaisseurs, à différentes altitudes et sur les différentes orientations (Figure I-38). Des mesures d'ambiance sont réalisées à trois altitudes avec des thermo-hygromètres et une mesure de température opérative est réalisée au centre de la pièce. Les auteurs étudient une situation où la cellule est exposée aux conditions extérieures naturelles, l'ambiance intérieure est maintenue à 20°C. De fortes variations journalières de température (10 ◦C ou plus d'amplitude) sont observées. Les résultats montrent la forte corrélation entre les variations de la température de surface extérieure et la pression de vapeur à l'intérieur du mur. Ces résultats ont été confirmés par un modèle numérique.

Figure I-38 : Vue de la cellule, composition et instrumentation des parois (Piot et al. 2011)

(Piot et al. 2015) réalisent une étude comparative au moyen de cellules d'essai jumelles parallélépipédiques d'un volume d'environ 30 m^3 chacune (Figure I-40). Le mur d'essai est construit en façade tandis que les cinq autres murs sont hautement isolés. Les deux parois considérées sont en béton de chanvre. Ces parois diffèrent par leur revêtement extérieur : un enduit extérieur industriel fourni par VPI (Vicat Produits Industriels) pour l'une et un enduit extérieur traditionnel à base de chaux pour l'autre. Un poteau béton est noyé au sein de chaque paroi. Les parois sont soumises au climat extérieur. Elles sont orientées au sud. L'ambiance intérieure est régulée en température et un humidificateur à ultra-son permet un apport d'humidité dont la quantité est contrôlée par pesée. Le suivi est réalisé sur un an. Les parois sont instrumentées en température, en humidité relative et en flux de chaleur. Les profils sont répétés sur la hauteur et en largeur de la paroi (Figure I-40). Pour vérifier le comportement hygroscopique des blocs de béton de chanvre, les cellules sont régulées à une température constante de 25°C et sont soumises à une humidification pendant 6 heures par jour durant un mois. Au cours des cycles l'ambiance intérieure atteint 90 % et redescend à 40 % la nuit alors qu'à l'arrière de l'enduit intérieur, elle oscille entre 50 et 60%. Les variations sont réduites par l'enduit et amorties par l'hygroscopicité du béton de chanvre. L'étude est complétée vis-à-vis de la protection à la pluie en aspergeant la paroi avec 4 litres d'eau en quelques minutes. Les résultats montrent que le béton de chanvre est sensible aux propriétés de l'enduit appliqué en extérieur, celui-ci doit être le plus étanche possible à l'eau liquide tout en étant perméable à la vapeur afin d'éviter l'accumulation d'humidité au sein du béton de chanvre, qui pourrait réduire les performances de la paroi et engendrer des problèmes de durabilité.

Figure I-39 : Cellules tests (Piot et al. 2015)

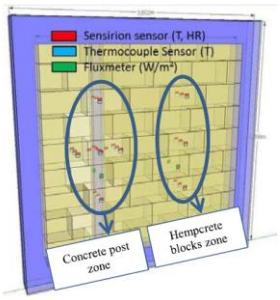


Figure I-40 : Instrumentation (Piot et al. 2015)

(Brachelet et al. 2020) étudient la rénovation thermique d'un plafond sur combles d'une maison traditionnelle en brique et torchis de 1610 située dans la Flandre maritime française. Avant la réhabilitation, le plafond était isolé avec de la laine de verre. Elle est remplacée par un matériau en vrac : des anas de lin, préalablement étudiés en laboratoire. Des capteurs de température et d'humidité relative sont répartis dans l'épaisseur de l'isolant et en ambiance de part et d'autre. Le suivi est réalisé de février à novembre 2016 et les résultats sont présentés pour les mois de février et d'août, représentatifs des périodes hivernales et estivales. En hiver, l'humidité relative reste stable dans l'isolant même si elle varie beaucoup dans les combles, la température moyenne dans les anas de lin en vrac est de l'ordre de 10°C et les amplitudes de température sont bien amorties par l'isolation. En été, l'humidité relative moyenne dans les combles est plus basse, en lien avec la température qui est plus élevée et l'humidité relative au sein des anas de lin est homogène, de l'ordre de 60%. Les amplitudes de températures observées dans les combles sont bien amorties, de 21 °C à 3 °C sur 24 heures et le déphasage est de 7 heures. Au bilan, les niveaux d'humidité observés dans les matériaux n'indiquent pas de risque de développement de moisissures.

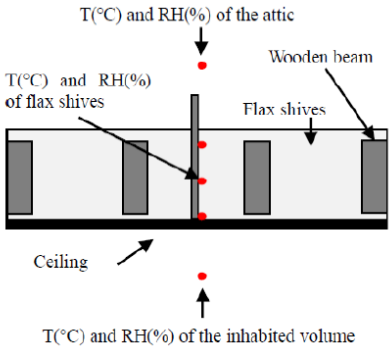


Figure I-41 : Isolation en anas de lin et implantation des capteurs (Brachelet et al. 2020)

(Medjelekh et al. 2016) réalisent un suivi expérimental sur une maison à ossature bois située à Ussanges (Treignac en France), correspondant à un climat type océanique. Les murs sont étanchés sur le pourtour via un pare-vapeur/pare-air et sont recouverts par un bardage en bois. Les rampants de toiture sont recouverts d'un écran sous-toiture réfléchissant, une ventilation de 38 mm et une isolation en laine de verre. La maison est instrumentée par deux sondes pour la mesure de la température et l'humidité relative ambiantes intérieures et deux sondes sous abris pour la mesure de la température et l'humidité ambiantes relative extérieures (Figure I-42). L'évolution de la température et de l'humidité de l'air intérieur et extérieur est suivie pendant la période d'été, d'hiver et de mi-saison pour analyser les performances et le niveau du confort hygrothermique. Les résultats montrent que le bâtiment a une inertie thermique moyenne et une bonne isolation thermique puisque l'ambiance intérieure est protégée des surchauffes extrêmes extérieures. Hygriquement, l'humidité de l'ambiance intérieure est très stable et ne dépend que légèrement des variations extérieures. Les échanges hygriques se font alors uniquement sur les couches du matériau placé coté intérieur par rapport au pare-vapeur/pare-air.

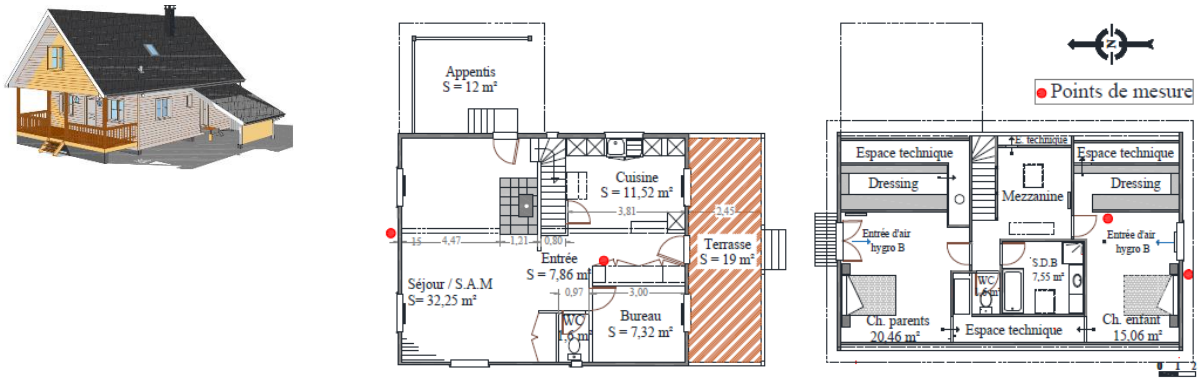


Figure I-42 : Vue et instrumentation de la maison (Medjelekh et al. 2016)

(Medjelekh 2017) étudie une maison en terre et paille situé dans la région aride d'Ouled Ammar, Biskra Algérie. Les murs sont en moellons de terre et paille, comprimés dans des moules et séchés au soleil. Ils sont revêtus d'un enduit de ciment et plâtre du côté intérieur et laissés sans revêtement du côté extérieur. Le toit se compose d'une couche d'argile entreposée sur des solives et poutres en bois apparentes (Figure I-43). La maison est équipée par des ventilateurs en plafond fonctionnent le jour en été et Un chauffage d'appoint à gaz butane fonctionne les soirs d'hiver. La maison est instrumentée en température et en humidité relative ambiante. Pendant la saison d'été, l'enveloppe en terre/paille est capable de pallier aux problèmes de surchauffes de la région. La mesure du déphasage et de l'amortissement montre la forte inertie thermique de la paroi. Les mesures ambiantes montrent un bon niveau de confort lié à la capacité du terre-paille à réguler l'humidité interne.

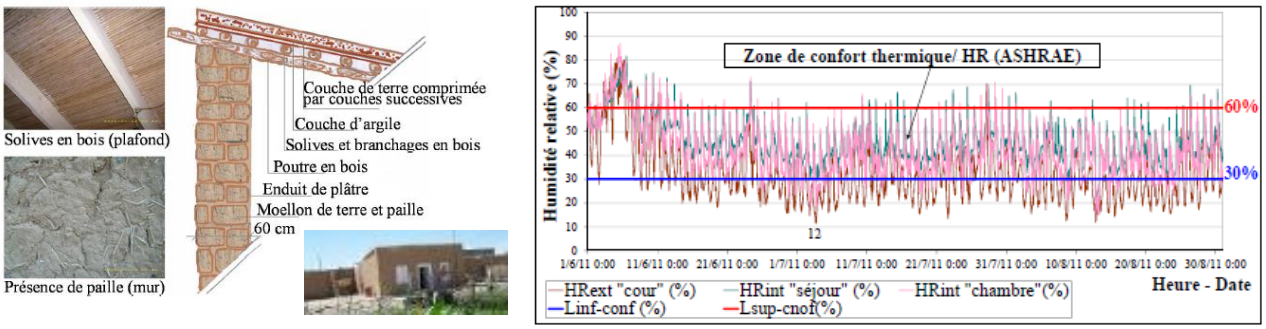


Figure I-43 : Maison étudiée, humidité relative intérieure et limites de confort (Medjelekh 2017)

I.4 Modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité

Le transfert et le stockage de chaleur et de masse dans les milieux poreux sont deux phénomènes fortement couplés. Une bonne représentation du comportement hygrothermique au niveau des matériaux de constructions humides ne peut être atteinte sans tenir compte du couplage des transferts thermiques et massiques.

La température et l'humidité ont un impact très important sur les principales propriétés thermiques et hygriques caractérisant le transfert hygrothermique dans un milieu poreux. Ainsi, l'état hydrique impacte les propriétés thermiques comme la chaleur spécifique et la conductivité thermique (Taoukil et al. 2013). La température modifie les propriétés hydriques telles que l'isotherme de sorption et la diffusivité hygrique (Trabelsi et al. 2013). L'augmentation de la teneur en eau du matériau conduit à une augmentation du flux de chaleur due à la fois à l'augmentation de la conductivité thermique et au transport de chaleur associé au transfert d'humidité.

Dans un matériau de construction exposé à des gradients d'humidité élevées et sous un gradient de température, le phénomène de changement de phase à l'intérieur du matériau peut influencer sur le transfert thermique. (Künzel 1995) a montré que le phénomène de changement de phase peut augmenter le flux thermique dans certains matériaux isolants exposés à des hautes humidités relatives. La prise en compte du changement de phase dans le transfert thermique se traduit par l'ajout d'un terme traduisant la chaleur latente.

I.4.1 Modèles mathématiques des transferts couplés de chaleur et d'humidité

Différents modèles mathématiques décrivent le couplage entre ces deux modes de transferts comme le modèle de Philip et De Vries (Philip and De Vries 1957), le modèle de Künzel (Künzel 1995) ou le modèle de Luikov (Luikov 1975).

I.4.1.1 Modèle de Philip et De Vries

La théorie de Philip et De Vries (Philip and De Vries 1957) exprime le transfert hygrothermique à partir de la teneur en eau et de la température. Le transfert de chaleur est considéré purement conductif. Le transfert d'humidité est pris en compte sous un gradient thermique. Le système d'équation de ce modèle est :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \nabla(D_T \ \nabla T) + (D_W \nabla W) + \nabla K \qquad \text{I-11}$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + L_v \nabla(D_W \nabla W) \qquad \text{I-12}$$

avec D_T le coefficient de diffusion d'humidité non-isotherme (m²/s·K), D_W le coefficient de diffusion d'humidité isotherme (m²/s), λ la conductivité thermique (W/(m·K)), ρ la masse volumique (kg/m³), C_p la chaleur spécifique du matériau (J/(kg.K)), L_v la chaleur latente de changement de phase (J/kg) et W la teneur en eau volumique (kg/m³).

Le choix de la teneur en eau comme variable conduit à un problème de discontinuité aux interfaces.

I.4.1.2 Modèle de Luikov

Le modèle de Luikov (Luikov 1975) considère également la température et la teneur en eau comme variables. Le transfert de chaleur est considéré purement conductif. L'humidité est transportée sous l'effet du gradient de température et du gradient de teneur en eau. En effet, il prend en considération les phénomènes de thermodiffusion et la diffusion de l'eau soit sous forme liquide ou soit sous forme vapeur. Le système d'équation de ce modèle est :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \ (D_m \ (\nabla w + \ \delta_s \ \nabla T) \qquad \text{I-13}$$

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(D_T \nabla T) + L_v \varepsilon \rho_s \frac{\partial w}{\partial t} \qquad \text{I-14}$$

avec D_T le coefficient de diffusion d'humidité non-isotherme (m²/s·K), D_m le coefficient de diffusion total (m²/s), δ_s le coefficient de thermodiffusion, $\varepsilon\rho_s \frac{\partial w}{\partial t}$ le taux de changement de phase kg/(m³·s), L_v la chaleur latente de changement de phase (J/kg), w le teneur en eau massique (kg/kg).

Du fait de choisir la teneur en eau comme variable, il existe un problème de discontinuité aux interfaces.

I.4.1.3 Modèle de Künzel

Le modèle (Künzel 1995) considère la température et l'humidité relative comme variables. Cela permet de gérer les problèmes de discontinuité aux interfaces. Le système d'équation de ce modèle est :

$$\frac{\partial W}{\partial \varphi} . \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla . (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi . P_{sat})) \qquad \text{I-15}$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} . \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla . (\lambda \nabla T) + h_v \nabla . (\delta_p \nabla(\varphi . P_{sat})) \qquad \text{I-16}$$

avec: ∂W/∂φ: capacité de stockage d'humidité de la paroi (kg/m³), ∂H/∂T: capacité de stockage de chaleur de la paroi (J/(m³.K), *W* la teneur en eau volumique (kg/m³), φ l'humidité relative (-),t le temps (s), D_φ le coefficient de transport de liquide du matériau de construction (kg.m/ s), δ_p la perméabilité à la vapeur d'eau (kg/ (m.s. Pa)), P_{sat} la pression partielle de la vapeur d'eau saturée dans l'air (Pa), H l'enthalpie (J), T est la température (°C), λ la conductivité thermique (W/(m.K)), h_v la chaleur latente d'évaporation de l'eau (J/kg).

I.4.2 Simulation numérique des phénomènes

La plupart des codes élaborés s'appuient sur ces modèles. Leurs principales différences sur le traitement hygrothermique proviennent du choix du modèle et des hypothèses prises en compte telle que la prise en compte des effets de la température et de l'humidité sur les propriétés thermiques et hydrique, la prise en compte du phénomène d'hystérésis, la prise en compte de la cinétique.

(Tran Le et al. 2010) et (Maalouf et al. 2014) modélisent le transfert hygrothermique unidimensionnel en utilisant le modèle Künzel, en l'implémentant dans l'environnement Spark, en discrétisant selon la technique de différence finie. Ce modèle a été validé par comparaison à des études expérimentales. La simulation du comportement hygrothermique d'une cellule en béton de chanvre montre que la capacité d'absorption d'humidité du béton de chanvre modère la variation de l'humidité intérieure. La performance de l'enveloppe a été évaluée avec la température opérative et l'humidité relative intérieure et fait apparaître des risques de surchauffe à Marseille, Bordeaux et Carpentras du fait de la faible de la faible effusivité du béton de chanvre. Le couplage avec des protections solaires et de la surventilation nocturne permet de les réduire.

(Oumeziane 2012) développe un modèle numérique unidimensionnel de transfert de chaleur et de masse basé sur les travaux de Künzel, implémenté dans Matlab. Ce modèle peut prendre en compte ou non l'hystérésis de sorption et le transfert d'air. Les comparaisons entre simulations et expériences sur une paroi en béton de chanvre montrent que la prise en compte de l'hystérésis permet un meilleur ajustement des résultats numériques et expérimentaux. (Reuge et al. 2020) ont poursuivi le développement du modèle en prenant en compte une cinétique locale. La comparaison avec les mesures effectuées dans le cadre du projet Isobio, sur une paroi multi-couches composée de matériaux bio-sourcés, confirme la pertinence de l'approche cinétique locale.

(Seng et al. 2021) développent un modèle numérique de transfert de chaleur et de masse basé sur les travaux de Künzel en utilisant la discrétisation selon la méthode des éléments finis. Ce modèle a été validé par comparaison à des études expérimentales. La simulation du comportement hygrothermique d'un mur en béton de chanvre montre la capacité de ce matériau à amortir une sollicitation sinusoïdale thermique et hygrique, et à retarder sa propagation à travers le mur, comparativement à un mur à base de béton.

Outre les codes développés en laboratoire, il existe plusieurs codes commerciaux. Parmi ceux-ci, Wufi est un logiciel basé sur le modèle de Künzel et développé par l'Institut Fraunhofer pour la physique du bâtiment (IBP) à Holzkirchen en Allemagne. Plusieurs versions existent pour étudier les parois en transfert monodimensionnel (WUFI Pro), bidimensionnel (WUFI 2D) ou à l'échelle du bâtiment (WUFI Plus). Il est utilisé par différents auteurs dans le cadre de leurs études et en général comparé à des campagnes expérimentales, y compris pour des matériaux bio-sourcés ou des matériaux à changement de phase.

(Sanders et al. 2014) comparent des mesures expérimentales faites sur un mur en grés isolé par l'intérieur avec une couche de laine minérale, avec des simulations réalisées sur WUFI 2D. Les conditions aux limites correspondent aux mesures expérimentales de température, d'humidité relative et de rayonnement solaire. Les paramètres caractéristiques des matériaux sont de la base de donnée de WUFI, pour des matériaux proches. L'étude numérique montre un bon accord en température et un écart important en humidité relative entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques. Ceci peut provenir des paramètres choisi dans la base de données et souligne la nécessité de les connaître précisément.

(Knarud et Geving 2017) comparent deux logiciels de modélisation : Comsol Multiphysics et WUFI 2D. L'étude est réalisée à l'échelle d'une paroi en brique isolée par l'intérieur en laine minérale et intégrant une poutre bois sur une période de deux ans. La comparaison montre des résultats similaires entre Comsol Multiphysics et WUFI 2D. Toutefois, des écarts apparaissent selon les solicitations météorologiques. En effet, Wufi conduit en général à des humidités relatives plus élevées suite à l'absorption de pluie. Comsol conduit à des plus grandes augmentations en température, suite à l'absorption du rayonnement direct courtes longueurs d'ondes.

(Ozolins et al. 2013) comparent Comsol Multiphysics et WUFI Plus à des résultats expérimentaux pour le cas de deux cellules test constituées de matériaux à base de bois et de laine

minérale, construites à Riga, en Lettonie. Des façades ventilées sont créées pour protéger les murs extérieurs de la pluie, du rayonnement solaire et du vent. Les conditions aux limites correspondent aux données expérimentales à l'extérieur. Pour Comsol, en ambiance intérieure, les conditions aux limites correspondent soit à l'ambiance mesurée soit à une valeur constante de 20°C et 50%. Pour Wufi, en ambiance intérieure, les conditions aux limites correspondent soit à l'ambiance mesurée soit à un calcul par le logiciel. Lorsque la façade est ventilée et que les données expérimentales sont considérées en entrées, les résultats calculés avec Wufi et avec Comsol sont en accord avec les mesures. Toutefois, les humidités relatives sont un peu surestimées.

(Wihan 2007) compare des mesures expérimentales faites sur deux maisons construites en paille situées en Bretagne (France) et en région flamande (Belgique), avec des simulations réalisées sur WUFI Plus. L'étude sur la maison en région flamande s'intéresse à un comportement hygrothermique en conditions représentatives de l'usage pendant cinq mois. L'étude sur la maison en Bretagne porte sur un épisode orageux. Les conditions aux limites et paramètres d'entrée dans WUFI, correspondent aux données expérimentales. L'étude en conditions d'usage montre que les résultats numériques sont globalement cohérents avec les résultats expérimentaux même si l'infiltration d'air et la convection du flux d'air ne sont pas pris en compte en modélisation. Toutefois, il souligne la nécessité de positionner les capteurs d'ambiance à proximité de la zone d'instrumentation du mur pour avoir des conditions aux limites correspondant exactement à celles auxquelles sont soumises le mur. D'autre part, il indique la nécessité de bien connaître les caractéristiques hygrothermiques des matériaux, et en particulier la conductivité thermique. En outre, le logiciel a permis de simuler correctement le séchage à l'issue de l'épisode orageux.

I.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les propriétés hygrothermiques des matériaux biosourcés. Ils présentent une gamme étendue de masse volumique leur permettant d'assurer différentes fonctions. D'un point de vue thermique, ils peuvent assurer un rôle d'isolant, d'isolation répartie ou de correcteur thermique. D'un point de vue hygrique, ils sont hygroscopiques et présentent de bonne capacités de régulation de l'humidité relative ambiante. Ceux-ci ont largement été étudiés à l'échelle du matériau. Après caractérisation à l'échelle du matériau, il est nécessaire de s'intéresser à la caractérisation à l'échelle de la paroi ou du bâtiment.

Ainsi, l'étude bibliographique se poursuit en répertoriant les différents types d'études réalisées à ces échelles. A l'échelle de la paroi, différents types de dispositifs sont utilisés en laboratoire, ceux-ci diffèrent par la maîtrise des ambiances qui peuvent être contrôlées soit d'un côté soit des deux. A l'échelle du bâtiment, les études portent sur des cellules test ou sur des bâtiments réels neuf ou rénové instrumentés, chauffés ou non. Les parois sont généralement instrumentées en température, en humidité relative et en flux de chaleur. L'analyse des résultats porte sur le suivi cinétique de ces variables. Elle permet de déterminer les flux de chaleur échangés et les coefficients de transmission surfacique, des déphasages et des amortissements. Elle peut être complétée par des études de confort. Pour les suivis in-situ, sur de longues périodes, l'analyse porte en générale sur des séquences soit représentatives soit de conditions extrêmes.

La dernière partie du chapitre s'intéresse aux méthodes numériques utilisées pour simuler le comportement hygrothermique des parois ou des bâtiments. Les codes sont souvent confrontés à des résultats expérimentaux ou entre eux pour analyser leur capacité à simuler les phénomènes. Le logiciel Wufi donne des résultats cohérents y compris pour des matériaux bio-sourcés.

Cette étude bibliographique confirme l'intérêt d'étudier les matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi et du bâtiment. Dans le cadre de cette thèse, les études en laboratoire seront menées en ambiance contrôlée de part et d'autre de la paroi. Celles-ci seront modélisées avec le logiciel Wufi Pro. Enfin, un suivi expérimental d'un bâtiment rénové en béton de chanvre sera mené.

Chapitre II Présentation des études expérimentales et numériques en conditions contrôlées et des méthodes d'analyse

Sommaire

II.1 Etudes expérimentales 35
II.1.1 Dispositif expérimental 35
II.1.1.1 Enceinte et équipements 35
II.1.1.2 Régulation 37
II.1.2 Parois testées et métrologie 38
II.1.2.1 Paroi Terre - Chanvre 39
II.1.2.2 La paroi ISOBIO 40
II.1.2.3 Paroi Maïs : paroi avec des panneaux de PVA-chanvre et un parement intérieur en résidus de rafles de maïs 41
II.1.2.4 Paroi Colza : paroi avec des panneaux de résidus de paille de colza 42
II.1.2.5 Synthèse des propriétés des matériaux 43
II.1.3 Métrologie 43
II.1.3.1 Présentation des capteurs 43
II.1.3.2 Implantation 45
II.1.4 Sollicitations 48
II.1.4.1 Généralités sur les climats 48
II.1.4.2 Sélection des villes 49
II.1.4.3 Conditions caractéristiques pour une journée type de chaque ville 51
II.1.4.4 Scenarii de températures et d'humidités relatives ambiantes intérieure et extérieure réalisés. 54
II.2 Etudes numériques 57
II.2.1 Equations et modèle de base 57
II.2.2 Modélisation de la paroi Terre - Chanvre 58
II.2.2.1 Définition de la composition 58
II.2.2.2 Maillage 59
II.2.3 Conditions de simulation 60
II.2.3.1 Conditions initiales 60
II.2.3.2 Conditions aux limites 60
II.2.3.3 Période de calcul et pas de temps 61
II.2.4 Type de résultats 61

II.3 Méthodes d'analyse des résultats 61

II.3.1 Calcul de la pression de vapeur 61

II.3.2 Analyse sous conditions de gradients de température et de pression de vapeur constants 61

II.3.3 Analyse sous sollicitations cycliques 62

II.4 Conclusion 63

Ce chapitre présente les méthodes expérimentales et numériques utilisées pour étudier le comportement hygrothermique de parois bio-sourcées ainsi que les méthodes d'analyse des résultats. La présentation de l'étude expérimentale détaille l'enceinte bi-climatique et ses équipements, les parois étudiées, la métrologie et les sollicitations appliquées. Celles-ci sont définies de manière à être représentatives de climats français et tunisiens, avec et sans soleil. L'étude numérique est réalisée avec le logiciel WUFI Pro 6.5. Après avoir présenté le logiciel, une étude préliminaire est réalisée sur une paroi en béton de chanvre dans le cadre du benchmark du GDR MBS, afin de vérifier la réponse obtenue avec ce logiciel pour des matériaux bio-sourcés. Enfin les méthodes d'analyse des résultats sont distinguées selon deux cas : pour des sollicitations sous gradients de température et de pression de vapeur constants et sous sollicitations cycliques journalières.

II.1 Etudes expérimentales

II.1.1 Dispositif expérimental

II.1.1.1 Enceinte et équipements

L'enceinte bi-climatique du LGCGM comprend deux chambres climatisées adjacentes séparées par un mur d'essai (Figure II-1). Chaque pièce mesure 2,35 m de profondeur, 2,78 m de largeur et 2,4 m de hauteur. Le sol est en béton et toutes les autres parois sont isolées par des panneaux de polyuréthane (U = 0,40 W/(m².K)) étanches à l'air et à l'humidité. Une des chambres climatisées reproduit le climat intérieur, tandis que l'autre simule les conditions climatiques extérieures.

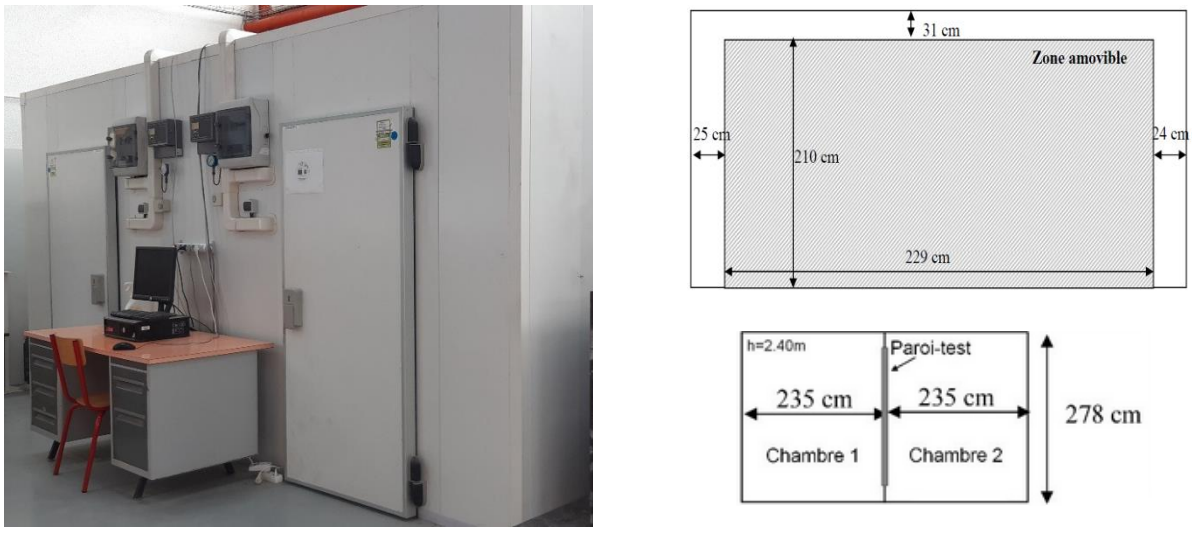


Figure II-1 : Dispositif expérimental utilisé

Les plages de fonctionnement théoriques de ces deux chambres sont présentées dans le et sur le diagramme de l'air humide Figure II-2.

Tableau II-1 : Plages de température et d'humidité relative des chambres climatiques

Chambre 1 (climat intérieur)	Chambre 2 (climat extérieur)
Température 18 à 27 °C (+/-) 0,5°C	Température -5 à 35 °C (+/-) 0,5°C
Humidité relative : 30 à 60 % (+/-) 2%	Humidité relative : 30 à 90 % (+/-) 2%

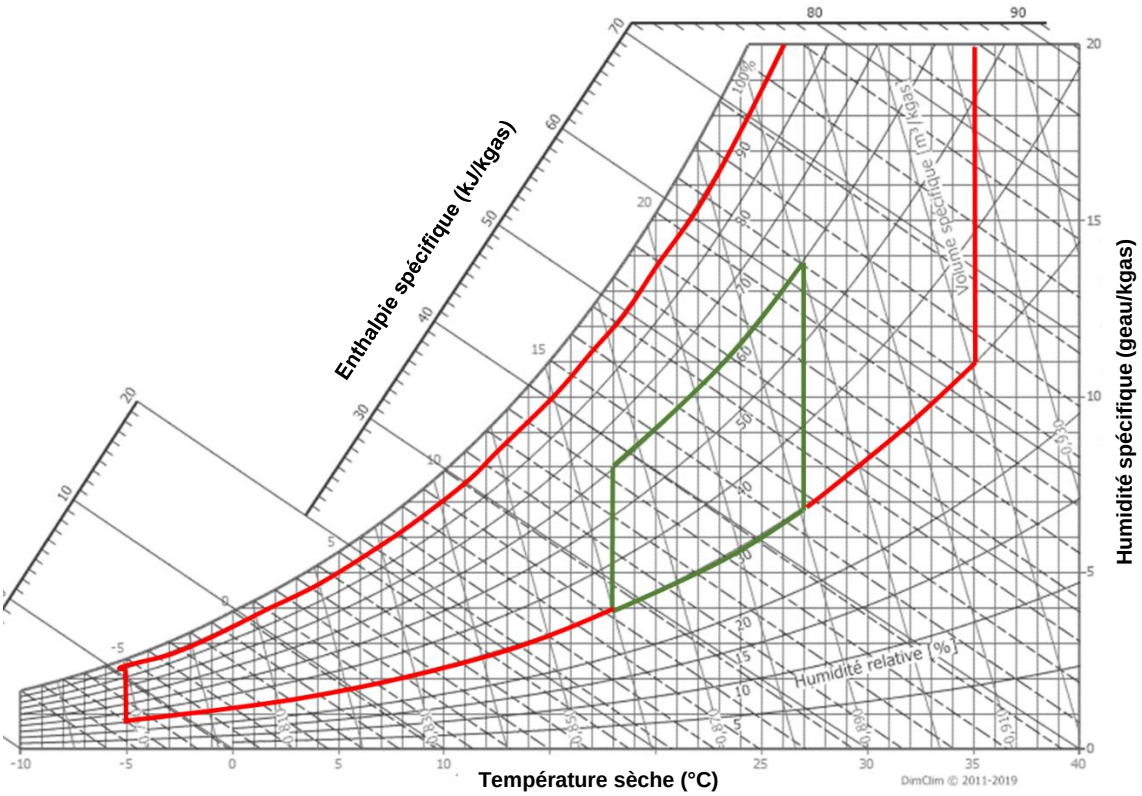


Figure II-2 : Plages de fonctionnement de l'enceinte bi-climatique : vert chambre 1 simulant l'ambiance intérieure, rouge : chambre 2 simulant l'ambiance extérieure

L'enceinte bi-climatique est équipée :

- de convecteurs électriques (ambiance intérieure : 500 / 1000 W ; ambiance extérieure : 1000 / 1500 W + appoint 0 - 1500 W) (Figure II-3),
- de groupes frigorifiques (Figure II-4) (ambiance intérieure : 975 W HP 30 bar; ambiance extérieure : 1570 W + HP 26 bar) 975 W,
- d'humidificateurs à ultrasons VAPATRONIC HU 85, avec une rampe de diffusion en PVC blanc D80 (Figure II-4).

Figure II-3 : Convecteurs

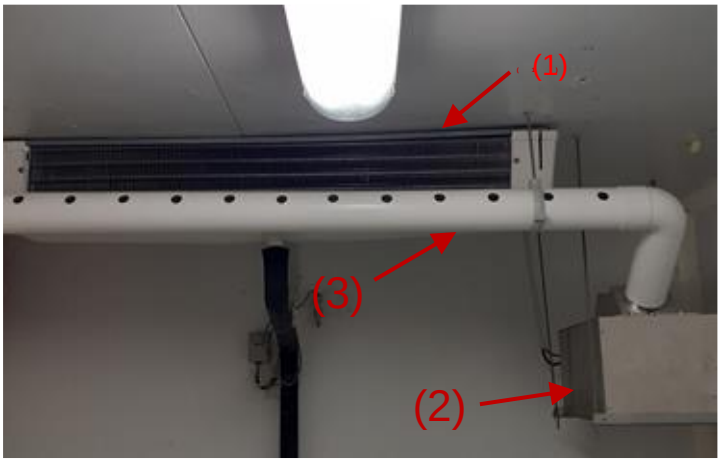


Figure II-4: Evaporateur du groupe frigorifique (1), humidificateur (2) et rampe de diffusion (3)

Un ventilateur à faible vitesse de rotation est utilisé dans chaque chambre afin d'homogénéiser les ambiances tout en limitant les vitesses d'air pour être représentatif des vitesses rencontrées dans les bâtiments. La Figure II-5 montre les températures et les humidités relatives ambiantes mesurées à 4 positions différentes, au voisinage des murs test présentés section II.1.2., pour une chambre avec brassage de l'air et une chambre sans. Dans le cas de la chambre avec brassage,

les températures et humidités relatives mesurées aux 4 positions sont similaires. Dans le cas de la chambre sans brassage, des écarts sont constatés entre les différentes positions. Ceci souligne l'efficacité du brassage de l'air pour homogénéiser les ambiances.

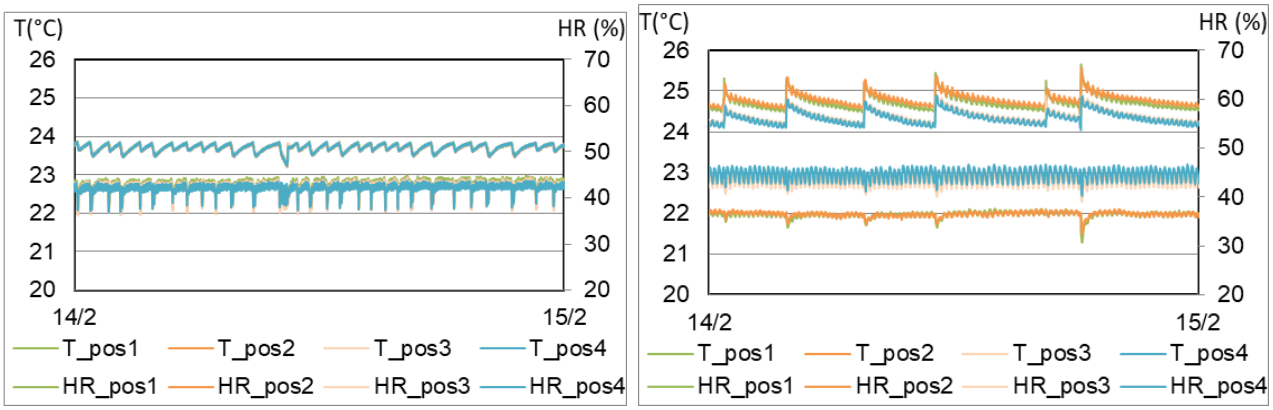


Figure II-5: Effet de brassage de l'air – Gauche : chambre intérieure avec brassage de l'air – Droite : chambre extérieure sans brassage de l'air

II.1.1.2 Régulation

Pour chaque chambre, la température est régulée par un régulateur universel DR4020 qui agit sur les convecteurs pour le chauffage et sur le groupe frigorifique pour le refroidissement. L'humidité relative est régulée par un régulateur Teddington DZR-45 qui agit sur les unités de refroidissement pour la déshumidification et sur les humidificateurs à ultrasons pour l'humidification (Figure II-6).

Chaque régulateur permet de définir le point de consigne et une bande passante qui régit la mise en marche et l'arrêt des équipements.

La puissance des convecteurs est sélectionnée par une commutation manuelle en fonction de la consigne à atteindre ou maintenir. En fonction des besoins, un appoint sera ajouté.

(a) (b) (c)

Figure II-6: Dispositifs de régulation (a) DR4020, (b) Teddington DZR-45, (c) commutateur manuel de puissance des convecteurs

La bande passante définie sur la régulation de la température comprend une bande haute et une bande basse qui peuvent être différentes. La limite de la bande haute contrôle le relais du groupe froid et celle de la bande basse contrôle le relais du chauffage. Typiquement, afin d'éviter des déclenchements trop rapides des équipements, les valeurs utilisées pour la chambre extérieure sont de 0,5°C pour la bande haute et la bande basse, pour la chambre intérieure elles sont de 0,2°C pour la bande haute et 0,5°C pour la bande basse.

La zone neutre de l'hygrostat est une bande centrée autour de la consigne pour laquelle aucune action n'est demandée pour éviter l'oscillation. Au-delà de la zone neutre, le relais agit de manière proportionnelle sur le groupe froid pour la déshumidification et sur l'humidificateur pour

l'humidification. Pour ces travaux, La zone neutre des deux chambres en général de 3% ce qui donne pour une consigne de 50% une zone neutre de 48,5 à 51,5% (Figure II-7).

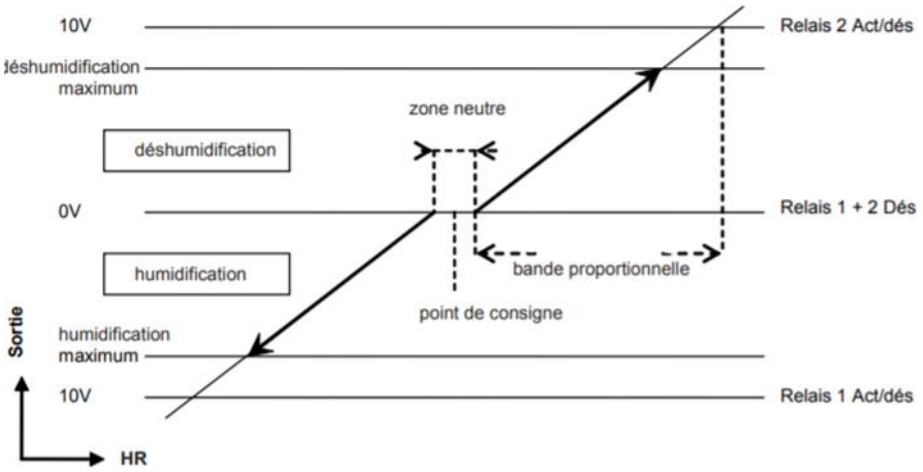


Figure II-7: Fonctionnement de l'hygrostat

II.1.2 Parois testées et métrologie

Le mur test, monté en séparation des deux chambres climatiques, mesure 2,4 m × 2,1 m (Figure II-8). Il est divisé en quatre parties correspondant à quatre parois multicouches différentes à l'aide d'un cadre en bois de section 5 cm x 30 cm. La surface de chaque partie est d'environ 1,2 m².

Figure II-8 : Vues intérieure (gauche) et extérieure (droite) des 4 parois testées après les applications des enduits intérieurs et extérieurs 1- Paroi Terre chanvre, 2 – Paroi ISOBIO, 3 – Paroi PVA-Chanvre avec parement en résidus de rafles de maïs, 4 – Paroi en résidus de paille de Colza

II.1.2.1 Paroi Terre - Chanvre

Cette solution correspond à une alternative au béton de chanvre traditionnel à base de liant à la chaux avec du chanvre. Il s'agit de la transposition à l'échelle de la paroi des composites développés dans les travaux de Brahim Mazhoud (Mazhoud 2017) La mise en œuvre est réalisée de façon banchée. Le liant à base d'argile est constitué de fines provenant de boues de lavage prélevées sur un site de production de graviers. Les fines sont stabilisées avec 5% de ciment Portland et 5% de liant à base de chaux (Thermo®). Les granulats biosourcés sont du chanvre CAVAC Biofibat®. Le rapport massique chanvre / liant est de 0,5. Pour la production, les granulats de chanvre sont pré-mouillés avec un rapport eau / chanvre de 0,4 (mélange à la main). Simultanément, la pâte de liant est préparée dans un malaxeur à béton à axe vertical en mélangeant le liant et l'eau (Eau / Liant = 0,6). Le chanvre pré-mouillé est ensuite introduit dans la pâte de liant (Figure II-9). Le mélange est ensuite versé sur place et compacté manuellement. La densité du composite est contrôlée. La densité finale du matériau est d'environ 450 kg / m^3, ce qui correspond aux densités des composites dans les travaux de Brahim Mazhoud (Mazhoud 2017) . Le mur est décoffré après une semaine et le séchage du mélange est obtenu après 2 mois (Figure II-10). Il est ensuite recouvert d'enduits côté intérieur et côté extérieur.

Figure II-9 : Production du composite – production de la pâte (gauche) et mélange avec le chanvre (droite)

Figure II-10 : Mise en œuvre de la paroi terre-chanvre (gauche) et paroi démoulée avant enduit (droite)

La composition de la paroi est la suivante (Figure II-11) :

1. Enduit extérieur chaux - chanvre BSP® développé par Lhoist-BCB dans le cadre du projet ISOBIO (LHR)
2. Composite Terre – Chanvre (WFH)
3. Enduit intérieur pelliculaire à la terre Lehm-Oberputz fein 06® (Claytec) (SCP)

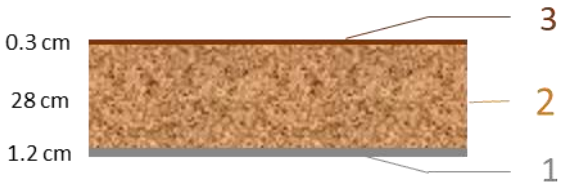


Figure II-11 : Composition de la paroi Terre - Chanvre

II.1.2.2 La paroi ISOBIO

Le projet ISOBIO ('Isobio Project' 2015) est un projet européen qui a pour objectif de développer des matériaux bio-sourcés pour l'isolation thermique des bâtiments. Diverses agro-ressources ont été étudiées et valorisées pour la production de composites. Après développement de plusieurs solutions, un composite à base de chanvre a été sélectionné pour la transposition à l'échelle industrielle. Cet isolant rigide est ensuite utilisé dans les parois-types définies pour les bâtiments neufs et la rénovation et mis en œuvre dans les bâtiments démonstrateurs du projet.

La solution ISOBIO pour les bâtiments neufs est mise en œuvre dans l'enceinte bi-climatique, conformément aux recommandations des partenaires du projet (Figure II-12) .

Cette paroi est une paroi multicouche composée de (Figure II-13) :

1. Enduit extérieur chaux-chanvre BSP® (Lhoist-BCB) (LHR)
2. Panneau d'isolation rigide en chanvre (Cavac) (CAV)
3. Isolant souple Biofib Trio (Cavac) (BFT)
4. Panneau d'OSB (OSB)
5. Membrane Intello (INT)
6. Isolant souple Biofib Trio (Cavac) (BFT)
7. Panneau de paille compressée (Lignicell) (CSB)
8. Enduit intérieur en terre (Claytec) (IEC)

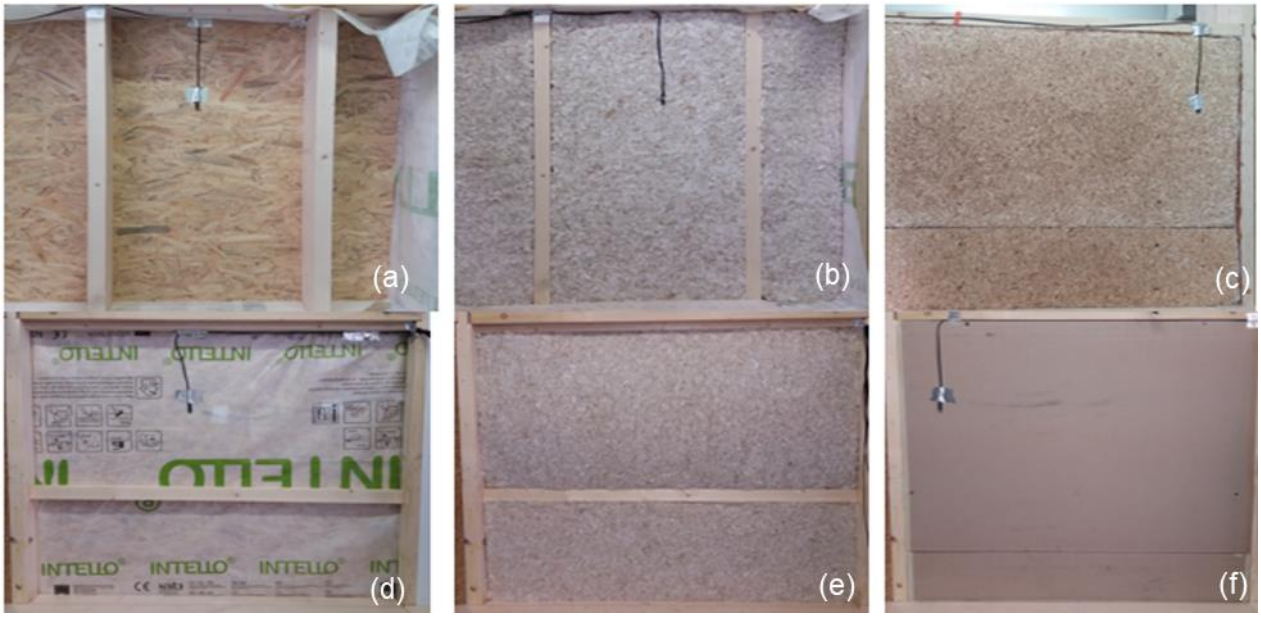


Figure II-12 : Mise en œuvre de la paroi ISOBIO - (a) OSB et ossature bois, (b) Biofib Trio 145 mm, (c) panneau CAVAC, (d) membrane intello, (e) Biofib Trio 45 mm, (f) CSB

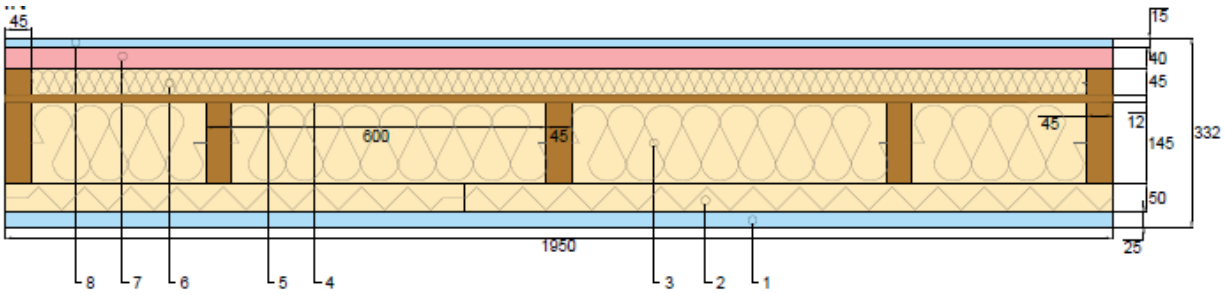


Figure II-13 : Constitution de la Paroi ISOBIO - vue en coupe

II.1.2.3 Paroi Maïs : paroi avec des panneaux de PVA-chanvre et un parement intérieur en résidus de rafles de maïs

Cette solution est réalisée avec deux types de composites développés dans le cadre du projet ISOBIO : des panneaux de PVA-Chanvre et des plaques en rafles de maïs (Viel 2018). Les panneaux sont fabriqués par compactage réalisé avec des moules en grille d'acier afin de maintenir le compactage pendant le durcissement obtenu par séchage en étuve (Figure II-14).

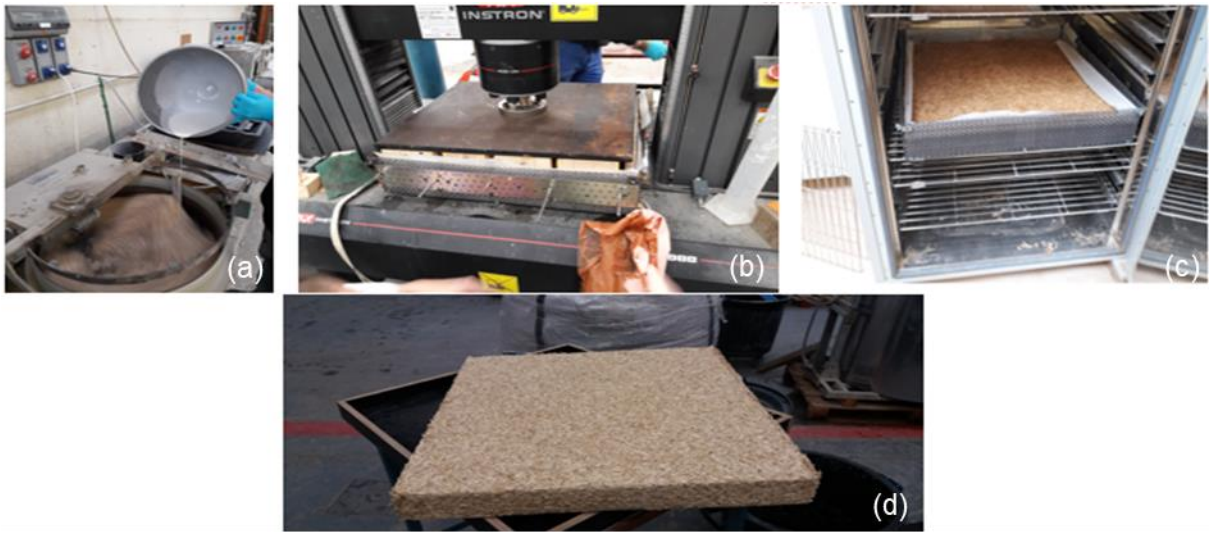


Figure II-14 : Production des panneaux PVA-Chanvre – (a) Mélange PVA – chanvre, (b) compactage, (c) étuvage, (d) panneau démoulé

A l'instar de la solution ISOBIO, cette solution comprend une ossature bois, dans laquelle est placée une couche d'isolation thermique entourée de deux panneaux de PVA-chanvre. Le parement en résidus de rafles de maïs est collé, sur la face intérieure du panneau PVA-chanvre, avec de la colle cellulosique additionnée d'extraits de rafles de maïs. Ce parement est recouvert d'un enduit pelliculaire à la terre. Le panneau extérieur est recouvert d'un enduit chaux – chanvre (Figure II-15).

Figure II-15 : Mise en œuvre de la paroi - (a) Isolant Biofib Trio posé dans l'ossature bois, (b) panneaux PVA-Chanvre, (c) collage du parement en résidus de rafle de maïs, (d) mise en œuvre de l'enduit

Cette paroi est une paroi multicouche composée de (Figure II-16) :

1. Enduit extérieur chaux-chanvre BSP® (Lhoist-BCB) (LHR)
2. Panneau PVA – Chanvre (HPP)
3. Isolant souple Biofib Trio (Cavac) (BFT)
4. Panneau PVA – Chanvre (HPP)
5. Panneau Résidu Rafles de Maïs (CCR)
6. Enduit intérieur pelliculaire à la terre Lehm-Oberputz fein 06® (Claytec) (SCP)

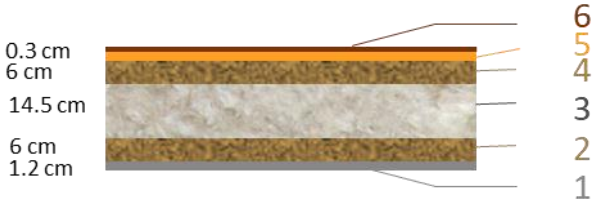


Figure II-16 : Composition de la paroi PVA-Chanvre / parement en résidu de rafles de maïs

II.1.2.4 Paroi Colza : paroi avec des panneaux de résidus de paille de colza

Cette solution est réalisée avec des panneaux de résidus de paille de colza développés dans le cadre du projet ISOBIO. Ce type de matériau présente des propriétés auto-liantes après extraction. Pour transposer à cette échelle, l'extraction est réalisée sur la paille de colza dans un grand réservoir. Après filtration, les résidus de paille de colza sont placés dans un moule afin d'être compactés. Une grille est utilisée pour maintenir en pression durant le séchage à l'étuve à 105 °C (Figure II-17).

Figure II-17 : Production de panneaux de résidus de paille de colza – (a) macération, (b) filtration, (c) résidus de paille de colza, (d) moulage, (e) panneau de résidus de paille de colza démoulés.

Cette solution comprend une ossature bois, dans laquelle est placée une couche d'isolant thermique en Biofib Trio entourée de deux panneaux de résidus de paille de colza. Elle est recouverte d'un enduit intérieur en terre et d'un enduit extérieur en chaux-chanvre (Figure II-18).

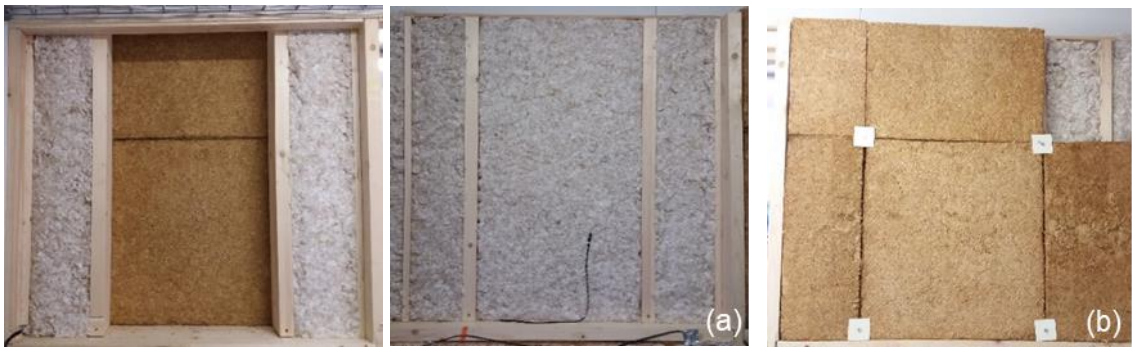


Figure II-18 : Mise en œuvre; (a) Isolant Biofib Trio, (b) Panneau en résidus de paille de colza

Cette paroi multicouche est composée de (Figure II-19) :

1. Enduit extérieur chaux-chanvre BSP® (Lhoist-BCB) (LHR)
2. Panneau en résidus de paille de colza (RRP)
3. Isolant souple Biofib Trio (Cavac) (BFT)
4. Panneau en résidus de paille de colza (RRP)
5. Enduit intérieur terre (IEC)

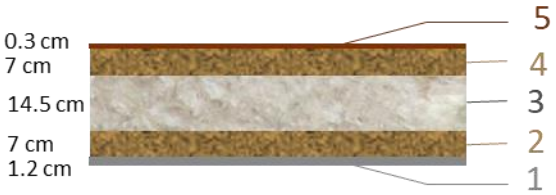


Figure II-19 : Composition de la paroi en résidus de colza

II.1.2.5 Synthèse des propriétés des matériaux

Les composites Terre - Chanvre ont été caractérisés dans le cadre de la thèse de Brahim Mazhoud (Mazhoud 2017) et (Mazhoud et al. 2021). Les autres matériaux ont été caractérisés dans le cadre du projet ISOBIO ('Isobio Project' 2015) et la thèse (Viel 2018). Pour l'enduit pelliculaire terre SCP, les données sont issues d'un matériau équivalent de la base WUFI Pro 6.5.

Tableau II-2 : Propriétés multi-physiques des matériaux utilisés dans les parois test

matériau	ρ_0 (kg/m^3)	ε_0	μ_{0-50}	μ_{53-88}	MBV (g/(m².%HR)	λ_0 (W/(m.K))	C_{p0} (J/(kg.K))
LHR	785	0,631	13	10,6	1	0,28	1006*
WFH	448	0,76	4,3	-	2,24	0,11	1250*
SCP	1514	0,42	11,3	-	-	0,65	850
CAV	190	0,882	11.0	4,6	1,70	0,07	2100
BFT	26,5	0,982	3,6	2,0	1,34	0,038**	1800**
OSB	551	0,609	138,3	45,4	0,53	0,13**	1600**
INT	85**	0,085**	1,364 10^{5**}	-	-	2,4**	2500**
CSB	449	0,720	27,2	8,5	0,77	0,15	-
IEC	1392**	0,294**	10**	-	-	0,62**	1040**
HPP	140	0,915	3,2	0,8	2,20	0,06	-
CCR	481	0,615	-	-	4,8	0,14	-
RRP	155	0,902	3,4	1,4	4,67	0,06**	-

* Valeurs estimées ; ** valeurs fabricant

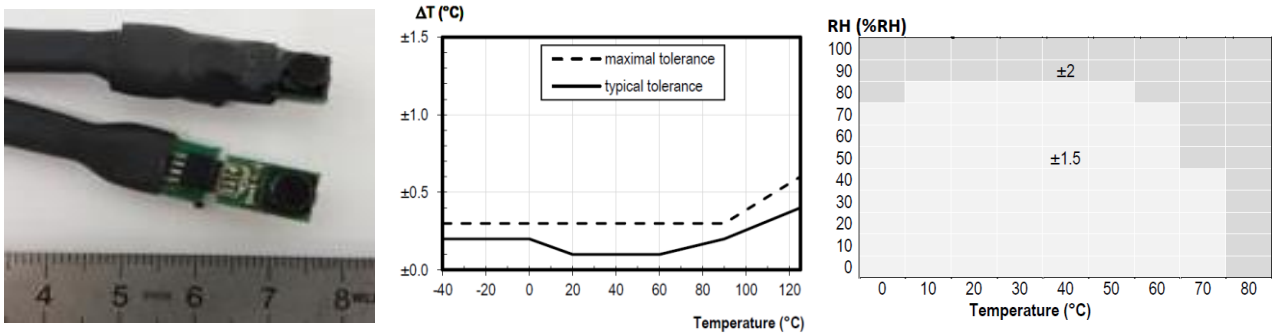
II.1.3 Métrologie

II.1.3.1 Présentation des capteurs

L'instrumentation comprend des capteurs de température et d'humidité relative et des fluxmètres. Ceux-ci sont reliés à des centrales d'acquisition et à un ordinateur permettant l'enregistrement continu avec un pas de temps défini de 3 à 5 minutes lors de ces expérimentations.

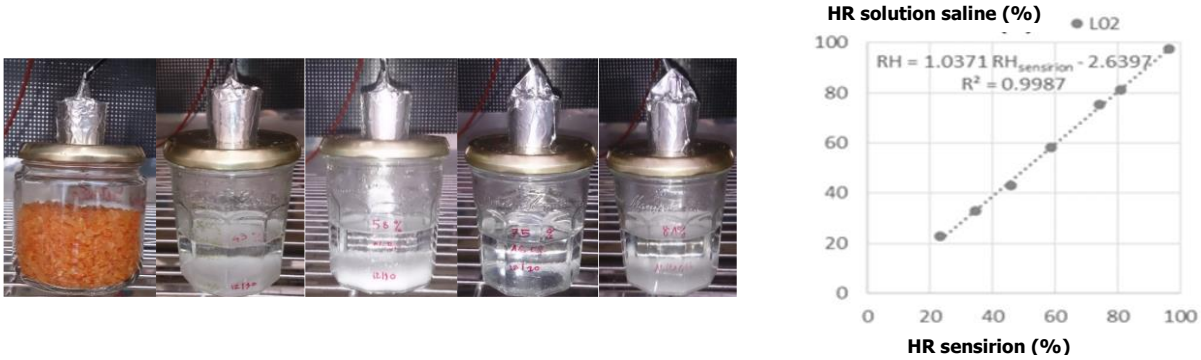
Les capteurs de température et d'humidité relative de type Sensirion SHT35 (Figure II-20). L'élément sensible mesure 2,5 × 2,5 mm². Ils sont protégés par un filtre SF2. Une gaine thermo-rétractable est ajoutée pour protéger la connectique. La précision typique est de ±0,1°C et ± 1,5% RH dans nos gammes d'essai. Après préparation, ces capteurs sont vérifiés avec des solutions

salines en considérant sept humidités relatives: 23% HR, 33% HR, 43% HR, 58% HR, 81% HR, 90% HR, 97% HR afin d'ajuster leur réponse (Figure II-21).



(a) (b) (c)

Figure II-20 : Capteurs sensirion SHT 35 - (a) préparation des capteurs, (b) précision en température, (c) précision en humidité relative



(a) (b)

Figure II-21 : Vérification des capteurs - (a) solutions salines, (b) courbes d'ajustement

Les fluxmètres sont des thermopiles de type HFP01 de Hukseflux. Ils ont un diamètre de 80 mm et une épaisseur de 5 mm (Figure II-22.a). Leur plage de mesure est de ±2000 W/m² pour une température de fonctionnement comprise entre -30 et 70 °C. Leur sensibilité est de 50 µV/(W.m²), leur précision typique est de -15% à +5%.

Un anémomètre à boule chaude TSI 8475 vient compléter la métrologie afin d'évaluer les vitesses d'air à proximité du mur test dans chaque pièce et de vérifier que les valeurs restent représentatives des valeurs rencontrées dans les bâtiments. (Figure II-22.b).

(a) (b)

Figure II-22 : (a) fluxmètre HFP01 - Hukseflu , (b) l'anémomètre TSI 8475

II.1.3.2 Implantation

Chaque paroi est instrumentée par des capteurs de SHT35 dans les différentes épaisseurs, entre les interfaces et sur les deux surfaces d'échange pour la mesure de la température et l'humidité relative. Ces capteurs sont mis en œuvre pendant la production du mur. Les fils des capteurs sortent du mur verticalement, pour être perpendiculaires aux flux de chaleur et d'humidité. Les positions sont assurées grâce à un système de fixation en bois rigide. La partie supérieure de ce système est retirée à la fin de la production du mur.

Pour la paroi terre-chanvre, ces capteurs sont répartis sur l'épaisseur de la couche terre-chanvre (Figure II-23). Pour les parois multicouches, ces capteurs sont placés aux interfaces entre les couches des parois, ainsi qu'au sein de certaines couches lorsque l'épaisseur de celle-ci est suffisante (Figure II-24 et Figure II-25). De plus, ces capteurs sont décalés sur la largeur de la paroi, pour ne pas avoir d'effet de masque induit par la présence d'un capteur. Des capteurs supplémentaires sont placés sur les surfaces et en ambiance, ils sont alors protégés dans des tubes nickelés (Figure II-26).

Figure II-23 : capteurs placés dans le terre-chanvre

Figure II-24 : capteurs placés aux interfaces et à mi- épaisseur de l'isolant

Figure II-25 : capteurs placés de chaque côté de la membrane

Les fluxmètres sont placés en surface intérieure et en surface extérieure de chaque paroi. Ils sont orientés de façon à avoir un flux positif de l'ambiance intérieure vers l'ambiance extérieure.

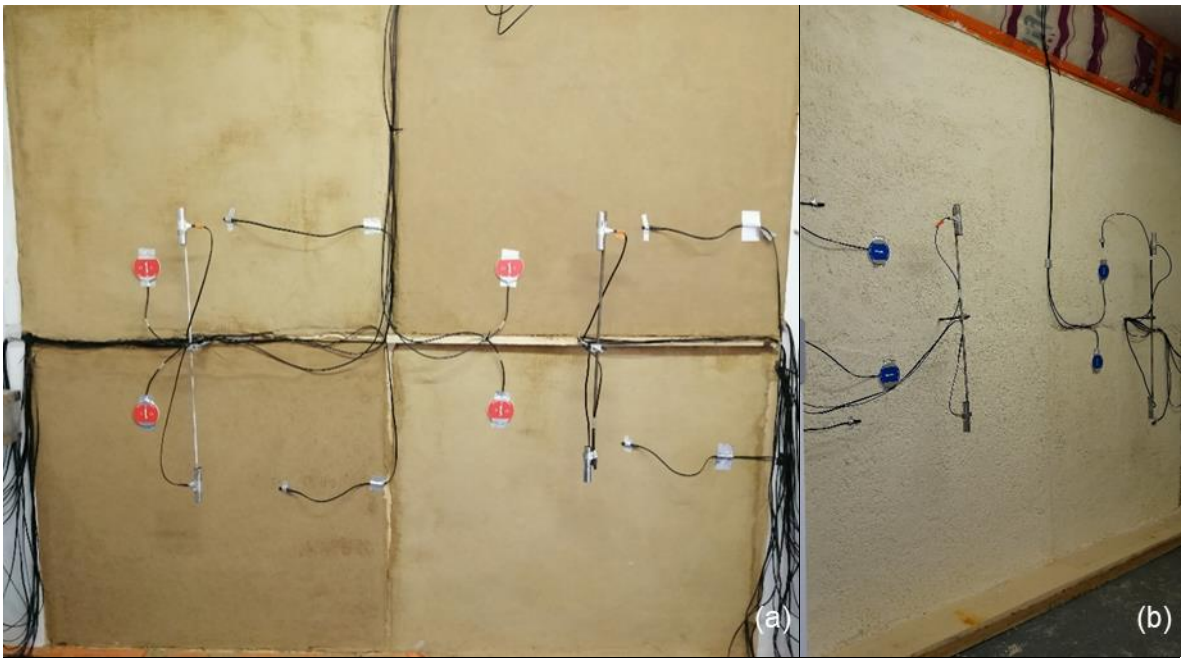


Figure II-26 : Instrumentation des parois en surface et en ambiance - (a) côté intérieur, (b) côté extérieur

Au total, 41 capteurs sensirion SHT35 et 8 fluxmètres sont implantés. Leur référence et emplacement sont récapitulés sur la Figure II-15 et dans le Tableau II-3.

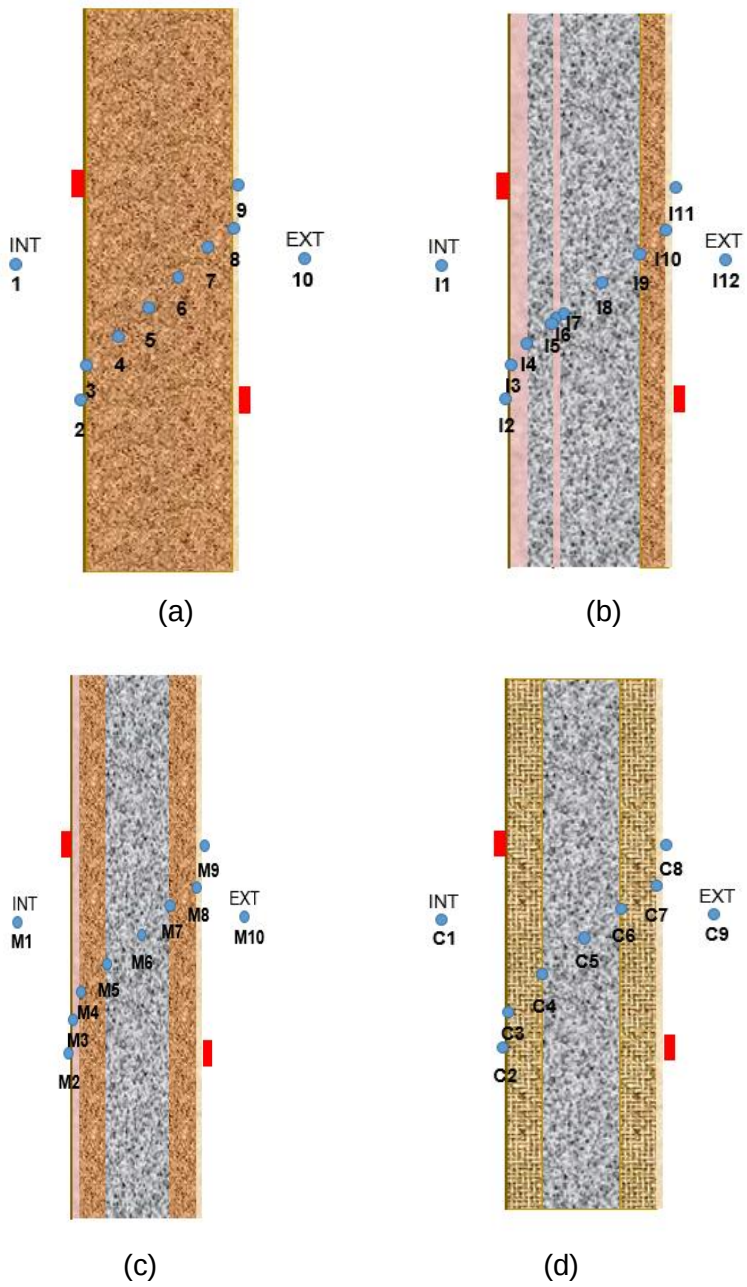


Figure II-27 : Implantation des capteurs dans les parois : (a) Paroi Terre-Chanvre, (b) Paroi ISOBIO, c) Paroi Maïs : en panneaux de PVA-chanvre avec un parement intérieur en résidus de rafles de maïs, (d) Paroi Colza : en panneaux de résidus de paille de colza

Tableau II-3 : Instrumentation des parois - référence des capteurs et profondeur par rapport à la surface intérieure

Nom et position du capteur	Profondeur (cm)
Paroi terre-chanvre	
1 - Ambiance intérieure	
2 - Surface intérieure	0
3 - Interface enduit pelliculaire terre - composite terre-chanvre	0,3
4 - Composite terre-chanvre	5,3
5 - Composite terre-chanvre	11,3
6 - Composite terre-chanvre	17,1
7 - Composite terre-chanvre	23,7
8 - Interface Composite terre-chanvre- enduit extérieur	28,3
9 - Surface extérieure	29,5
10 - ambiance extérieure	
Paroi ISOBIO (Isobio)	
I1 - Ambiance intérieure	
I2 - Surface intérieure du mur	0
I3 - Interface enduit intérieur – Panneau CSB	1,5
I4 - Interface panneau CSB - Biofib Trio 45	5,3
I5 - Interface Biofib Trio 45 - membrane Intello	10,3
I6 - Interface Intello Membrane - panneau OSB	10,4
I7 - Interface Panneau OSB - Biofib Trio 145	11,6
I8 - Biofib Trio 145 mi-épaisseur	18,85
I9 - Interface Biofib Trio 145 - du panneau CAVAC	26,1
I10 - Interface Panneau CAVAC - enduit extérieur	31,1
I11 - surface extérieure	32,3
I12 - Ambiance extérieure	
Paroi en panneaux de PVA-chanvre et parement de résidus de rafles de maïs (Maïs)	
M1 - Ambiance intérieure	
M2 - Surface intérieure	0
M3 - Interface enduit pelliculaire - panneau de résidus de rafles de maïs	0,3
M4 - Interface Panneau de résidus de rafles de maïs - panneau PVA-chanvre	2,3
M5 - Interface Panneau PVA - chanvre - Biofib Trio 145	8,3
M6 - Biofib Trio 145 mi-épaisseur	15,55
M7 - Interface Biofib Trio 145 - de panneau PVA-chanvre	22,8
M8 - Interface panneau PVA- chanvre - enduit extérieur	28,8
M9 - Surface extérieure	30,0
M10 - Ambiance extérieure	
Paroi en panneaux de résidus de paille de colza (Colza)	
C1 - Ambiance intérieure	
C2 - Surface intérieure	0
C3 - Interface enduit intérieur - panneau de résidus de paille de colza	1,5
C4 - Interface Panneau de résidus de paille de colza - Biofib Trio 145	8,5
C5 - Biofib Trio 145 mi-épaisseur	15,75
C6 - Interface Biofib Trio 145 - panneaux de résidus de paille de colza	23
C7 - Interface panneau de résidus de paille de colza - enduit extérieur	30
C8 - surface extérieure	31,2
C9 - ambiance extérieure	

II.1.4 Sollicitations

II.1.4.1 Généralités sur les climats

La France présente un climat très varié selon les régions du fait de sa position géographique. Elle est située sur la partie occidentale de l'Europe. Elle est bordée au Nord par la mer du Nord, au nord-ouest par la Manche, à l'ouest par l'océan Atlantique et au sud-est par la mer Méditerranée.

Son climat est tempéré selon ces trois grandes influences avec des dégradés entre chaque aire. L'ouest subit l'influence océanique, ce qui donne d'importantes précipitations et une faible amplitude thermique (été frais, hiver doux). En s'éloignant vers l'est c'est-à-dire vers l'intérieur des terres, plus l'influence océanique s'affaiblit et plus l'influence continentale augmente : les précipitations diminuent; l'amplitude thermique augmente (les étés sont chauds et les hivers froids). En effet, dans cette zone, les montagnes françaises sont soumises à un climat dicté par l'altitude : les précipitations augmentent et les températures baissent selon le degré d'exposition aux vents. Au sud, le climat méditerranéen prend le dessus : il se caractérise par des températures douces en hiver et un été très chaud. Les précipitations peuvent être très fortes en automne, mais sont quasiment inexistantes en été.

Ces trois tendances climatiques principales se subdivisent en 8 types selon la température et les précipitations (Figure II-28). Pour chacun d'entre eux, une ville représentative a été identifiée afin de s'appuyer sur des données météo.

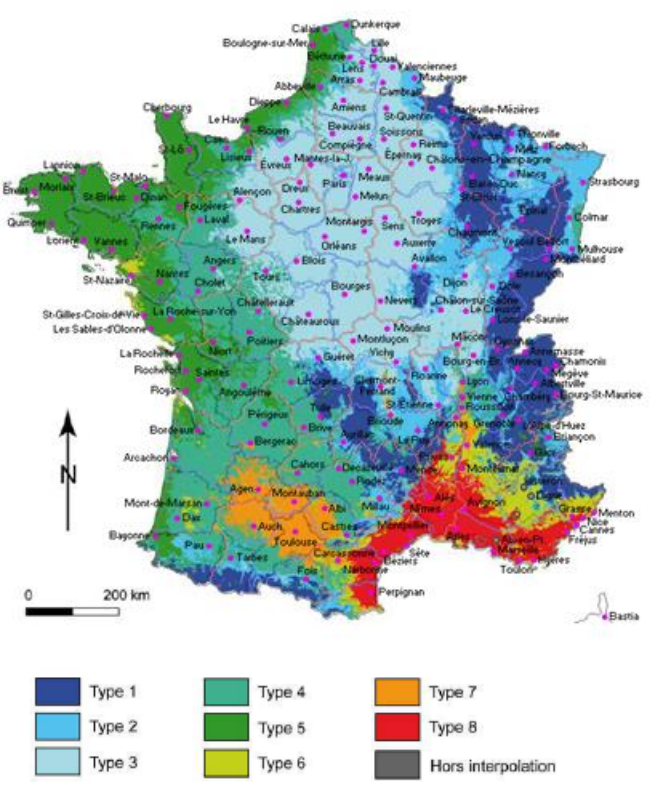


Figure II-28 : Types de climats en France - 1 : montagnard (Pontarlier), 2 : semi-continental (Strasbourg), 3 : océanique dégradé (Paris), 4 : océanique altéré (Rennes), 5 : océanique franc (Brest), 6 : méditerranéen altéré (Digne), 7 : Bassin du Sud-Ouest (Toulouse), 8 : méditerranéen franc (Montpelier et Ajaccio).

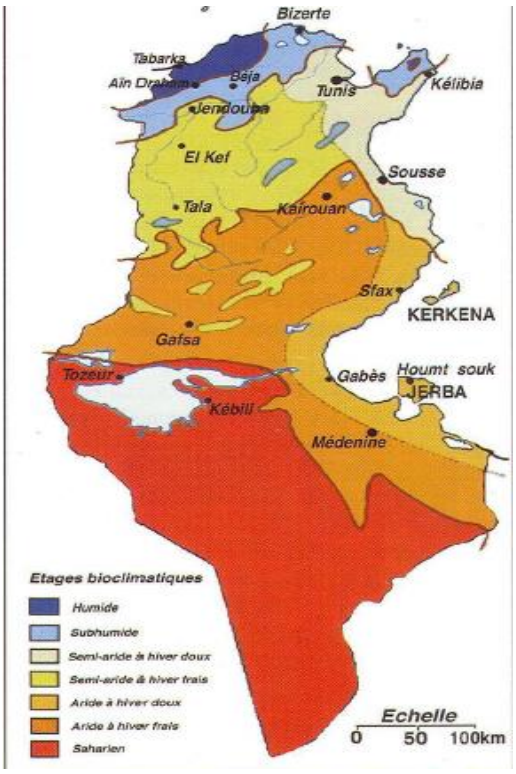


Figure II-29 : Types de climats en Tunisie - 1 : humide (Tabarka), 2 : subhumide (Bizerte), 3 : semi-aride à hiver doux (Tunis), 4 : semi-aride à hiver frais (Elkef), 5 : aride à hiver doux (Sfax et Djerba), 6 : aride à hiver frais (Kairouan), 7 : désertique saharien (Tozeur).

La Tunisie est située sur la partie nord de l'Afrique. Elle est bordée au nord et à l'est par la mer Méditerranée. Sur la côte nord, le climat est de type méditerranéen, avec des étés très chauds. En descendant le long de la côte est, les températures augmentent un peu avec des pluies moins fréquentes et un ensoleillement plus fréquent, ainsi au sud du pays, le climat est très aride puisqu'il s'agit des villes désertiques. La Figure II-29 présente les 7 types de climat.

II.1.4.2 Sélection des villes

Pour limiter le nombre de villes représentatives à étudier, les températures et humidités relatives moyennes des minimums respectivement celles des maximums sont étudiées sur les données trentenaires.

Pour la France, ces données sont présentées pour la période de 1981-2010 Figure II-30.

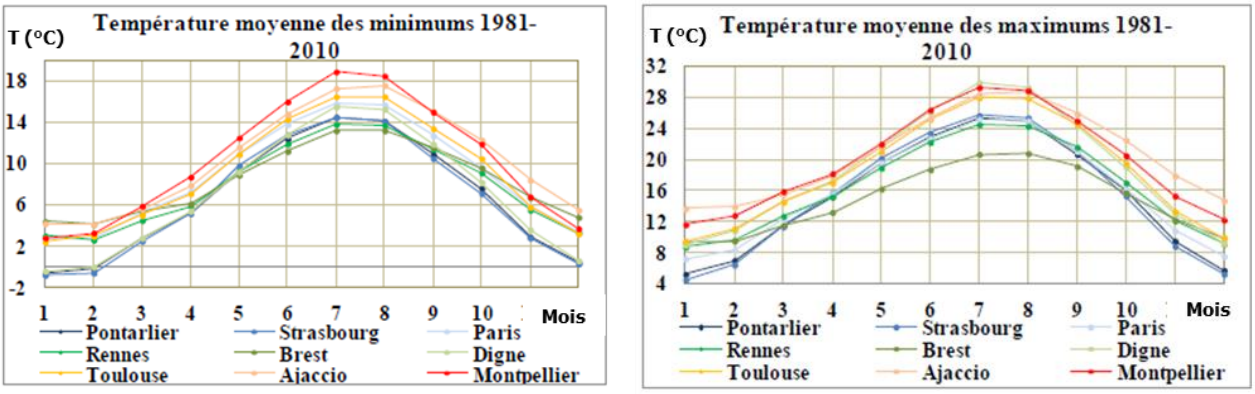


Figure II-30 : Températures moyennes des min (gauche) et des max (droite) source météo France 1981-2010 ('Méteo France' 2022)

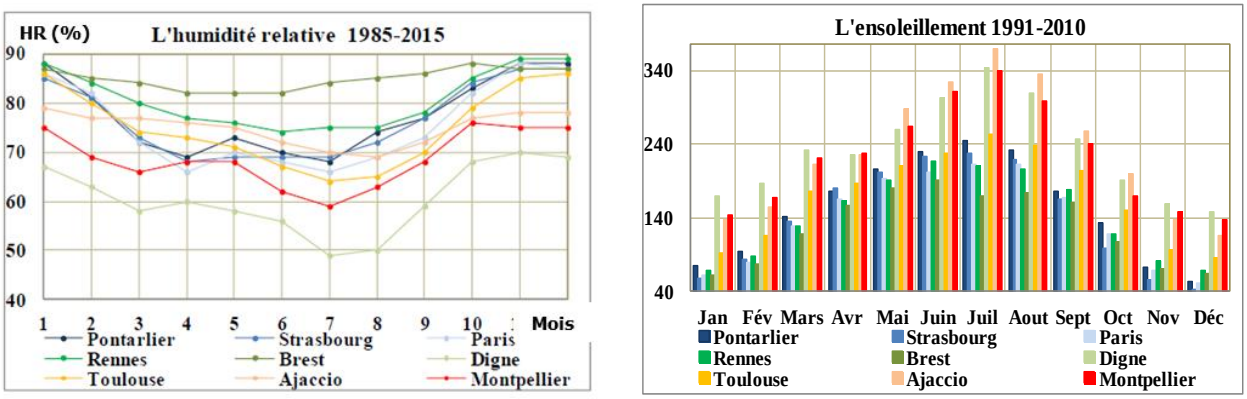


Figure II-31 : Humidité relative moyenne pendant 1985-2015, ('World Weather, Time and Date' 1998) (gauche) durée d'ensoleillement pendant 1991-2010, source météo France ('Méteo France' 2022)

En hiver, on distingue trois tendances marquées sur les températures minimales :

- Les températures les plus froides pour Pontarlier, Strasbourg et Digne, les humidités relatives de Pontarlier et Strasbourg sont également comparables, et une valeur nettement plus faible pour Digne
- Les températures intermédiaires Rennes, Montpellier, Toulouse et Paris, avec des humidités relatives plus faibles à Montpellier,
- Les températures les moins froides pour Brest et Ajaccio, Brest ayant une humidité relative plus élevée.

En été, les températures minimales moyennes sont graduelles alors que les maximales présentent trois groupes :

- Les températures les moins élevées sont observées à Brest,
- Les températures intermédiaires sont observées à Rennes, Paris, Strasbourg et Pontarlier, avec une humidité relative plus élevée à Rennes et similaire pour les trois autres villes,
- Les températures les plus élevées sont observées à Toulouse, Ajaccio, Digne et Montpellier, avec des humidités relatives différentes : par ordre croissant Digne, Montpellier, Toulouse puis Ajaccio.

La Figure II-31 droite montre la durée d'ensoleillement moyenne enregistrée pendant la période de 1991-2010 pour chaque mois. Les résultats affichent que Digne présente la durée d'ensoleillement la plus élevée en hiver et Ajaccio en été. Par contre Brest montre la durée d'ensoleillement la plus basse en été et Strasbourg en hiver.

Au bilan, quatre villes sont retenues pour représenter les différentes tendances du climat français : Brest, Rennes, Strasbourg et Toulouse.

Pour la Tunisie, les données de l'institut national de la météorologie INM sont présentées Figure II-32 pour la période allant de 1961-1990.

Tozeur présente un climat désertique, c'est la ville la plus froide en hiver et la plus chaude en été. La température moyenne des minimums est égale à 6,3°C et celle des maximums est de l'ordre de 16,7°C en hiver par contre elle dépasse une moyenne des maximums de 39,1°C en été.

Tabarka qui est caractérisée par un climat humide, présente un été frais.

Djerba et Sfax, malgré leur appartenance au même climat, ont des températures minimales sont totalement différentes. L'île de Djerba est plus chaude en hiver et en été.

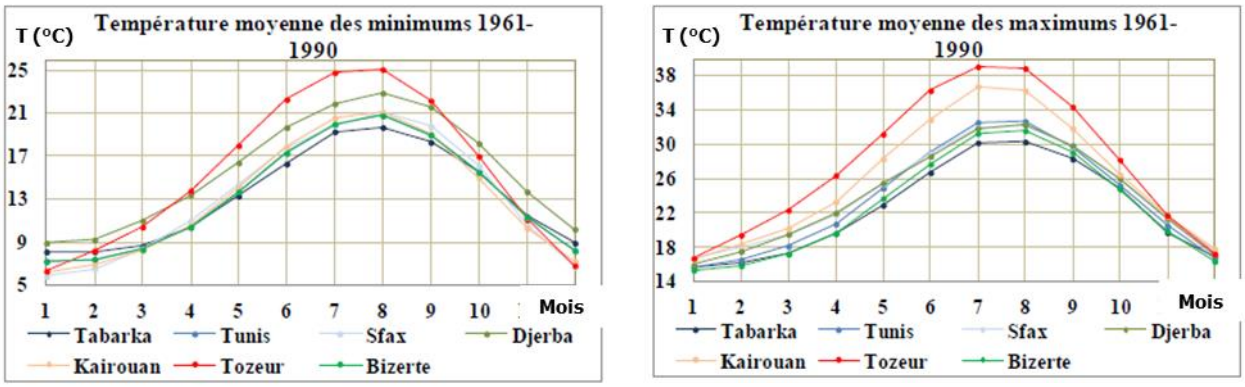


Figure II-32 : Températures moyennes des minimums (gauche) et des maximums (droite) 1961-1990 ('Météo Tunisie' 2022)

La Figure II-33 montre que la durée d'ensoleillement est la plus élevée en Djerba et Sfax tout le long de l'année. Par contre, elle est la plus basse pour Tabarka.

Pour l'humidité relative moyenne, la Figure II-33 montre que Bizerte est la plus humide tout le long de l'année. Par contre Tozeur est la plus sèche tout le long de l'année.

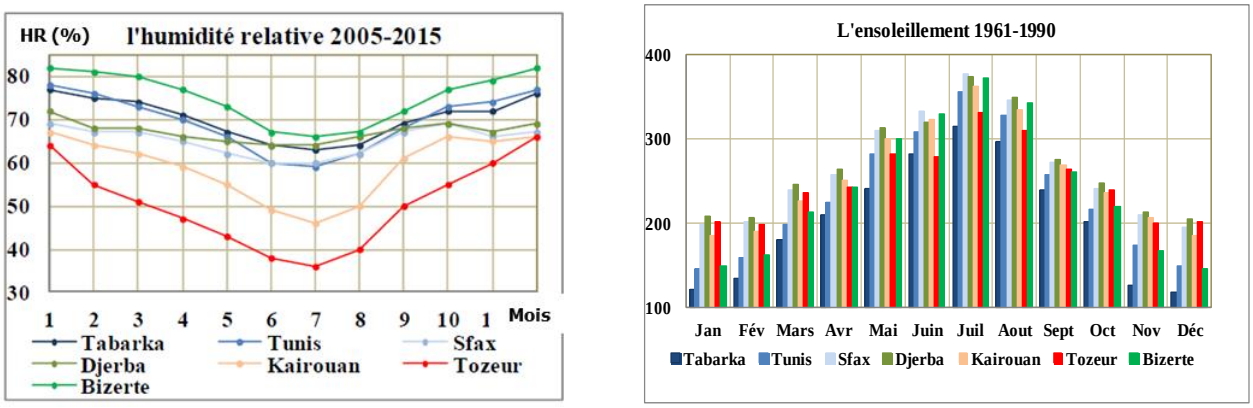


Figure II-33 : Humidité relative moyenne sur la période 2005-2015 (gauche) ('World Weather, Time and Date' 1998) et durée d'ensoleillement sur la période 1961-1990 (droite) ('Météo Tunisie' 2022)

Au bilan, quatre villes sont retenues pour représenter les différentes tendances du climat tunisien: Tabarka, Djerba, Kairouan et Tozeur.

II.1.4.3 Conditions caractéristiques pour une journée type de chaque ville

Après la sélection des villes, un mois est sélectionné par saison: janvier pour l'hiver, août pour l'été et mai pour les mi-saisons.

Pour déterminer des cycles journaliers représentatifs, des journées types sont recherchées pour chaque ville et pour chaque mois en se basant sur les températures minimales et maximales moyennes enregistrées sur la période de 1981-2010 ('Méteo France' 2022)

Ces cycles journaliers sont recherchés prioritairement dans les années proches des moyennes décennales. Ces cycles nous donnent accès aux hygrométries associées. Par exemple, à Rennes, au mois d'août les températures moyennes sont 13,7°C en minimale et 24,3 °C en maximale. Ainsi, sur la période présentées (Figure II-34), le 16 août est sélectionné, le 14 n'est pas retenu car présente de trop forts gradients, le 17 n'est pas retenu pour gradient trop faible.

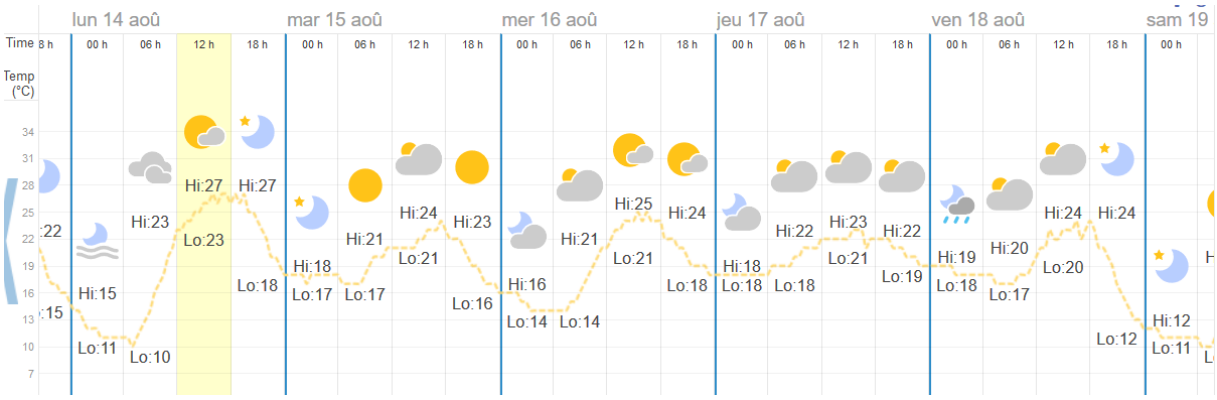


Figure II-34 : Evolution des températures à Rennes en août 2017 ('World Weather, Time and Date' 1998)

En prenant l'exemple de Rennes pendant la saison d'été, La Figure II-35 présente la température moyenne minimale (gauche) et maximale (droite) du mois d'Aout de 2011 à 2019.

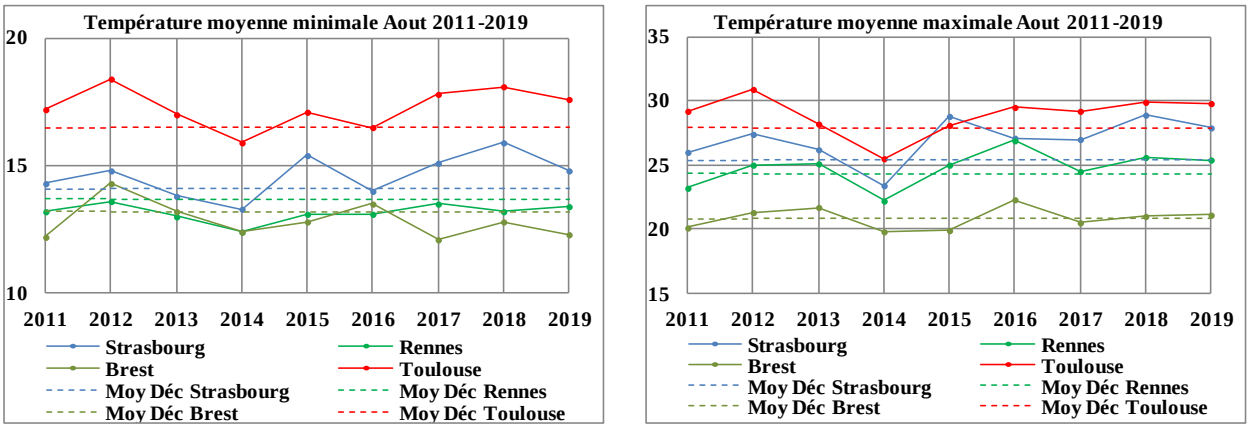


Figure II-35 : Température moyenne des minimums (gauche) et des maximums (droite) pour Aout pendant 2011-2019, ('Méteo France' 2022)

La température moyenne de Rennes en août est entre une moyenne des minimums de 13,7°C et une moyenne des maximums de 24,3°C. Pour cette ville l'année la plus proche de ces valeurs moyennes est 2017.

Des cycles représentatifs apparaissent les 02, 13, 14 et 24/08/2017 (Figure II-36).

Le scenario retenu est alors : nuit T=14°C et HR= 85% et jour T= 24,5°C et HR= 50%.

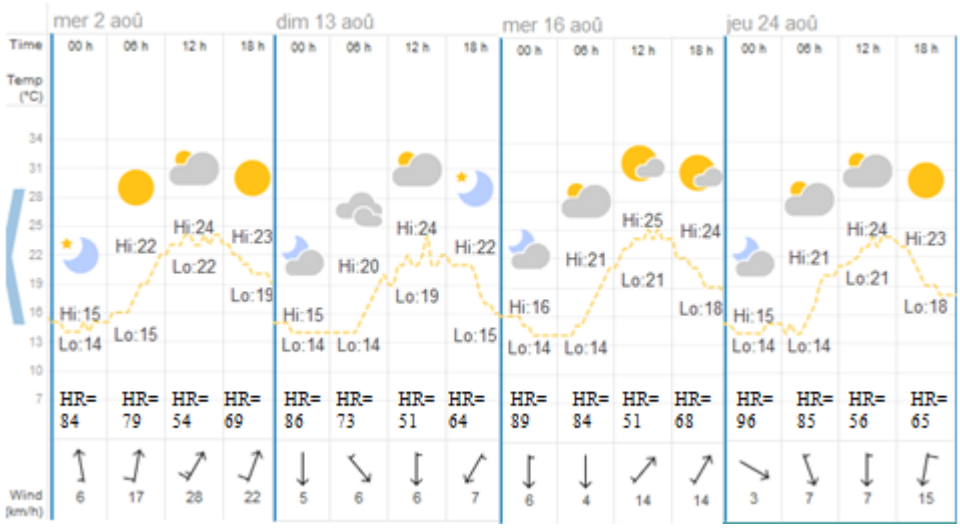


Figure II-36 : Cycles journaliers type aout 2017 pour Rennes ('World Weather, Time and Date' 1998)

Les autres villes et les autres saisons sont représentées dans l'annexe A I.

Les températures et humidités relatives choisies pour les ambiances intérieures, pour les deux pays, en fonction de la saison sont données Tableau II-4.

Tableau II-4 : Ambiances intérieures

	France	**Tunisie**
Hiver	20°C, 50%HR	20°C, 50%HR
Mi-saison	20°C, 50%HR	23°C, 50%HR
Eté	23°C, 50%HR	26°C, 50%HR

Une synthèse des températures et humidités relatives caractéristiques au cours des différentes saisons pour les différentes villes est donné par

Tableau II-5 et Figure II-37 pour la France, Figure II-38 pour la Tunisie.

L'analyse des conditions caractéristiques pour les journées type des différentes villes permet de faire apparaître des similitudes permettant de restreindre le nombre d'expériences à réaliser. Par exemple les conditions de Strasbourg en été sont comparables à celles de Tabarka en mi-saison, celle de Brest en été sont comparables à celle de Toulouse en mi-saison. De plus, des essais préliminaires montrent que certains essais ne sont pas réalisables au sein de l'enceinte bi-climatique : (30 °C, 60 %HR) et (19°C, 85%HR) sont trop humides, (39 °C, 20 %) pour lequel une compétition apparaît entre le groupe froid pour déshumidifier et le chauffage, les climats dont les températures sont inférieures à 10 °C car l'évaporateur du groupe froid prend en glace (hiver et mi-saison français et hiver tunisien).

Tableau II-5: Températures et humidités relatives caractéristiques des villes françaises et tunisiennes sélectionnées, cellules grisées : essai non réalisé, écriture de couleur : conditions similaires

Villes françaises		**Rennes**	**Strasbourg**	**Brest**	**Toulouse**
Hiver	Jour	9°C, 70 %HR	5°C, 75 %HR	8°C, 75 %HR	9°C, 80 %HR
	Nuit	4°C, 90%	-1°C, 85%	4°C, 75 %HR	3°C, 88 %HR
Mi saison	Jour	19°C, 60%	21°C, 50%	16°C, 65 % HR	21°C, 60 %HR
	Nuit	9°C, 85%	10°C, 90%	9°C, 90 % HR	11°C, 85 %HR
Eté	Jour	24,5°C, 50 %HR	25°C, 55 %HR	21°C, 65 %HR	28°C, 40 %HR
	Nuit	14°C, 85 %HR	14°C, 82 %HR	13°C, 80 %HR	16°C, 75 %HR
Villes tunisienne		**Tabarka**	**Djerba**	**Kairouan**	**Tozeur**
Hiver	Jour	16°C, 70 %HR	16°C, 45 %HR	16°C, 50 %HR	17°C, 40 %HR
	Nuit	8°C, 90 %HR	9°C, 75 %HR	6°C, HR= 75%	6°C, 60 %HR
Mi saison	Jour	23°C, 55 %HR	26°C, 35 %HR	28°C, 35% HR	32°C, 30 %HR
	Nuit	13,5°C, 80 %HR	16°C, 70 %HR	14°C, 70 %HR	18°C, 75 %HR
Eté	Jour	30°C, 60 %HR	32°C, 50 %HR	36°C, 30%	39°C, 20 %HR
	Nuit	19,5°C, 85 %HR	23°C, 80 %HR	21°C, 60 %HR	25°C, 45 %HR

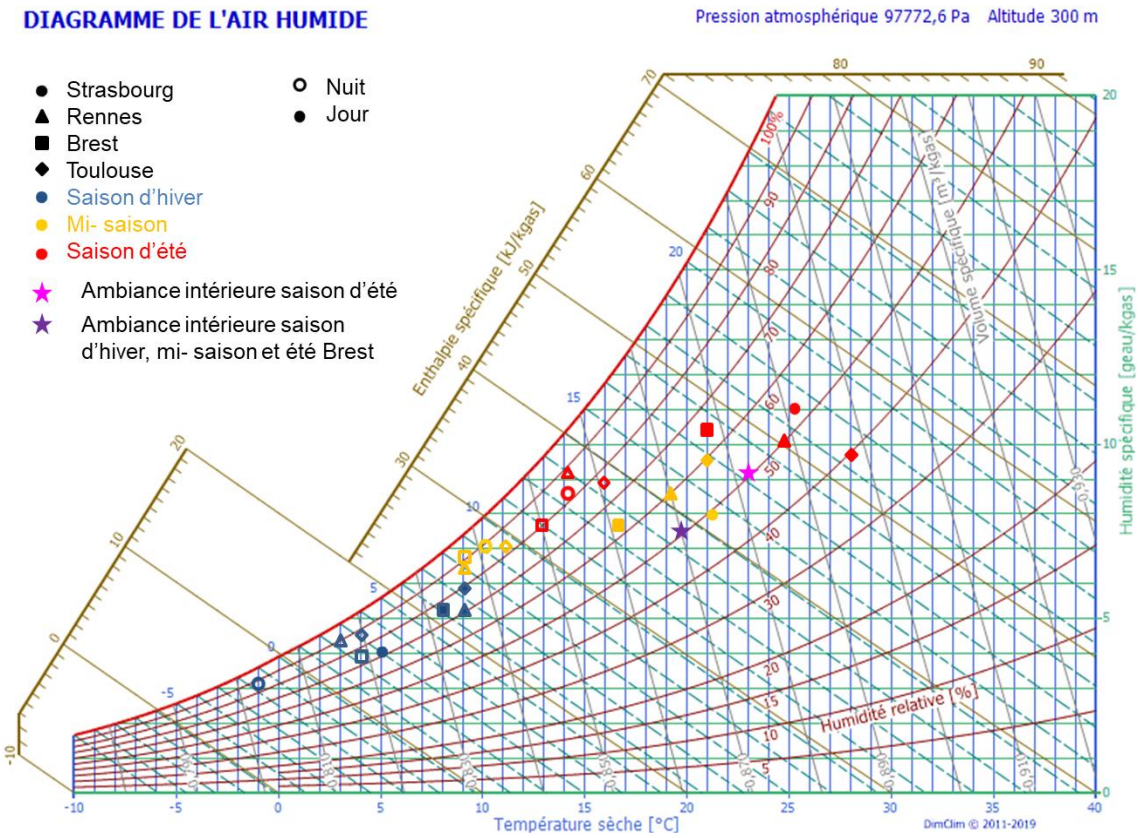


Figure II-37 : Températures et humidités relatives caractéristiques des villes françaises pendant les différentes saisons

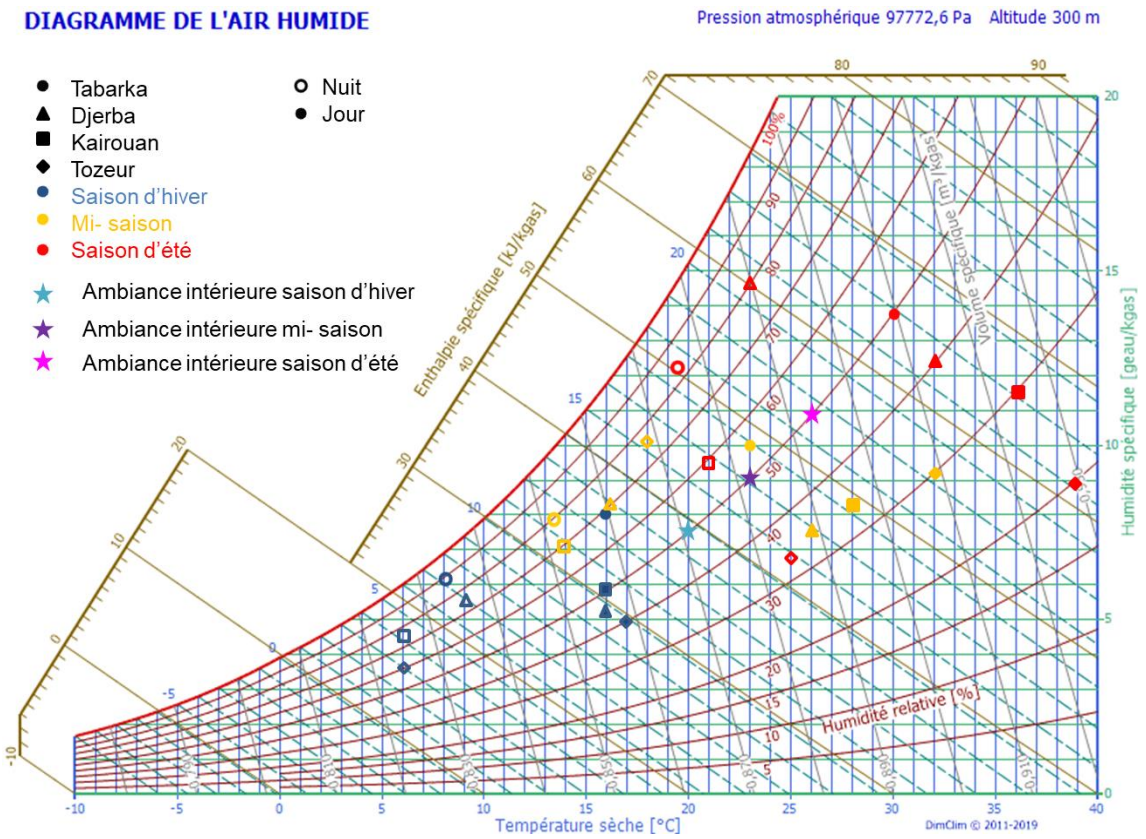


Figure II-38 : Températures et humidités relatives caractéristiques des villes tunisiennes pendant les différentes saisons

II.1.4.4 Scenarii de températures et d'humidités relatives ambiantes intérieure et extérieure réalisés.

a Généralités

L'étude hygrothermique de la paroi est typiquement réalisée en deux phases (Figure II-39).

Tout d'abord, la paroi est exposée à des gradients de température et de pression de vapeur constants, correspondant aux conditions nocturnes. La stabilisation de la paroi est considérée atteinte lorsque les variations relatives de température et de pression de vapeur sont inférieures à 1 % au cours des 24 dernières heures.

Ensuite, la paroi est exposée à des variations cycliques quotidiennes de température et d'humidité relative ambiantes extérieures. Le cycle est répété autant de fois que nécessaire pour atteindre une réponse répétable, avec des écarts relatifs inférieurs à 1%.

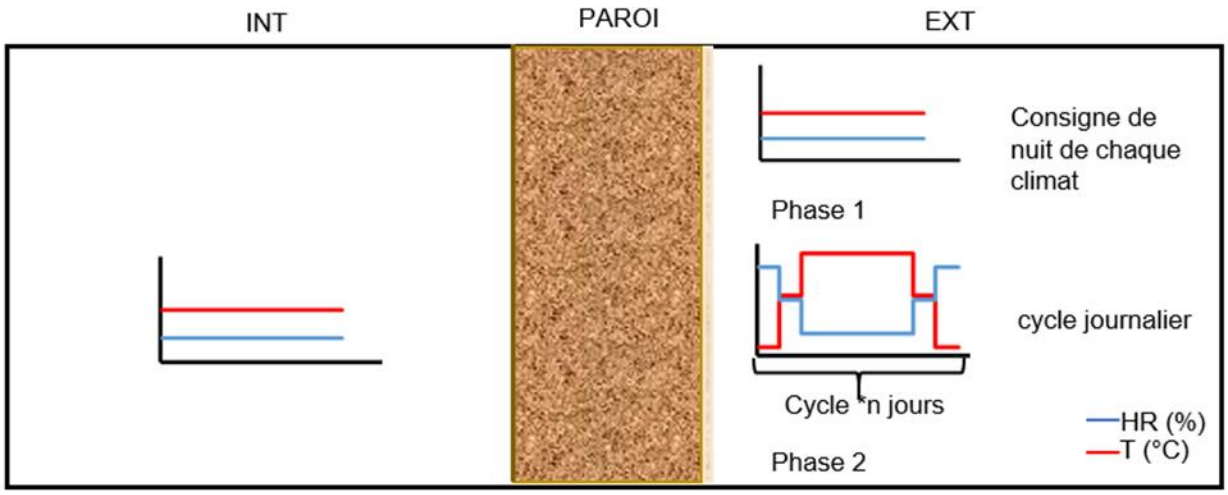


Figure II-39 : Points de consigne intérieurs et extérieurs pendant le test

Dans un premier temps, les études sont menées en reproduisant les températures et humidités relatives ambiantes, sans ensoleillement. Ceci correspond à diverses situations telles que les parois orientées au nord, les jours sans soleil, les parois masquées par des effets d'ombrage. Dans un deuxième temps, l'effet de l'ensoleillement sera pris en compte à partir d'une température équivalente. Enfin, une sollicitation hygrique sera réalisée côté intérieur pour simuler un effet induit par l'occupation d'un local.

Pour l'étude numérique, une étude complémentaire est menée en poursuivant la sollicitation sous gradients de température et de pression de vapeur constants jusqu'à l'atteinte du régime permanent. Celui-ci est considéré atteint lorsque l'écart entre le profil numérique et le profil théorique est inférieur à 1 % en température et à 2% en pression de vapeur.

b Consignes de température et d'humidité relative ambiantes côté extérieur

En raison de la régulation, les cycles climatiques sélectionnés sont simplifiés sous forme de créneaux, avec quatre paliers de température et d'humidité relative (Figure II-40).

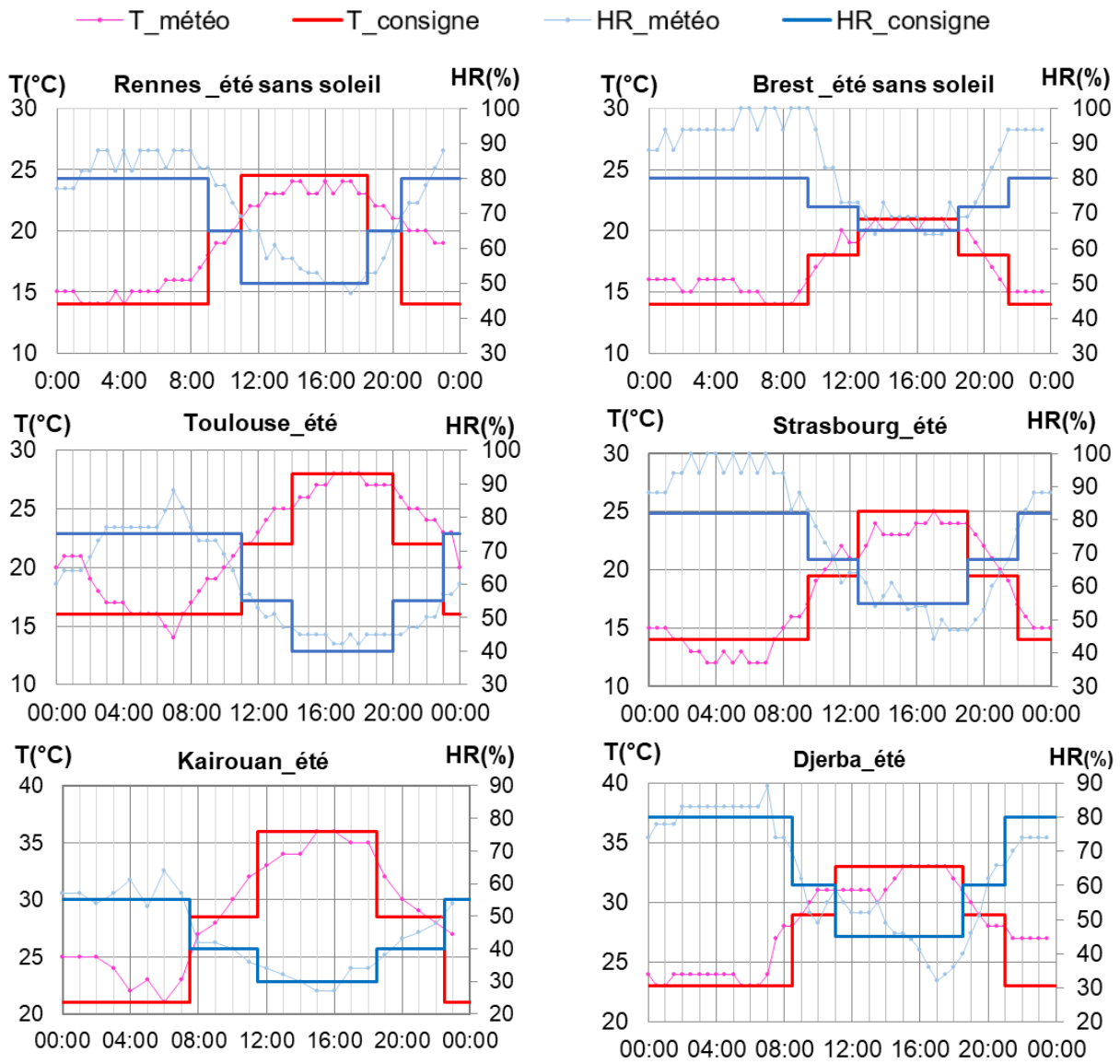


Figure II-40 : Climats simulés des villes françaises et tunisiennes : détail d'un cycle journalier

c Prise en compte de l'ensoleillement en surface extérieure

De manière à être représentatif d'une sollicitation in-situ, l'effet de l'ensoleillement est également considéré. Celui-ci est simulé à travers une température équivalente intégrant l'ensoleillement et l'absorption du rayonnement solaire en surface extérieure II-1. L'humidité relative

équivalente est déterminée à partir de la pression de vapeur et de la température équivalente afin de conserver la même pression de vapeur II-2.

$$T_{éq.} = T_{ext} + \frac{\alpha.\Phi_r}{h_e} \qquad \text{II-1}$$

$$HR_{éq.} = \frac{P_v}{P_{v,sat,éq.}} \qquad \text{II-2}$$

$$\text{Avec : } P_{v,sat,éq.} = exp\left(18{,}986 - \frac{4052}{235.89+Téq}\right) \qquad \text{II-3}$$

Les valeurs de rayonnement dépendent de la latitude. Elles sont issues de ('Diagramme Solaire Intéractif' 2022). La Figure II-41 donne les courbes de rayonnement solaire direct, diffus et global pour Rennes et Brest. Les cycles climatiques sélectionnés restent sous forme de créneaux, avec quatre paliers de température équivalente et d'humidité relative équivalente (Figure II-42).

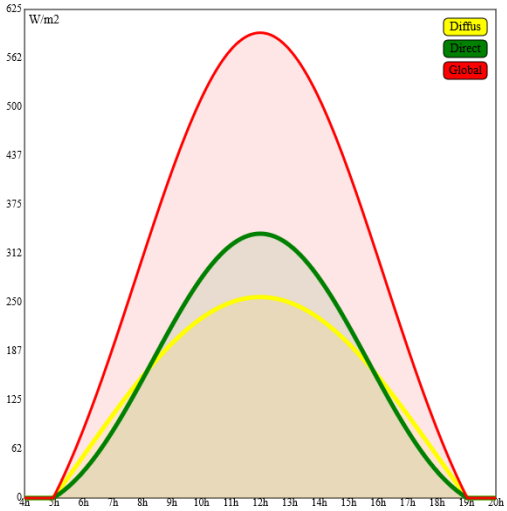


Figure II-41 : Rayonnement solaire au mois d'août ('Diagramme Solaire Intéractif' 2022)

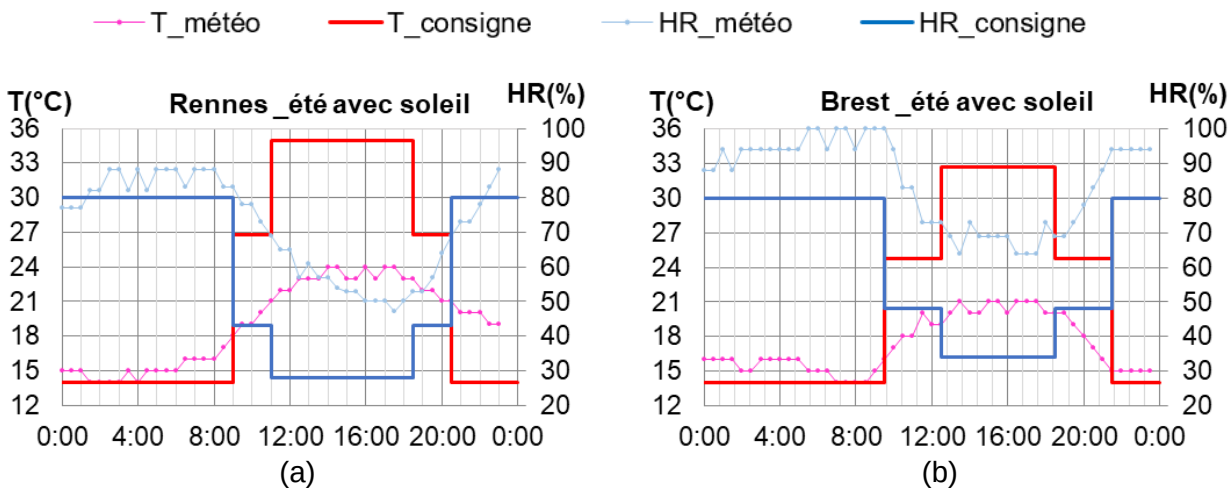


Figure II-42 : Climat simulé avec ensoleillement – (a) Rennes, (b) Brest

d Sollicitation hygrique en ambiance intérieure

Pour étudier l'effet d'une charge hygrique en ambiance intérieure sur le comportement hygrothermique de la paroi, un créneau d'humidité est réalisé. Des cycles d'humidité relative de 8 heures à 75 %HR et 16 heures à 40 % sont répétés sur cinq jours. La consigne de température intérieure est constante, à 23°C. Ce type de cycle peut être rencontré dans des locaux de type

bureaux. Les conditions extérieures correspondent au cycle de Rennes été sans ensoleillement (Figure II-43).

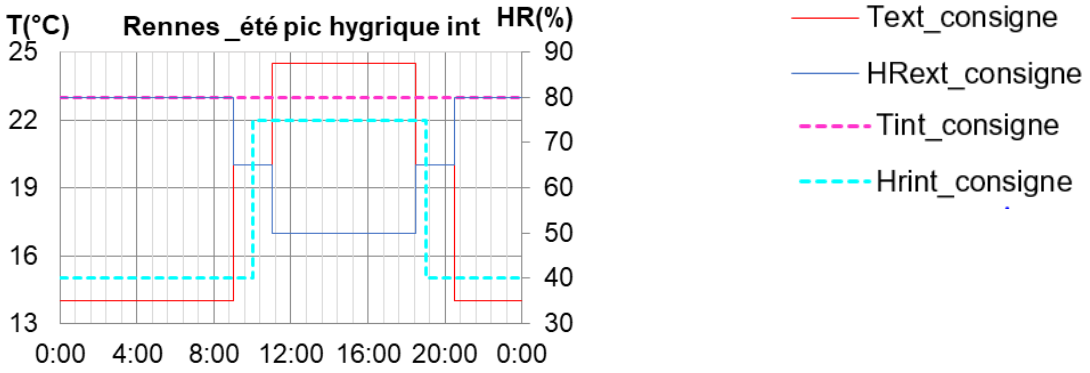


Figure II-43 : Climat simulé de Rennes été sans ensoleillement avec sollicitation hygrique à l'intérieur.

II.2 Etudes numériques

Les études numériques sont réalisées avec le logiciel WUFI Pro 6.5 développé par l'Institut Fraunhofer pour la physique du bâtiment (IBP) à Holzkirchen en Allemagne. WUFI est l'acronyme de « **W**arme **U**nd **F**euchtetransport **I**nstationar » (transferts de chaleur et d'humidité instationnaires).

Ce logiciel de simulation WUFI Pro 6.5 est utilisé pour l'évaluation de la performance hygrothermique des composants du bâtiment. Il calcule le transport couplé de chaleur et d'humidité, le transport de liquide, la diffusion de la vapeur d'eau dans les composants monocouches ou multicouches dans les conditions climatiques réelles : température, humidité relative, pluie, rayonnement solaire, vent… (Figure II-44).

Ce logiciel a été validé par des mesures expérimentales dans de multiples conditions (Künzel 2012) et confronté à des résultats sur du béton de chanvre dans le cadre d'un benchmark (annexe 2).

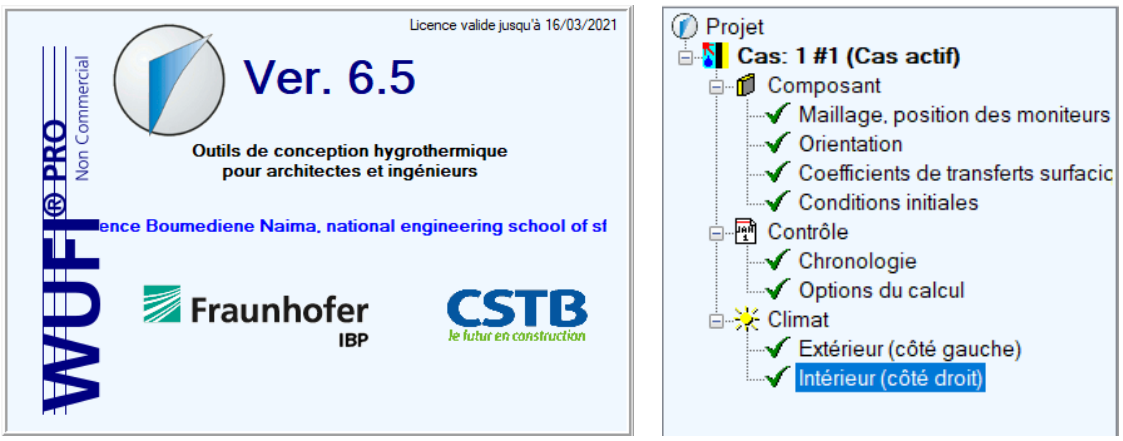


Figure II-44 : Présentation générale du logiciel WUFI

II.2.1 Equations et modèle de base

Ce logiciel est basé sur le modèle de KUNZEL, (Künzel 1995) qui s'appuie sur un bilan en humidité et un bilan en chaleur. Les phénomènes pris en compte sont la diffusion de la vapeur, le transfert liquide, le stockage d'humidité, le transfert par conduction et le stockage de chaleur. Il peut également prendre en compte la chaleur latente. Dans ce modèle, les processus relatifs au transfert de chaleur et d'humidité sont donnés par deux équations différentielles partielles II-4 et II-5 où l'humidité relative et la température sont les potentiels moteurs.

$$\frac{\partial W}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla . (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi . P_{sat})) \qquad \text{II-4}$$

$$\frac{\partial H}{\partial T}.\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.(\lambda \nabla T) + h_v \nabla.(\delta_p \nabla(\varphi.P_{sat})) \qquad \text{II-5}$$

Avec: $\frac{\partial W}{\partial \varphi}$: capacité de stockage d'humidité de la paroi (kg/m ^{3})

$\frac{\partial H}{\partial T}$: capacité de stockage de chaleur de la paroi (J/(m ^{3} K))

Les options de calcul permettent de sélectionner les phénomènes à prendre en compte lors de la simulation : transferts de chaleur, transfert d'humidité, capillarité, chaleur latente, évolution des paramètres hygrothermiques avec la température et l'humidité. De manière générale, la capillarité a été négligée dans nos simulations.

II.2.2 Modélisation de la paroi Terre - Chanvre

II.2.2.1 Définition de la composition

Pour réaliser les simulations, il est nécessaire de définir la composition de la paroi et les sollicitations qui lui sont appliquées. Il faut également définir le maillage et le pas de temps utilisés.

Cette paroi multicouche est définie couche par couche en terme d'épaisseur et de composition. Chaque matériau est caractérisé par ses propriétés physiques (Figure II-45) qui comprennent des paramètres de base et des fonctions hygrothermiques.

Les paramètres de base comprennent la masse volumique apparente, la porosité totale, la capacité thermique spécifique à l'état sec, la conductivité thermique à l'état sec et le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau au point sec.

Parmi les fonctions hygrothermiques, l'isotherme de sorption donne l'évolution de la teneur en eau volumique en fonction de l'humidité relative. Elle peut être définie par l'utilisateur de manière tabulée ou approximée à partir de la teneur d'eau à 80% d'humidité w80 et la saturation d'eau libre wf. Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur au point sec peut être complété avec une évolution en fonction de l'humidité relative. La conductivité thermique peut être décrite en fonction de la température ou de la teneur en eau volumique. Dans ces deux cas, la valeur à l'état sec est la valeur de base. L'évolution de la conductivité en fonction de ces paramètres est renseignée soit en donnant un coefficient de supplément de conductivité thermique, soit en donnant des valeurs issues de données expérimentales ou de modélisation.

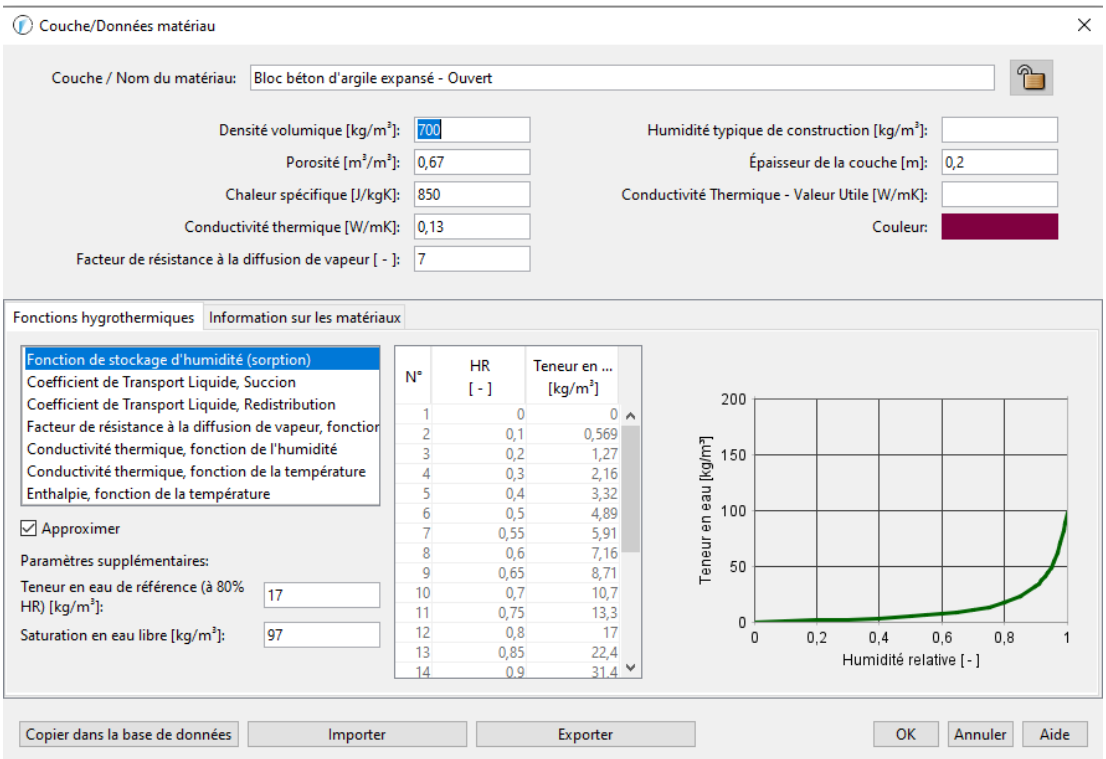


Figure II-45 : Les propriétés physiques d'entrée pour le logiciel

Les données des matériaux sont saisies à partir des caractéristiques connues, présentées section II.1.2.5. Pour l'enduit pelliculaire SCP dont les propriétés n'ont pas été mesurées, un matériau proche a été sélectionné dans la base Wufi. Les isothermes de sorption sont modélisées avec le modèle GAB II-6 (Brunauer et al. 1940), (Anderson 1946), (Anderson and Hall 1948), (Guggenheim EA. 1966) (Tableau II-6) puis générées par pas de 1 % HR (Figure II-46).

$$w = w_m \frac{C_1.C_2\varphi}{(1 - C_2.\varphi)(1 - C_2.\varphi + C_1.C_2.\varphi)} \qquad \text{II-6}$$

Tableau II-6 : Teneur en eau volumique à 80 % et paramètres du modèle GAB des matériaux de la paroi Terre - Chanvre

Matériau	W_{80} (kg/m³)	w_m (g/g)	C_1	C_2
LHR	36,08	0,01	13,73	0,96
WFH	23,37	0,02	3,66	0,89
SCP	18,8	-	-	-

L'évolution de la conductivité thermique est donnée avec la teneur en eau à partir de modélisation auto-cohérente pour le composite Terre-Chanvre (Figure II-47) et à partir d'une loi linéaire issue de données expérimentales pour l'enduit chaux-chanvre LHR (II-7).

$$\lambda_{LHR}(w) = 0{,}2038 + 0{,}0025\, w \qquad \text{II-7}$$

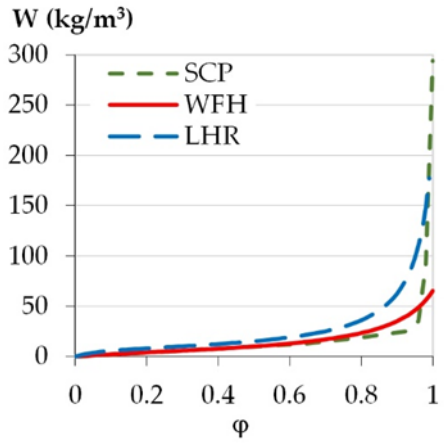


Figure II-46 : Isothermes de sorption des matériaux de la paroi Terre - Chanvre

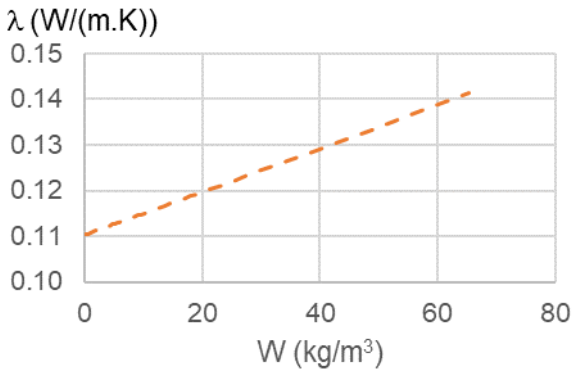


Figure II-47 : Evolution de la conductivité thermique du composite terre-chanvre WFH en fonction de la teneur en eau volumique

II.2.2.2 Maillage

Une fois les couches définies, un maillage automatique est généré par WUFI selon 3 niveaux possibles de finesse : grossier, moyen ou fin. Etant donnés les phénomènes simulés : cycles dynamiques et amplitude des gradients, le maillage fin est sélectionné. Celui-ci correspond à une grille de 100 mailles, resserrée auprès des surfaces (Figure II-48). Les positions des moniteurs sont choisies le plus près possible des capteurs expérimentaux (Figure II-49).

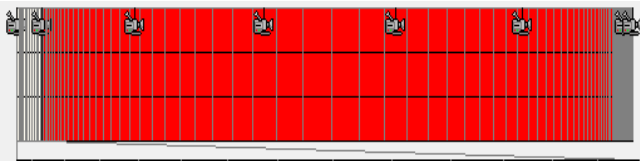


Figure II-48 : Maillage et position des moniteurs

Figure II-49 : Position des capteurs et des moniteurs

Tableau II-7 : Position des moniteurs

Moniteur	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Position x (cm)	Int	0	0,04	4,46	10,71	16,99	23,10	27,99	29,5	Ext

II.2.3 Conditions de simulation

II.2.3.1 Conditions initiales

Les conditions initiales sont définies par des profils de température et d'humidité. Ces profils peuvent être constants ou évoluer sur l'épaisseur de la paroi. Pour l'humidité, il est possible de définir une humidité relative constante ou un profil de teneur en eau volumique sur l'épaisseur de la paroi.

Les profils initiaux sont générés à partir des conditions initiales expérimentales. Celles-ci étant connues en terme de température et d'humidité relative, la teneur en eau volumique est ajustée de façon à ce que le profil généré corresponde aux données expérimentales. Les isothermes de sorption étant connues à 23°C et présentant une hystérésis, cet ajustement a été réalisé de façon itérative Figure II-50.

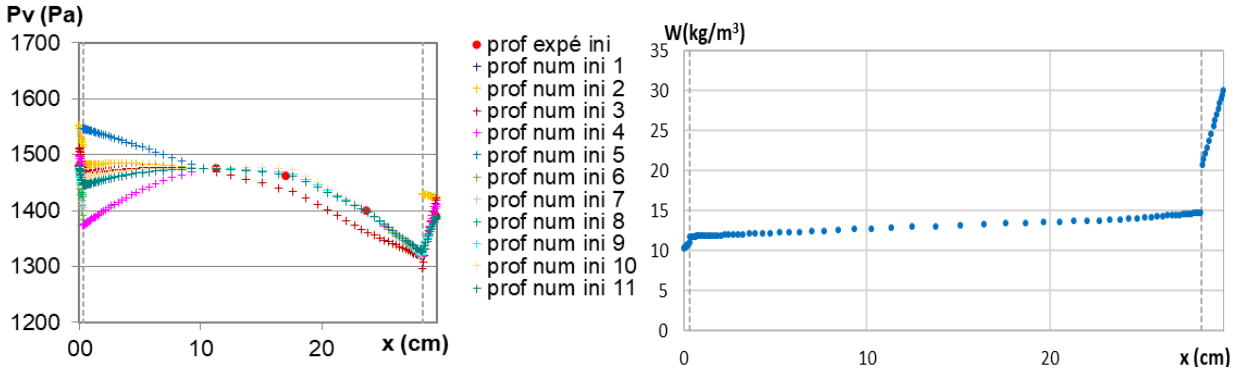


Figure II-50 : exemple d'ajustement du profil initial de la pression de vapeur

II.2.3.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont définies par les températures et humidités relatives en ambiance de chaque côté de la paroi. Côté extérieur, les conditions climatiques peuvent inclure également les charges pluvieuses et radiatives. Ces conditions climatiques peuvent être issues de la base de données climatiques de WUFI, ou générées par l'utilisateur (courbes sinusoïdales ou fichiers climatiques).

Dans notre étude, les conditions aux limites correspondent aux températures ambiantes et aux humidités relatives expérimentales enregistrées, dont la moyenne est calculée toutes les 15 minutes pour lisser les variations de la régulation ambiante (Figure II-51). Le mur n'est pas exposé à la pluie ni au rayonnement solaire.

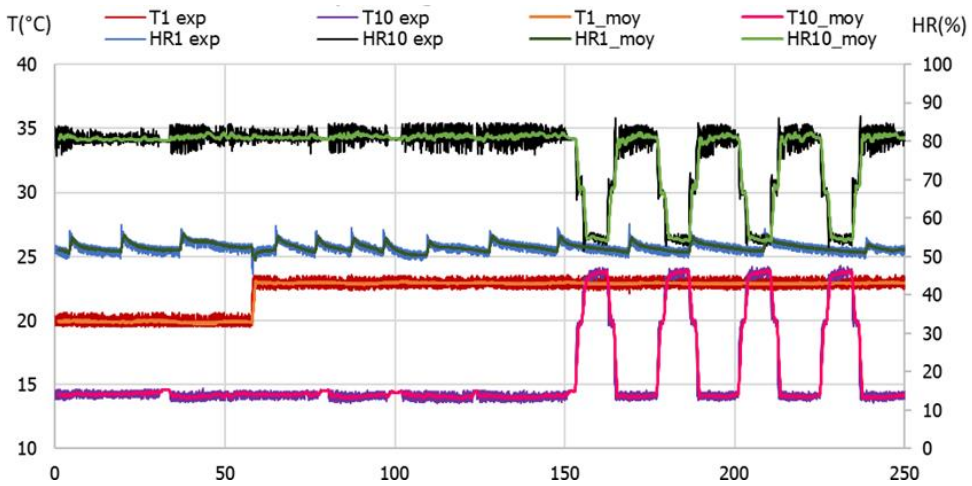


Figure II-51 : exemple de lissage des conditions aux limites

Les résistances thermiques de surface considérées sont de 0,04 m².K/W côté extérieur et 0,13 m².K/W côté intérieur, les résistances hygriques sont de $4{,}55.10^7$ (m².s.Pa)/kg côté intérieur et de $1{,}25.10^7$ (m².s.Pa)/kg côté extérieur. Le contact entre les couches est considéré parfait.

II.2.3.3 Période de calcul et pas de temps

La période de simulation correspond aux périodes expérimentales, et peut être allongée lorsque l'étude est poursuivie jusqu'au régime permanent. Le pas de temps considéré est de 3 minutes.

II.2.4 Type de résultats

Les résultats sont produits sous deux formes : graphiques ou numériques. Il est possible de récupérer les résultats à un instant donné en fonction de la position ou à une position donnée en fonction du temps. Les sorties numériques utilisées concernent la température, l'humidité relative et la teneur en eau volumique sur l'épaisseur de la paroi au cours du temps, ainsi que les flux de chaleur et d'humidité en surfaces intérieure et extérieure au cours du temps.

II.3 Méthodes d'analyse des résultats

II.3.1 Calcul de la pression de vapeur

Préalablement à l'analyse des résultats, la pression de vapeur P_v (Pa) est calculée à partir de la température T (°C) et de l'humidité relative φ (-) issues des données expérimentales ou numériques ('WUFI' 1997) :

$$P_v = \varphi \times 610{,}78\, exp\left(17.08 \frac{T}{234{,}18 + T}\right) \qquad \text{II-8}$$

II.3.2 Analyse sous conditions de gradients de température et de pression de vapeur constants

L'analyse des résultats sous conditions de gradients de température et de pression de vapeur constants comprend l'étude des profils de température et de pression de vapeur à différents instants ainsi que les calculs de résistance thermique de conduction et hygrique à partir des flux et des gradients de température et de pression de vapeur.

Les profils donnés en fin de stabilisation correspondent à la valeur moyenne sur les 24 dernières heures.

La résistance thermique de conduction théorique R_h est calculée à partir de la résistance thermique de chaque couche de la paroi. Le coefficient de transmission thermique de la paroi U est calculé à partir de la résistance thermique de conduction et des résistances de surface. Le flux thermique et les profils de température sont calculés à partir de la résistance thermique et du gradient de température correspondant aux valeurs moyennes des températures ambiantes sur les dernières 24 heures de la période considérée.

$$U = \frac{1}{1/h_i + R_h + 1/h_e}\,;\; R_h = \sum {e_i}/{\lambda_i} \qquad \text{II-9}$$

$$\varphi_h = U(T_i - T_e) \qquad \text{II-10}$$

La résistance thermique de conduction de la paroi est également obtenue à partir des données expérimentales et numériques. La méthode est basée sur la norme ISO 9869 où, selon (Rasooli and Itard. 2018) et (Ficco et al. 2015) les principales recommandations pour obtenir une valeur de R acceptable sont : (i) la période de mesure doit être multiple de 24 heures et d'au moins 72 heures,

(ii) la valeur R obtenue à la fin du test ne diffère pas de plus de 5% de la valeur obtenue 24 heures auparavant. De plus, le gradient de température doit être de 5 K au moins. La résistance thermique de conduction de la paroi est calculée sur les dernières 24 heures à partir de la moyenne des températures de surface et des flux de chaleur. Elle est calculée côté intérieur et extérieur, conduisant respectivement à $R_{(c,int)}$ et $R_{(c,ext)}$. La résistance thermique de conduction de la paroi est la valeur moyenne de $R_{(c,int)}$ et $R_{(c,ext)}$. Le calcul est effectué à partir des données expérimentales à la fin de la phase de stabilisation, et à partir des résultats numériques à la fin de la phase de stabilisation et lors de l'atteinte du régime permanent.

$$R_{h,int/ext} = \frac{\overline{T_{s,int}} - \overline{T_{s,ext}}}{\overline{\varphi_{h,int/ext}}} \qquad \text{II-11}$$

$$\overline{T_{s,int}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} T_{int,j}\ ;\ \overline{T_{s,ext}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} T_{ext,j}\ ;\ \overline{\varphi_{h,int/ext}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \varphi_{h,int/ext,j}$$

$$R_h = \left(R_{h,int} + R_{h,ext}\right)/2 \qquad \text{II-12}$$

La résistance hygrique interne théorique de la paroi R_m est calculée à partir de la résistance hygrique de chaque couche. La perméance est calculée à partir de la résistance hygrique et des coefficients de transfert de surface. Le flux d'humidité et les profils de pression de vapeur sont calculés à partir de la résistance hygrique et du gradient de pression de vapeur. Le gradient de pression de vapeur est calculé à partir des valeurs moyennes des pressions de vapeur ambiantes sur les dernières 24 heures de la période considérée.

$$G = \frac{1}{{}^{1}/_{\beta_i} + R_m + {}^{1}/_{\beta_e}}\ ;\ R_m = \sum \frac{e_i \times \mu_i}{\pi_{air}} \qquad \text{II-13}$$

$$\varphi_m = G(Pv_i - Pv_e) \qquad \text{II-14}$$

La résistance hygrique interne de la paroi est également obtenue à partir des données numériques de la même manière que pour le calcul de la résistance thermique de conduction. La pression de vapeur de surface (intérieure et extérieure) et les flux d'humidité (intérieure et extérieure) sont moyennés sur les dernières 24 heures de la période considérée. La résistance hygrique interne $R_{m,int}$ est calculée à partir du flux d'humidité intérieur et du gradient de pression de vapeur (respectivement $R_{m,ext}$; flux d'humidité extérieur). La résistance hygrique interne du mur est la valeur moyenne de $R_{m,int}$ et $R_{m,ext}$. Le calcul est effectué à partir des résultats numériques à la fin de la phase de stabilisation et lors de l'atteinte de l'état d'équilibre.

$$R_{m,int/ext} = \frac{\overline{Pv_{s,int}} - \overline{Pv_{s,ext}}}{\overline{\varphi_{m,int/ext}}} \qquad \text{II-15}$$

$$\overline{Pv_{s,int}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} Pv_{int,j}\ ;\ \overline{Pv_{s,ext}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} Pv_{ext,j}\ ;\ \overline{\varphi_{m,int/ext}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \varphi_{m,int/ext,j}$$

$$R_m = \left(R_{m,int} + R_{m,ext}\right)/2 \qquad \text{II-16}$$

II.3.3 Analyse sous sollicitations cycliques

Pendant la sollicitation dynamique sous variation cyclique quotidienne, l'analyse des profils de température et de pression de vapeur à différents instants de la sollicitation met en évidence les zones actives de la paroi et les phénomènes hygrothermiques qui s'y produisent.

Les transferts de chaleur et d'humidité sont également caractérisés par le déphasage et l'amortissement du signal sur l'épaisseur de la paroi. Le déphasage est le temps qui sépare l'excitation et la réponse à l'excitation. Le facteur d'amortissement est le rapport entre l'amplitude en surface et l'amplitude au point donné (Figure II-52).

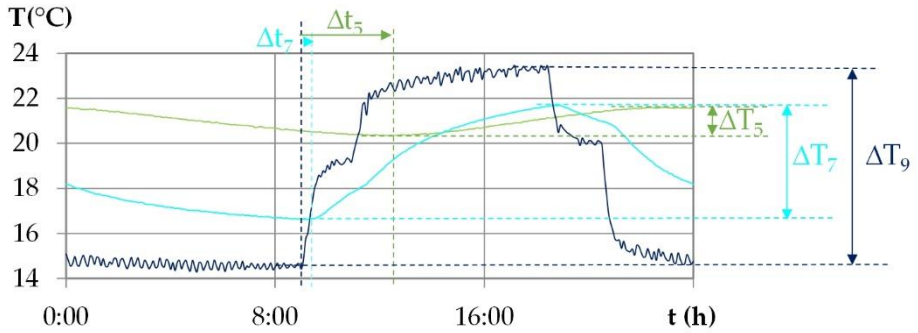


Figure II-52 : Identification de la phase de décalage Δt entre la surface et un point donné et de l'amplitude à la surface et en un point donné (exemple de l'amplitude de température ΔT).

Enfin, la variation des flux de chaleur et d'humidité en fonction du temps est étudiée sur les surfaces intérieures et extérieures du mur. Le stockage et le déstockage de la chaleur sont calculés en surface intérieure et extérieure du mur en intégrant les flux de chaleur entrants et sortants au cours du temps. Le stockage / déstockage de chaleur total est la somme des valeurs sur les deux surfaces. De la même manière, le stockage et le déstockage de l'humidité sont calculés sur chaque surface et le total est la somme des valeurs sur les deux surfaces.

$$Q_{h,int/ext} = \int_t \varphi_{h,int/ext}.dt \; ; Q_h = Q_{h,int} + Q_{h,ext} \qquad \text{II-17}$$

$$Q_{m,int/ext} = \int_t \varphi_{m,int/ext}.dt \; ; Q_m = Q_{m,int} + Q_{m,ext} \qquad \text{II-18}$$

II.4 Conclusion

Ce chapitre a défini les méthodes utilisées pour réaliser l'étude expérimentale et numérique du comportement hygrothermique de parois en conditions contrôlées.

Le dispositif expérimental permet de contrôler les sollicitations en température et en humidité relative en ambiance de part et d'autre de la paroi. La métrologie associée permet de mesurer la réponse du mur à ces sollicitations.

Les sollicitations sont définies à partir de climats français et tunisiens, sans ou avec prise en compte de l'ensoleillement. Le dispositif expérimental permet de simuler des climats de mi-saison et d'été mais ne permet pas de simuler les climats d'hiver, qui pourraient être accessibles par la simulation.

L'étude numérique avec le logiciel WUFI Pro 6.5 utilisera comme conditions aux limites les conditions expérimentales mesurées afin de comparer la réponse numérique à la réponse expérimentale. De plus, des simulations complémentaires seront réalisées pour des temps de stabilisation plus long permettant d'atteindre le régime permanent.

Les méthodes d'analyse des résultats sont définies selon deux cas : pour des sollicitations sous gradients de température et de pression de vapeur constants et sous sollicitations cycliques journalières. Le comportement hygrothermique de la paroi sera analysé à partir des cinétiques et des profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur. Les résistances thermiques de conduction et hygrique de la paroi sont identifiées sous gradients de température et de pression de vapeur constants. Le comportement en régime dynamique sera caractérisé par l'amortissement et le déphasage de température et de pression de vapeur ainsi que par les bilans de flux.

Chapitre III Etudes à l'échelle de la paroi en ambiance contrôlée Résultats et discussion

Sommaire

III.1 Paroi terre chanvre sous gradients de température et de pression de vapeur constants 67

III.1.1 Cinétiques et profils 67

III.1.2 Flux de chaleur et d'humidité, résistances thermiques et hygriques 74

III.1.3 Bilan de l'étude sous condition de gradients constants de température et d'humidité relative 76

III.2 Paroi terre chanvre sous sollicitations cycliques sans ensoleillement 77

III.2.1 Résultats cinétiques 77

III.2.2 Evolution des profils au cours du dernier cycle 84

III.2.3 Flux de chaleur et d'humidité pendant les variations cycliques quotidiennes 89

III.2.4 Stockage et déstockage de la chaleur et de l'humidité pendant les variations cycliques quotidiennes 91

III.3 Paroi terre chanvre sous sollicitations cycliques avec ensoleillement 94

III.3.1 Résultats cinétiques 94

III.3.2 Profils 98

III.3.3 Flux de chaleur et d'humidité 100

III.3.4 Stockage et déstockage de la chaleur et de l'humidité dans la paroi 101

III.4 Paroi terre chanvre - saison d'été et mi-saison avec une sollicitation hygrique en ambiance intérieure 104

III.4.1 Résultats cinétiques 104

III.4.2 Profils 106

III.4.3 Flux de chaleur et d'humidité 107

III.4.4 Stockage et déstockage de la chaleur et de l'humidité dans la paroi 108

III.5 Comparaison aux autres parois - saison d'été 109

III.5.1 Sous conditions de gradients de température et de pression de vapeur constants 109

III.5.1.1 Profils 109

III.5.1.2 Flux de chaleur et résistances thermiques 111

III.5.2 Sollicitations cycliques – été sans ensoleillement 112

III.5.2.1 Profils et analyse dynamique en température 112

III.5.2.2 Flux de chaleur 115

III.5.2.3 Stockage et déstockage de chaleur 115

III.5.3 Sollicitations cycliques - été avec ensoleillement 116

III.5.3.1 Profils 116
III.5.3.2 Flux de chaleur 120
III.5.3.3 Stockage et déstockage de chaleur 120
III.5.4 Sollicitations cycliques -été avec une sollicitation hygrique en ambiance intérieure 121
III.5.4.1 Profils 121
III.5.4.2 Flux de chaleur 124
III.5.4.3 Stockage et déstockage de chaleur 124
III.6 Conclusion 125

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux et numériques relatifs au comportement hygrothermique des parois en ambiances contrôlées. Du fait des possibilités de régulation dans l'enceinte bi-climatique, les essais présentés correspondent à des conditions de mi-saison et d'été. Préalablement aux sollicitations dynamiques, les parois sont stabilisées aux conditions nuit, ce qui permet une analyse sous conditions de gradients de température et de pression de vapeur constants. Ensuite, les parois sont soumises à des sollicitations correspondant aux cycles journaliers sans ensoleillement puis avec ensoleillement. Enfin, une sollicitation hygrique en ambiance intérieure est considérée. Les résultats sont d'abord analysés pour la paroi terre-chanvre pour les différents climats. Les autres parois sont comparées à la paroi terre-chanvre pour les différentes sollicitations pour le climat de Rennes.

Il s'est avéré lors des mesures que certains capteurs ont été endommagés lors de la mise en œuvre soit mécaniquement lors de la mise en place des enduits, soit par l'humidité excessive pendant la période de séchage des parois. Il s'agit, pour la paroi Terre chanvre des capteurs 3 et 4, pour la paroi Isobio du capteur I3, pour la paroi Maïs du capteur M3 et la paroi Colza du capteur C3. De fait, leurs réponses sont écartées des traitements des données.

III.1 Paroi terre chanvre sous gradients de température et de pression de vapeur constants

La première phase sous gradients de température et de pression de vapeur d'eau constants permet de stabiliser la paroi avant la sollicitation cyclique. La stabilité est considérée atteinte lorsque les variations relatives de température et de pression de vapeur sont inférieures à 1% au cours des dernières 24 heures, sur toute l'épaisseur de la paroi. Cette phase correspond aux conditions nuit. Pour toutes les conditions climatiques considérées, la température intérieure est plus élevée que la température extérieure ce qui induit un gradient de température, et donc un flux de chaleur, du côté intérieur vers le côté extérieur. Pour Rennes, Toulouse, Strasbourg et Kairouan, la pression de vapeur intérieure est supérieure à celle de l'extérieur ce qui induit un gradient de pression de vapeur, et donc un flux d'humidité, du côté intérieur vers le côté extérieur. Pour Brest et Djerba, la pression de vapeur est plus élevée du côté extérieur que du côté intérieur, le flux d'humidité est opposé au flux de chaleur.

III.1.1 Cinétiques et profils

Les Figure III-1 et Figure III-2 présentent les cinétiques de température et de pression de vapeur au cours de la phase sous consigne de gradients constants de température et de pression de vapeur. Les cinétiques d'humidité relative sont données en annexe A II. Cette phase a duré entre 7 et 17 jours : 7 pour Rennes, 15 pour Djerba, Kairouan et Strasbourg, 17 pour Toulouse et Brest.

Les cinétiques montrent que de façon générale la consigne de température est bien maintenue avec une amplitude de régulation inférieure à 1°C pour toutes les villes. Toutefois, quelques décrochages peuvent survenir, comme dans le cas de Brest. Une fois que les ambiances intérieures et extérieures sont maintenues à température constante, l'évolution des températures au sein de la paroi se fait de façon progressive. Le temps nécessaire pour atteindre la stabilité des températures est compris entre 20 et 72 heures pour les situations testées. Cette durée dépend des conditions initiales et des ambiances imposées. Les résultats numériques sont cohérents avec les résultats expérimentaux, avec des écarts sur les températures de 0.6°C maximum.

Pour les pressions de vapeur, la consigne est respectée en moyenne mais avec des fluctuations marquées de l'ordre de 100 Pa du fait du mode de régulation de l'humidité. Comme pour la température, quelques décrochages dus à la régulation apparaissent. Une fois que les ambiances intérieures et extérieures sont stabilisées en moyenne, deux types de phénomènes sont observés : des évolutions progressives de pression de vapeur qui correspondent à des phénomènes de diffusion, des évolutions de pressions de vapeur au-delà des valeurs atteintes à l'équilibre qui correspondent aux phénomènes de désorption et d'adsorption. Ces derniers sont notamment observés pour Kairouan et pour Brest où ils sont induits par les pics de température. Le temps nécessaire pour atteindre la stabilité des pressions de vapeur est compris entre 100 et 300 heures pour les situations testées. L'évolution des résultats numériques correspond à celle des résultats expérimentaux tout en présentant un écart plus ou moins important au sein de la paroi, quasi nul

pour Kairouan, autour de 100 Pa de façon générale et pouvant atteindre 200 Pa dans le cas de Djerba.

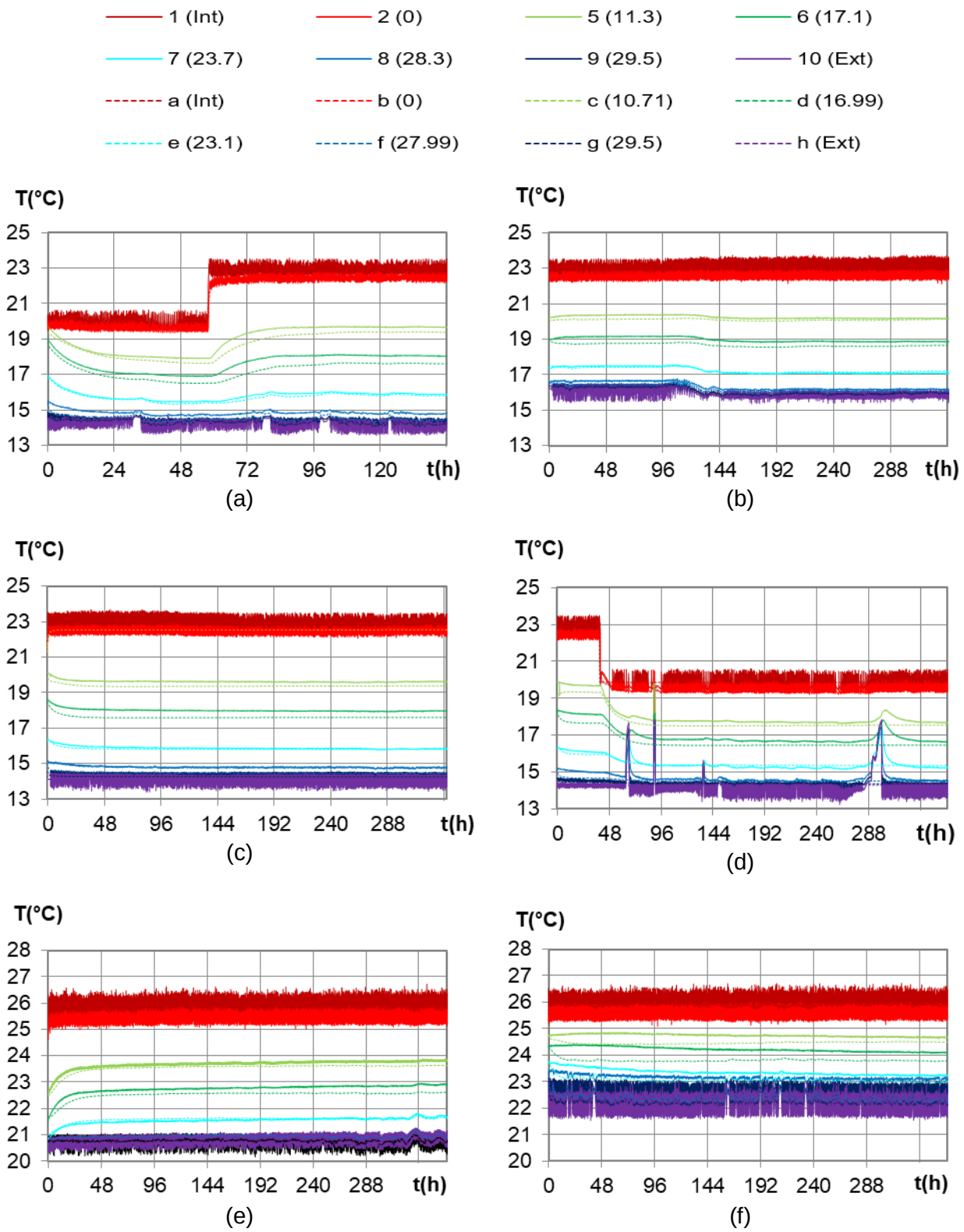


Figure III-1 : Cinétique de température pendant la phase stabilisation des climats (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba.

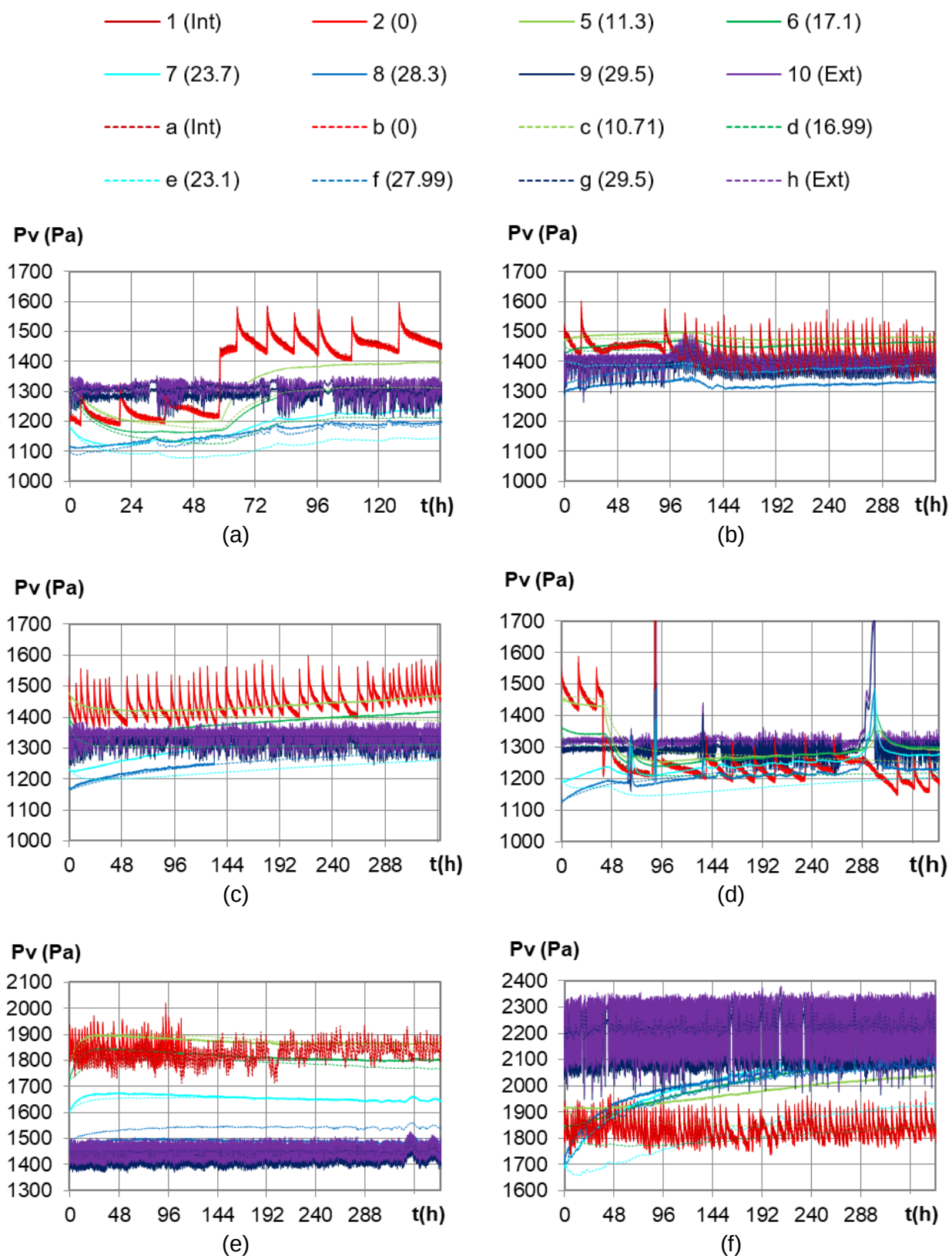


Figure III-2 : Cinétiques de pression de vapeur pendant la phase stabilisation des climats (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba.

Les Figure III-3 et Figure III-4 présentent les profils de température et les profils de pression de vapeur sur l'épaisseur du mur. Elles incluent le profil expérimental à l'état initial, le profil expérimental à la fin de la stabilisation, les profils théoriques calculés à partir des propriétés des matériaux en régime permanent et les profils numériques aux mêmes instants que les profils expérimentaux et à des instants ultérieurs pour étudier l'atteinte du régime permanent. Les profils expérimentaux d'humidité relative sont donnés en annexe A II.

Selon l'état initial et les conditions imposées, l'évolution des profils au cours de la phase de stabilisation diffère. En température, l'évolution se fait de façon progressive, en lien avec les flux de chaleur dont le sens et l'intensité sont donnés par le gradient de température au sein de la paroi. Les évolutions observées sont cohérentes avec l'état initial et les conditions ambiantes imposées. En pression de vapeur, dans les cas où les évolutions cinétiques sont progressives vers l'état permanent, comme par exemple Rennes, il en est de même pour les évolutions des profils au cours du temps. Dans le cas où des phénomènes d'adsorption-désorption sont identifiés, comme par exemple à Kairouan, les profils s'éloignent dans un premier temps des valeurs du régime permanent avant de s'en rapprocher.

En température, pour les villes avec des flux de chaleur et d'humidité dans le même sens, les profils expérimentaux et numériques à la fin de la phase de stabilisation montrent un très bon accord avec les profils théoriques. L'écart entre les données expérimentales et la théorie est inférieur à 1% pour Kairouan et Toulouse et 4% pour Rennes. L'écart entre les données numériques et la théorie est inférieur à 1% pour toutes les villes. Cela montre qu'un état d'équilibre est presque atteint d'un point de vue thermique et permet de confirmer les valeurs de conductivité thermique et les positions des capteurs.

Pour les villes avec des flux de chaleur et d'humidité opposés, pour Djerba, les profils de température expérimentaux et numériques à la fin de la phase de stabilisation diffèrent entre eux et du profil théorique. Les principales différences sont observées sur le côté extérieur du mur où les données expérimentales sont plus élevées, avec un écart atteignant presque 5% entre les données expérimentales et la théorie et un écart inférieur à 2% entre les données numériques et la théorie. Ces différences entre les profils (expérimental, numérique et théorique) sont probablement dues aux phénomènes hygriques incluant le flux d'humidité opposé au flux de chaleur et de possibles effets de sorption-désorption qui induisent un flux de chaleur. Pour Brest, l'évolution des profils de température ne semble pas impactée par les phénomènes hygriques, probablement du fait que le gradient de pression de vapeur est plus faible que pour Djerba.

Pour toutes les villes, les simulations sont effectuées pour des durées beaucoup plus élevées. Comme le montre la Figure III-3, après 80 jours, un état d'équilibre est presque atteint dans tous les cas. La poursuite des simulations à 180 jours montre que l'état d'équilibre thermique est entièrement atteint dans tous les cas, le profil est confondu avec le profil théorique. Cet instant sera considéré pour le calcul de la résistance thermique de la paroi.

En pression de vapeur, il y a plus de différences que pour les profils de température entre les résultats expérimentaux, théoriques et numériques à la fin de la phase de stabilisation. Le régime permanent n'est pas complètement atteint du point de vue hygrique à la fin de la phase de stabilisation et les profils numériques sont décalés par rapport aux profils expérimentaux. Cela peut être dû à l'estimation de la diffusion de la vapeur, qui est calculée à partir de la perméabilité à la vapeur et de la courbe d'adsorption principale. La simulation est poursuivie sur des temps beaucoup plus longs, le régime permanent est considéré atteint lorsqu'il y a moins de 2% d'écart relatif entre la valeur numérique et la valeur théorique sur toute l'épaisseur de la paroi.

Pour le climat de Toulouse, il n'y a presque pas de gradient de pression de vapeur, donc la pression de vapeur tend vers une valeur constante sur l'épaisseur de la paroi. Les résultats expérimentaux et numériques sont proches des résultats théoriques et le profil est presque établi sur toute l'épaisseur de la paroi à la fin de la phase de stabilisation.

Pour le climat de Rennes et de Strasbourg, la pression de vapeur théorique diminue sur l'épaisseur du mur de l'intérieur vers l'extérieur. Les résultats expérimentaux se rapprochent des résultats théoriques sur la première moitié de l'épaisseur du mur, du côté intérieur. Les résultats numériques montrent des tendances similaires à celles des résultats expérimentaux. A la fin de la phase de stabilisation, un état d'équilibre est partiellement atteint pour les résultats expérimentaux.

Après 120 jours pour Rennes et 60 jours pour Strasbourg, le régime permanent est atteint d’un point de vue numérique.

Pour le climat de Kairouan, les résultats numériques montrent la même tendance que les résultats expérimentaux. Ils montrent une augmentation de la pression de vapeur sur l'épaisseur de la paroi, par rapport au profil initial, même si en régime permanent, la pression de vapeur devient plus faible. Ceci met en évidence les phénomènes de désorption induits par le transfert de chaleur. D'après la simulation, après 60 jours, le régime permanent est atteint.

Pour le climat de Djerba, la pression de vapeur théorique augmente sur l'épaisseur du mur de l'intérieur vers l'extérieur. Les résultats expérimentaux à la fin de la phase de stabilisation sont proches des résultats théoriques sur les trois quarts intérieurs de l'épaisseur du mur alors que les résultats numériques restent éloignés. Cet écart important peut être dû au fait que les flux de chaleur et d'humidité sont opposés. Numériquement, le régime permanent est atteint après 80 jours, même si les résultats expérimentaux montrent que le profil de pression de vapeur est presque établi à la fin de la stabilisation.

Pour le climat de Brest, la pression de vapeur théorique augmente sur l'épaisseur du mur de l'intérieur vers l'extérieur. Au cours de la phase de stabilisation, le profil de pression de vapeur s’inverse sur l’épaisseur du mur. Les résultats expérimentaux et les résultats numériques montrent la même tendance, ils restent supérieurs à la valeur théorique côté intérieur et inférieurs côté extérieur. Selon la simulation, à 120 jours le régime permanent est atteint.

Au bilan, les résultats numériques montrent les mêmes tendances que les résultats expérimentaux lorsque les flux de chaleur et d'humidité sont dans la même direction. Lorsque les flux de chaleur et d'humidité sont opposés, il y a plus de différence. Le temps nécessaire pour atteindre l'état d'équilibre hygrique diffère d'un climat à l'autre. Il est lié à l'inertie hygrique de la paroi et dépend de son état initial et de son état d'équilibre.

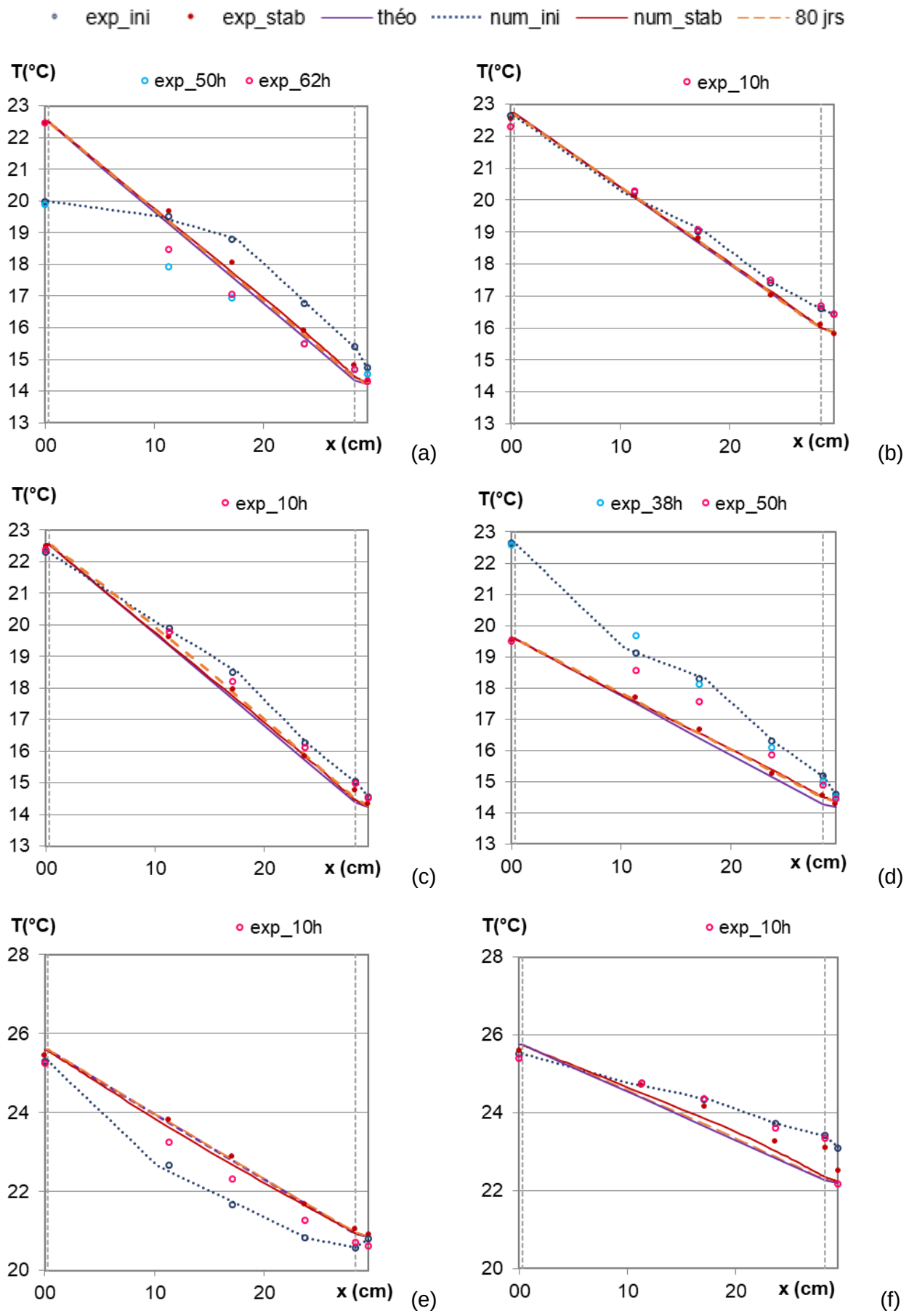


Figure III-3 : Profils de température sous gradients de température et de pression de vapeur constants, valeurs moyennes théoriques, expérimentales et numériques sur les dernières 24 h de la phase de stabilisation pour les climats de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba.

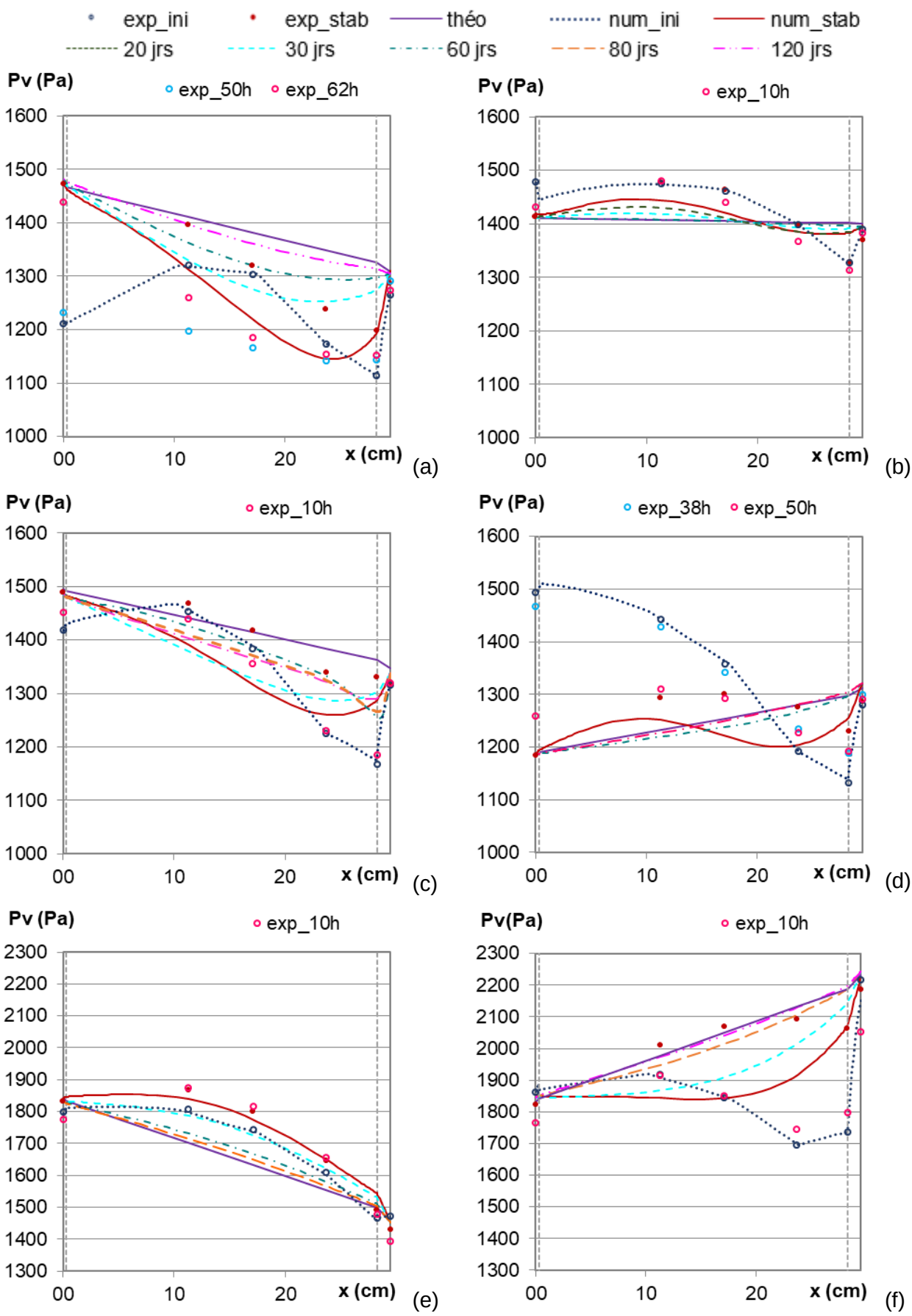


Figure III-4 : Profils de pression de vapeur sous température et gradients de pression de vapeur constants, valeurs moyennes théoriques, expérimentales et numériques sur les dernières 24 h de la phase de stabilisation pour les climats de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba.

III.1.2 Flux de chaleur et d'humidité, résistances thermiques et hygriques

D'un point de vue thermique, les résultats expérimentaux à la fin de la phase de stabilisation sont présentés dans le Tableau III-1. Les résultats numériques à la fin de la phase de stabilisation sont présentés dans le Tableau III-2 et après 180 jours dans le Tableau III-3. Ces tableaux donnent les températures de surface intérieures et extérieures, les flux de chaleur en surfaces intérieure et extérieure et les valeurs de résistance thermique de conduction R_h calculées à partir des écarts de température et des flux en surface intérieure, en surface extérieure et en moyenne.

A la fin de la phase de stabilisation, des écarts plus ou moins prononcés entre les flux de chaleur mesurés en surface intérieure et en surface extérieure subsistent. Ils sont de 1 à 5 % pour les conditions correspondant aux villes de Toulouse, Strasbourg, Brest, et Djerba, de l'ordre de 12 % pour Rennes et Djerba. Ceci est probablement associé à l'effet d'inertie thermique, le régime permanent n'étant pas complètement atteint. Cela souligne que le critère de 1% de variation relative en température et en pression de vapeur pour la phase de stabilisation est pertinent car il conduit à des écarts sur les flux entre la surface intérieure et la surface extérieure en général inférieur à 5%. Toutefois, dans certaines configurations cet écart peut être plus important. Il serait pertinent d'ajouter un critère sur la comparaison des flux en surface pour identifier la fin de la stabilisation.

Les flux de chaleur expérimentaux et numériques sont proches pour Rennes, Toulouse, Strasbourg, Brest et Kairouan (écarts relatifs inférieurs à 5%). Pour Djerba, l'écart relatif entre les résultats expérimentaux et numériques est plus important, ce qui est cohérent avec l'écart observé sur les profils.

A la fin de la phase de stabilisation, pour les six villes, les valeurs expérimentales de R_h sont cohérentes avec les valeurs théoriques, avec des erreurs relatives inférieures à 5%. Les résultats numériques sont proches des résultats expérimentaux (écarts inférieurs à 6%). Dans le cas où les flux de chaleur et d'humidité sont opposés, les flux de chaleur numériques surestiment les flux expérimentaux et induisent des valeurs de résistance thermique plus faibles. En outre, les valeurs expérimentales de R_h obtenues avec les conditions de Kairouan et Djerba, avec un gradient de température inférieur à 5K recommandé dans la norme, sont cohérentes avec les valeurs théoriques. Lorsque la mesure est réalisée à la fin de la stabilisation sous un gradient de température et de pression de vapeur constant, il est possible de s'affranchir du critère de 5 K d'écart sous réserve d'une précision suffisante des fluxmètres.

Après 180 jours, les flux de chaleur numériques sont les mêmes sur le côté intérieur et extérieur du mur. Ceci souligne qu'un état stable est atteint pour toutes les configurations, y compris celle comparative à l'essai de Palomar. Les résistances thermiques de conduction issues des simulations sont les mêmes pour toutes les configurations et en accord avec les valeurs théoriques (écart inférieur à 0,6%).

D'un point de vue hygrique, les flux n'étant pas mesurés expérimentalement, seuls les résultats numériques à la fin de la phase de stabilisation et après 300 jours figurent dans les Tableau III-4 et Tableau III-5. Ces tableaux présentent les pressions de vapeur en surfaces intérieure et extérieure, les flux de vapeur en surfaces intérieure et extérieure et les résistances hygriques calculées à partir des écarts de pression de vapeur et des flux d'humidité.

A la fin de la phase de stabilisation, les flux d'humidité sont impactés par l'état hygrique initial du mur. Pour le climat de Brest, de Djerba et de Kairouan, le flux d'humidité est presque nul sur la surface intérieure, car le profil numérique de la pression de vapeur de vapeur est horizontal près de cette surface. Sur la surface extérieure, le flux d'humidité est en accord avec le gradient de pression de vapeur. Pour le climat de Toulouse, le gradient de pression de vapeur est très faible et le flux d'humidité est négligeable mais non établi. Pour le climat de Rennes, le flux d'humidité est important sur les deux surfaces de la paroi. Il est en adéquation avec le gradient de pression de vapeur sur la face intérieure du mur et opposé sur la face extérieure. Ceci met en évidence que les flux d'humidité ne sont pas établis dans la paroi et ne permettent pas de calculer les résistances hygriques R_m qui ne seraient pas cohérentes dans ces conditions.

Après 300 jours, pour toutes les villes, les flux d'humidité sur le côté intérieur et sur le côté extérieur du mur sont les mêmes (écart maximal de 6% pour Rennes). Un état stationnaire est très proche d'être atteint et les valeurs numériques de R_m deviennent proches entre les six climats (écart

inférieur à 5%). Ces valeurs numériques de R_m sont cohérentes avec les valeurs théoriques avec des erreurs relatives inférieures à 13%.

Tableau III-1 : Flux de chaleur expérimentaux et valeurs R_h à la fin de la phase de stabilisation

	T_{2_exp} (°C)	T_{9_exp} (°C)	φ_{hint_exp} (W/m²)	φ_{hext_exp} (W/m²)	R_{h,int_exp} (m²·K/W)	$R_{h,\ ext_exp}$ (m²·K/W)	$R_{h,\ exp}$ (m²·K/W)
Rennes	22,45	14,34	3,09	3,49	2,621	2,320	2,470
Toulouse	22,53	15,82	2,62	2,74	2,564	2,554	2,509
Strasbourg	22,48	14,34	3,19	3,31	2,547	2,454	2,501
Best	19,54	14,28	2,13	2,10	2,466	2,502	2,484
Kairouan	25,46	20,92	1,96	1,74	2,319	2,610	2,464
Djerba	25,58	22,49	1,15	1,14	2,694	2,704	2,698

Tableau III-2 : Flux de chaleur numérique et valeurs R_h à la fin de la phase de stabilisation

	T_{2_num} (°C)	T_{9_num} (°C)	$\varphi_{h\ int_num}$ (W/m²)	$\varphi_{h\ ext_num}$ (W/m²)	$R_{h,\ int_num}$ (m²·K/W)	$R_{h,\ ext_num}$ (m²·K/W)	$R_{h,\ num}$ (m²·K/W)
Rennes	22,52	14,24	3,08	3,67	2,685	2,255	2,470
Toulouse	22,73	15,85	2,54	2,83	2,706	2,435	2,571
Strasbourg	22,56	14,11	3,21	3,30	2,603	2,414	2,509
Brest	19,59	14,38	2,09	2,21	2,498	2,356	2,427
Kairouan	25,58	20,86	2,03	1,64	2,331	2,888	2,610
Djerba	25,75	22,20	1,54	1,78	2,304	2,000	2,152

Tableau III-3 : Flux de chaleur numériques et valeurs R_h après 180 jours sous des gradients de température et de pression de vapeur constants.

	T_{2_num} (°C)	T_{9_num} (°C)	$\varphi_{h\ int_num}$ (W/m²)	$\varphi_{h\ ext_num}$ (W/m²)	$R_{h,\ int_num}$ (m²·K/W)	$R_{h,\ ext_num}$ (m²·K/W)	$R_{c,\ num}$ (m²·K/W)
Rennes	22,51	14,23	3,17	3,17	2,609	2,609	2,609
Toulouse	22,70	15,82	2,64	2,64	2,609	2,609	2,609
Strasbourg	22,54	14,09	3,24	3,24	2,609	2,609	2,609
Brest	19,60	14,10	2,10	2,10	2,609	2,609	2,609
Kairouan	25,61	20,86	1,82	1,82	2,609	2,609	2,609
Djerba	25,74	22,19	1,36	1,36	2,608	2,608	2,608

Tableau III-4 : Flux d'humidité numériques et valeurs R_m à la fin de la phase de stabilisation.

	Pv_{2_num} (Pa)	Pv_{9_num} (Pa)	$\varphi_{m\ int_num}$ (kg/(m².s))	$\varphi_{m\ ext_num}$ (kg/(m².s))	$R_{m,\ int_num}$ (m².s.Pa/kg)	$R_{m,\ ext_num}$ (m².s.Pa/kg)	R_{m_num} (m².s.Pa/kg)
Rennes	1477	1309	$8{,}29\cdot10^{-8}$	$-1{,}93\cdot10^{-7}$	-	-	-
Toulouse	1418	1397	$8{,}13\cdot10^{-9}$	$-2{,}17\cdot10^{-8}$	-	-	-
Strasbourg	1487	1338	$2{,}86\cdot10^{-8}$	$-8{,}88\cdot10^{-8}$	-	-	-
Brest	1185	1320	$-4{,}70\cdot10^{-8}$	$-9{,}88\cdot10^{-8}$	-	-	-
Kairouan	1841	1453	$-2{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}20\cdot10^{-7}$	-	-	-
Djerba	1846	2228	$-2{,}35\cdot10^{-8}$	$-2{,}13\cdot10^{-7}$	-	-	-

Tableau III-5 : Flux d'humidité numériques et valeurs R_m après 300 jours.

	Pv_{2_num} (Pa)	Pv_{9_num} (Pa)	$\varphi_{m\ int_num}$ (kg/(m².s))	$\varphi_{m\ ext_num}$ (kg/(m².s))	$R_{m,\ int_num}$ (m².s.Pa/kg)	$R_{m,\ ext_num}$ (m².s.Pa/kg)	R_{m_num} (m².s.Pa/kg)
Rennes	1483	1305	$2{,}78\cdot10^{-8}$	$2{,}62\cdot10^{-8}$	$6{,}40\cdot10^{9}$	$6{,}78\cdot10^{9}$	$6{,}59\cdot10^{9}$
Toulouse	1410	1394	$2{,}23\cdot10^{-9}$	$2{,}26\cdot10^{-9}$	$7{,}14\cdot10^{9}$	$7{,}05\cdot10^{9}$	$7{,}10\cdot10^{9}$
Strasbourg	1487	1338	$2{,}21\cdot10^{-8}$	$2{,}12\cdot10^{-8}$	$6{,}74\cdot10^{9}$	$7{,}02\cdot10^{9}$	$6{,}88\cdot10^{9}$
Brest	1184	1321	$-1{,}94\cdot10^{-8}$	$-1{,}05\cdot10^{-8}$	$7{,}02\cdot10^{9}$	$6{,}93\cdot10^{9}$	$6{,}97\cdot10^{9}$
Kairouan	1833	1451	$5{,}84\cdot10^{-8}$	$5{,}84\cdot10^{-8}$	$6{,}54\cdot10^{9}$	$6{,}54\cdot10^{9}$	$6{,}54\cdot10^{9}$
Djerba	1845	2243	$-5{,}67\cdot10^{-8}$	$-5{,}73\cdot10^{-8}$	$7{,}01\cdot10^{9}$	$6{,}95\cdot10^{9}$	$6{,}98\cdot10^{9}$

III.1.3 Bilan de l'étude sous condition de gradients constants de température et d'humidité relative

Cette étude montre que d'un point de vue thermique le critère de 1 % de variation relative de température sur 24 heures pour définir la stabilisation est cohérent. De façon générale, il conduit à des résultats proches du régime permanent et permet de calculer la résistance thermique avec une précision de l'ordre de 5%. Ce critère pourrait être complété d'un critère sur la comparaison des flux de chaleur en surface intérieure et extérieure pour détecter plus précisément le régime permanent. En outre, les résultats numériques sont proches des résultats expérimentaux.

D'un point de vue hygrique, le critère de 1 % de variation relative de pression de vapeur sur 24 heures ne permet pas d'atteindre des profils proches de ceux du régime permanent. Les temps de réponse sont plus longs. En effet, le comportement hygrique est régi par le gradient de pression de vapeur, la présence d'hystérésis et les phénomènes de sorption-désorption. Les réponses numériques sont comparables aux réponses expérimentales avec toutefois des écarts plus importants dans le cas de flux de chaleur et d'humidités opposés et ce d'autant plus que les gradients sont forts. En prolongeant la simulation à des temps très longs, le régime permanent est atteint.

En outre, la comparaison des profils expérimentaux en température permet de valider les positions des capteurs et les propriétés thermiques considérées. Les écarts entre les résultats hygriques expérimentaux et numériques peuvent potentiellement s'expliquer par les valeurs considérées pour les différentes propriétés hygriques.

III.2 Paroi terre chanvre sous sollicitations cycliques sans ensoleillement

Suite à la stabilisation, des sollicitations cycliques représentatives des cycles jour-nuit sans ensoleillement sont répétées jusqu'à obtenir une réponse répétable.

Les résultats obtenus sur les cinétiques sont d'abord présentés puis exploités de façon à donner les déphasages et variations relatives des signaux de température et de pression de vapeur sur l'épaisseur du mur. L'évolution des profils au cours du cycle répétable est étudiée. Enfin, des bilans de flux sont réalisés pour quantifier les effets de stockage-déstockage de chaleur et d'humidité.

III.2.1 Résultats cinétiques

Les résultats expérimentaux en terme de cinétique aux différentes positions (conditions ambiantes, surfaces d'échange et différentes profondeurs dans le mur) sont présentés Figure III-5 pour la température, Figure III-6 pour l'humidité relative et Figure III-7 pour la pression de vapeur.

Pour toutes les villes, les conditions ambiantes intérieures et extérieures sont en bon accord avec les points de consigne. Il y a de faibles fluctuations induites par la régulation. La pression de vapeur résulte de la température et de l'humidité relative. Lors du changement de point de consigne, la fluctuation de l'humidité relative est amplifiée par la variation de température, ce qui entraîne un pic de pression de vapeur.

Pendant les premiers cycles, les faisceaux de température augmentent sur toute la paroi. Celle-ci étant stabilisée aux conditions nuit s'échauffe sous l'effet des cycles jour-nuit. Les faisceaux d'humidité relative diminuent, conduisant à des valeurs toujours inférieures à 100%. Il n'y a pas de condensation interne dans les conditions considérées. En pression de vapeur d'eau, au début de la phase dynamique, la pression de vapeur est liée à la teneur en eau à la fin de la phase de stabilisation. Selon les conditions considérées, le faisceau est ascendant ou descendant conduisant à une humidification ou à un séchage progressif du mur au cours de l'essai.

Pour toutes les villes, les cycles se répètent à partir du troisième cycle. A chaque position, les courbes du quatrième et du cinquième cycle se superposent, avec des écarts relatifs inférieurs à 1% en température et en pression de vapeur pour Rennes, Toulouse, Strasbourg, Brest et Djerba (2% pour Kairouan). L'analyse du comportement hygrothermique de la paroi est réalisée sur la température et la pression de vapeur d'eau du dernier cycle, pour chaque ville.

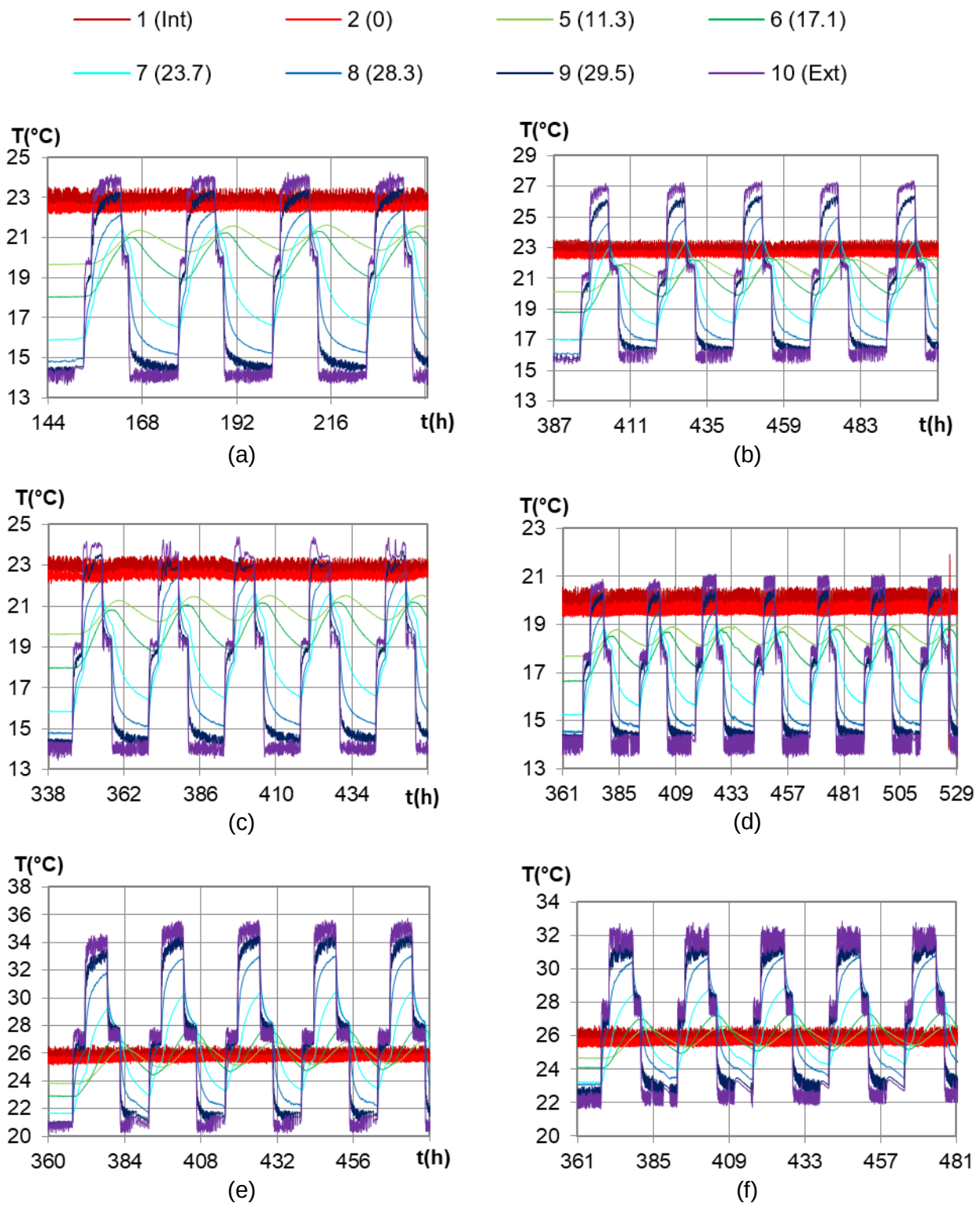


Figure III-5 : Cinétiques expérimentales de la température pendant les cycles dynamiques à plusieurs profondeurs dans le mur pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba.

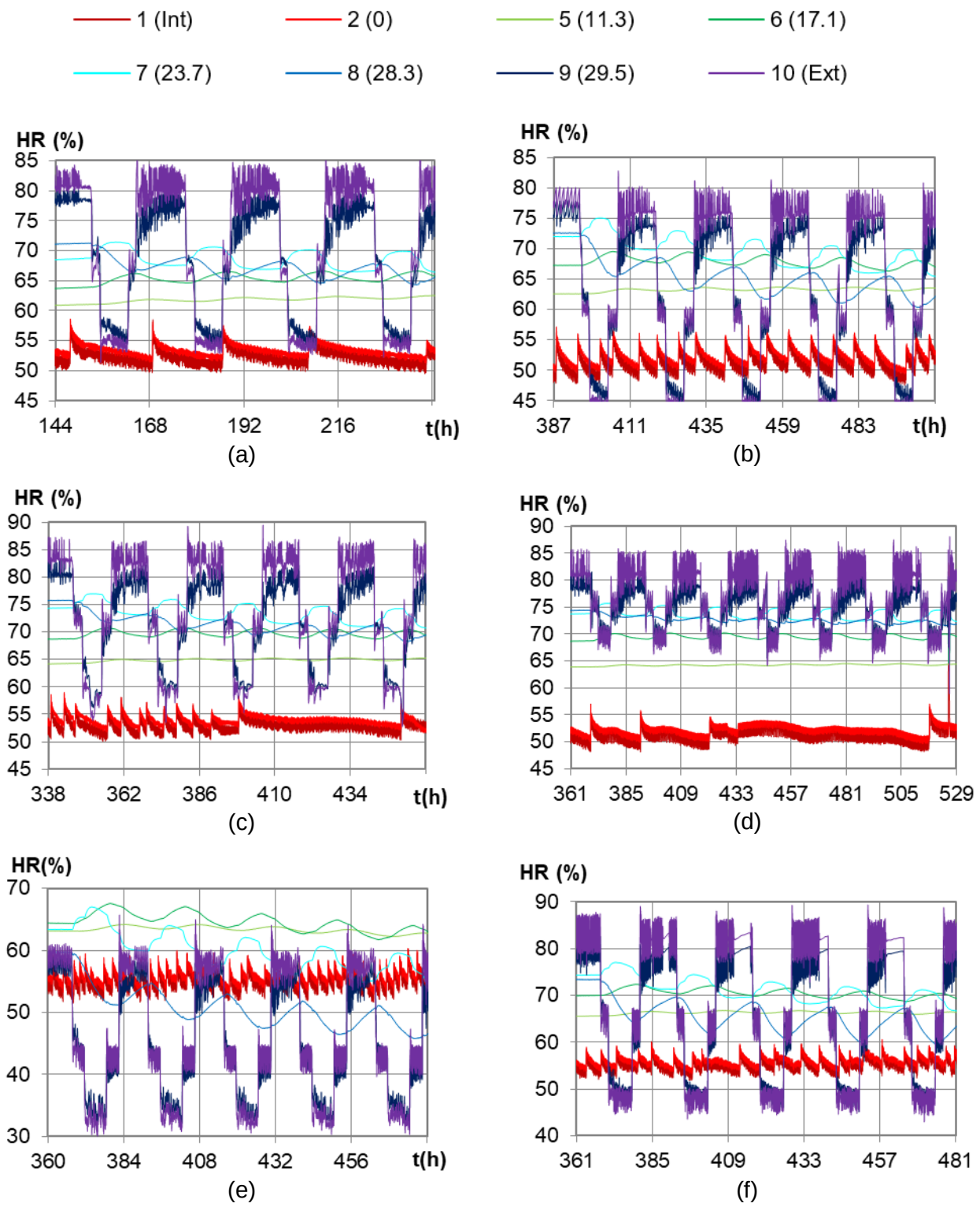


Figure III-6 : Cinétiques expérimentales de l'humidité relative pendant les cycles dynamiques à plusieurs profondeurs dans le mur pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba.

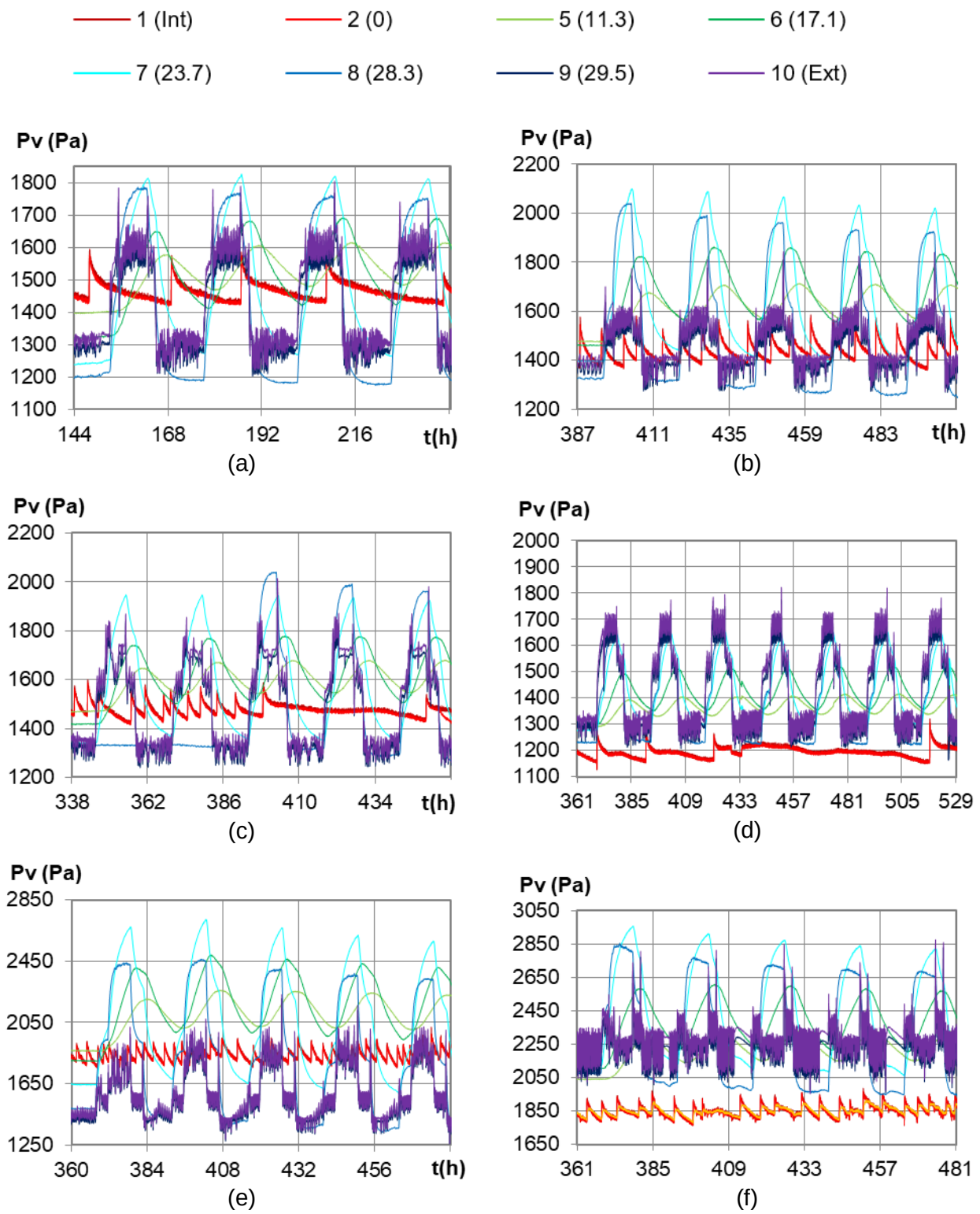


Figure III-7 : Cinétiques expérimentales de la pression de vapeur pendant les cycles dynamiques à plusieurs profondeurs dans le mur pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba.

Les résultats expérimentaux donnés dans la Figure III-8 et Figure III-9 montrent que les signaux de température et de pression de vapeur à la surface extérieure et à proximité de celle-ci présentent la même forme que le signal ambiant. En allant de l'extérieur vers l'intérieur, le signal évolue progressivement vers une sinusoïde, entre x = 23,7 cm et x = 17,1 cm, et le décalage du signal augmente.

Les Figure III-8 et Figure III-9 superposent respectivement les cinétiques numériques de température et de pression de vapeur (lignes pointillées) à différentes positions aux cinétiques expérimentales. Le signal numérique ambiant, obtenu par lissage du signal expérimental, est représentatif des conditions ambiantes et n'induit pas de retard au changement de point de consigne. Le pas de temps de 15 min choisi pour le lissage est cohérent pour réduire la fluctuation de la régulation sans impacter la réponse de la paroi.

La cinétique numérique de la température est cohérente avec les résultats expérimentaux, pour toutes les villes et à toutes les positions, sauf entre l'enduit chaux-chanvre et le composite chaux-chanvre. La courbe numérique évolue trop rapidement avec une amplitude trop élevée. Ceci peut être dû à la diffusivité thermique utilisée pour les simulations numériques car la conductivité thermique est validée avec l'étude de la phase de stabilisation.

Pour Rennes, Toulouse, Strasbourg, Brest et Kairouan, la cinétique numérique de la pression de vapeur est cohérente avec les résultats expérimentaux, sauf entre l'enduit chaux-chanvre et le composite terre chanvre. La dynamique est bien reproduite, avec une différence de pression de vapeur entre signal expérimental et numérique comprise entre 20 et 100 Pa. Cela peut être dû à l'écart de température et à la diffusivité hygrique utilisée pour les simulations. Pour Djerba, il y a plus de différence (jusqu'à 200 Pa), avec une amplitude numérique cohérente mais avec une sous-estimation de la valeur de la pression de vapeur dans le cœur du mur. En plus des facteurs identifiés pour les autres villes, ceci peut également être dû au fait que les flux de chaleur et d'humidité sont dans le même sens le jour et opposés la nuit.

Pour la température, la Figure III-10(a) donne le déphasage du signal sur l'épaisseur de la paroi par rapport à la surface extérieure. Celui-ci augmente avec la profondeur. Les résultats des différentes villes sont proches les uns des autres, comme attendu, car cela dépend des propriétés hygrothermiques de la paroi. A mi- épaisseur, le déphasage est d'environ 3 h. L'évolution sur l'épaisseur de la paroi est cohérente avec la valeur théorique : en suivant la relation donnée dans (Collet et al. 2006), avec les propriétés thermophysiques du terre chanvre, un déphasage de 12 h est obtenu pour une couche de terre chanvre de 28,8 cm. Les variations relatives des amplitudes du signal par rapport à celle en surface extérieure sont de plus en plus faibles en passant du côté extérieur au côté intérieur du mur, comme le montre la Figure III-10(b). Les résultats obtenus pour les différentes villes sont similaires. À mi-épaisseur du mur, le facteur d'amortissement est d'environ 0,2.

Pour la pression de vapeur, les déphasages sur l'épaisseur de la paroi sont similaires à ceux obtenus pour la température (Figure III-11(a)). Des amplitudes supérieures à celles de la surface extérieure sont observées dans la paroi : près du côté extérieur de la paroi pour toutes les villes, se prolongeant jusqu'à la moitié, voire les deux tiers, pour Toulouse, Kairouan. Ceci conduit à des variations d'amplitude relatives supérieures à 1 (Figure III-11(b)). Et met en évidence des phénomènes de sorption-désorption dans la paroi, amplifiés par la variation de température.

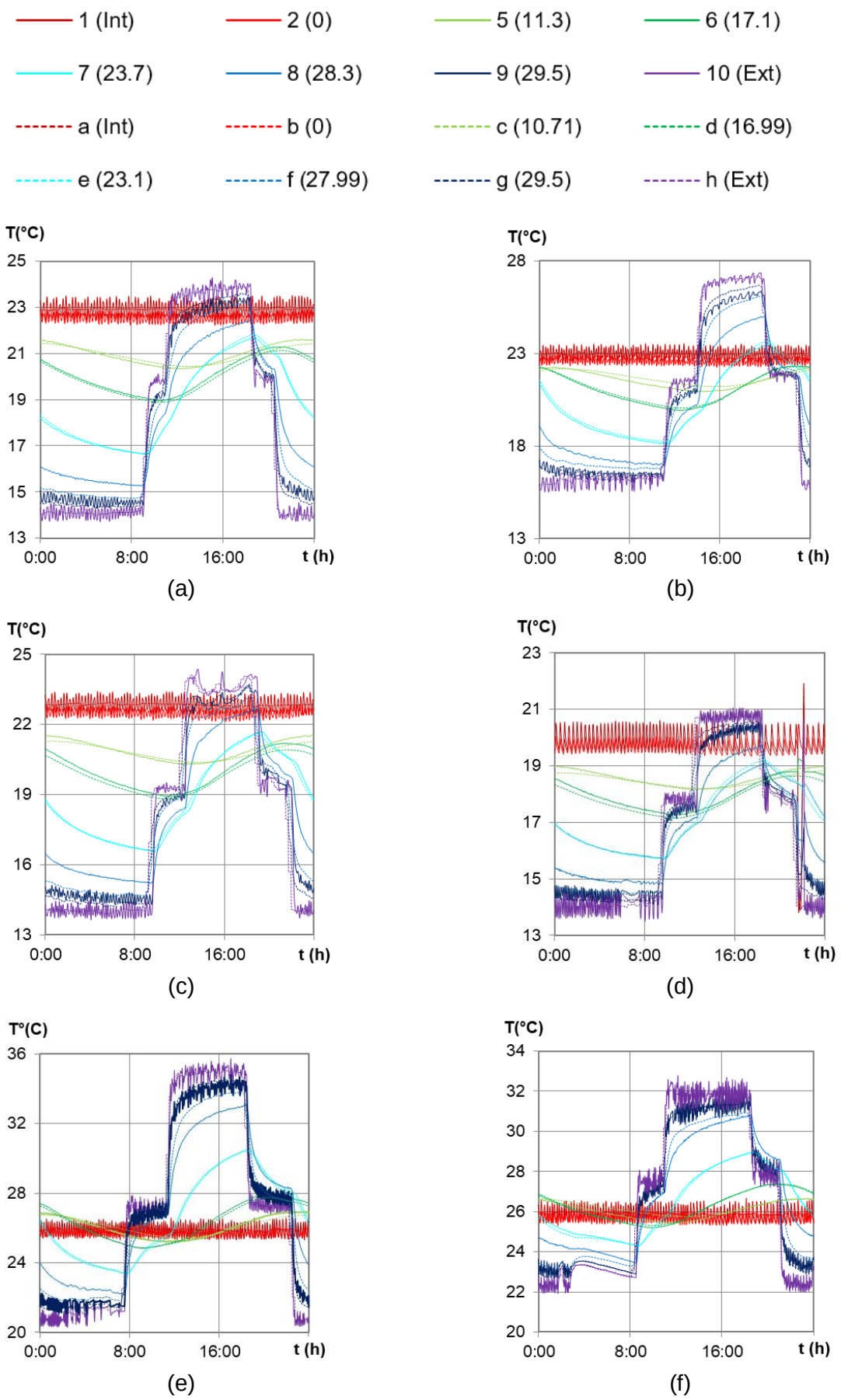


Figure III-8 : Variation de la température dans la paroi au cours du dernier cycle stabilisé pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba. Résultats expérimentaux : lignes continues ; résultats numériques : lignes pointillées.

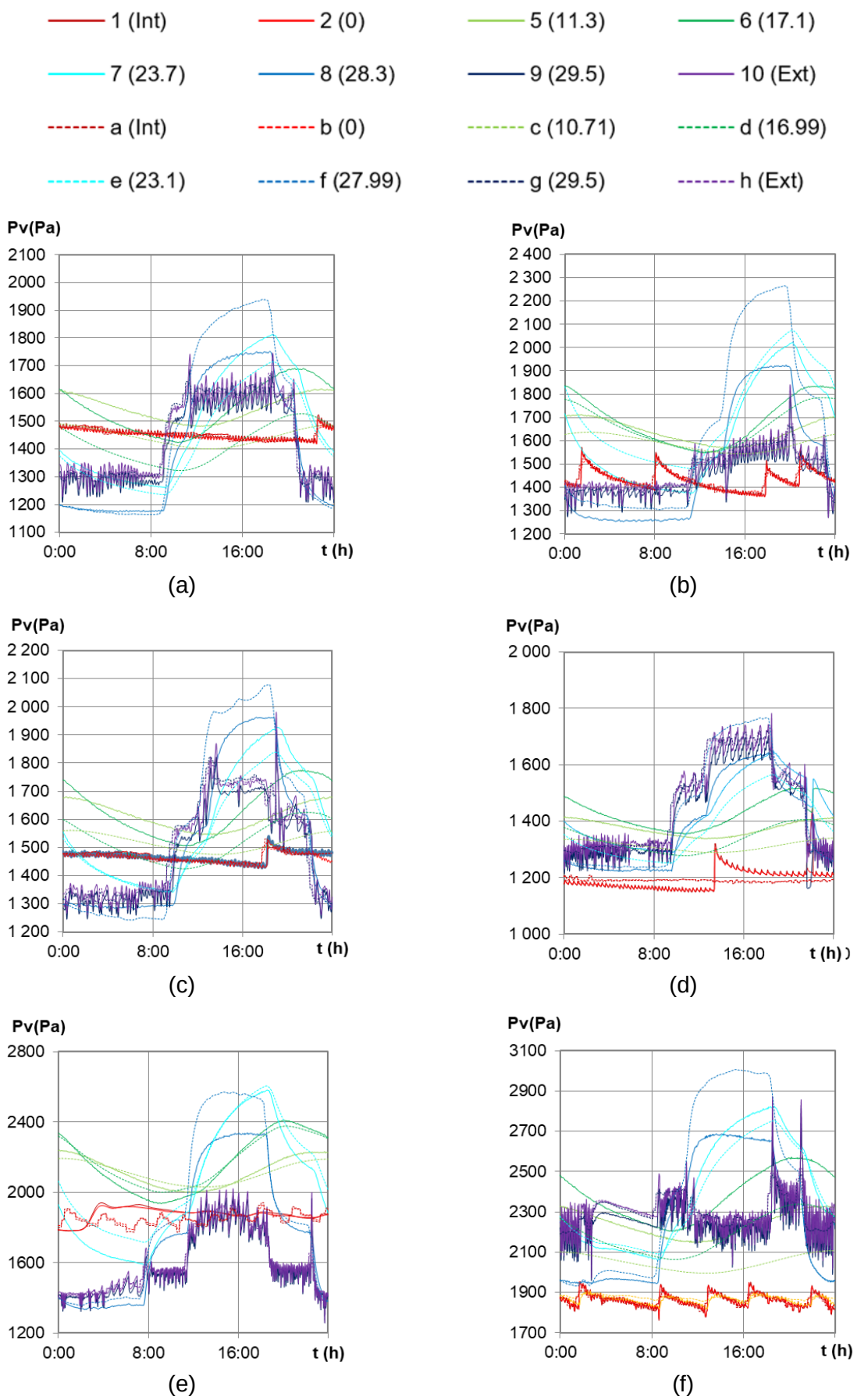


Figure III-9 : Variation de la pression de vapeur dans la paroi au cours du dernier cycle stabilisé pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba. Résultats expérimentaux : lignes continues ; résultats numériques : lignes pointillées.

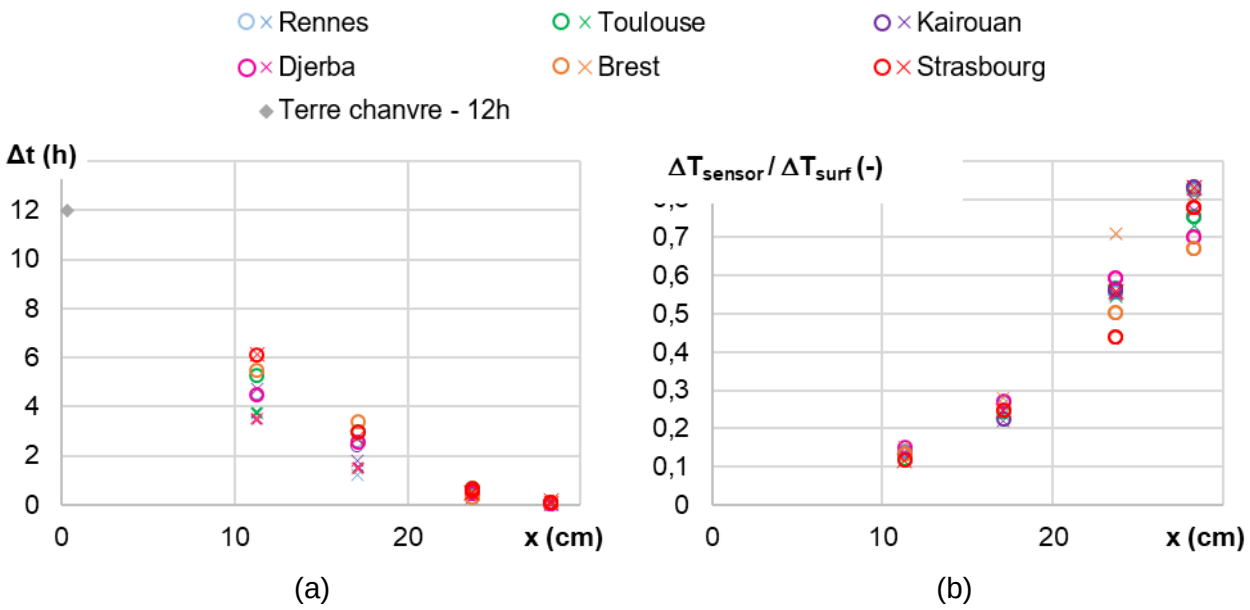


Figure III-10 : Paramètres thermiques dynamiques en fonction de l'emplacement pour toutes les villes (×/o : calculé pendant le pas de température croissant/décroissant) : (a) Déphasage de la température et valeur théorique pour une couche WFH de 28,8 cm, (b) variation relative de l'amplitude de température par rapport à l'amplitude en surface.

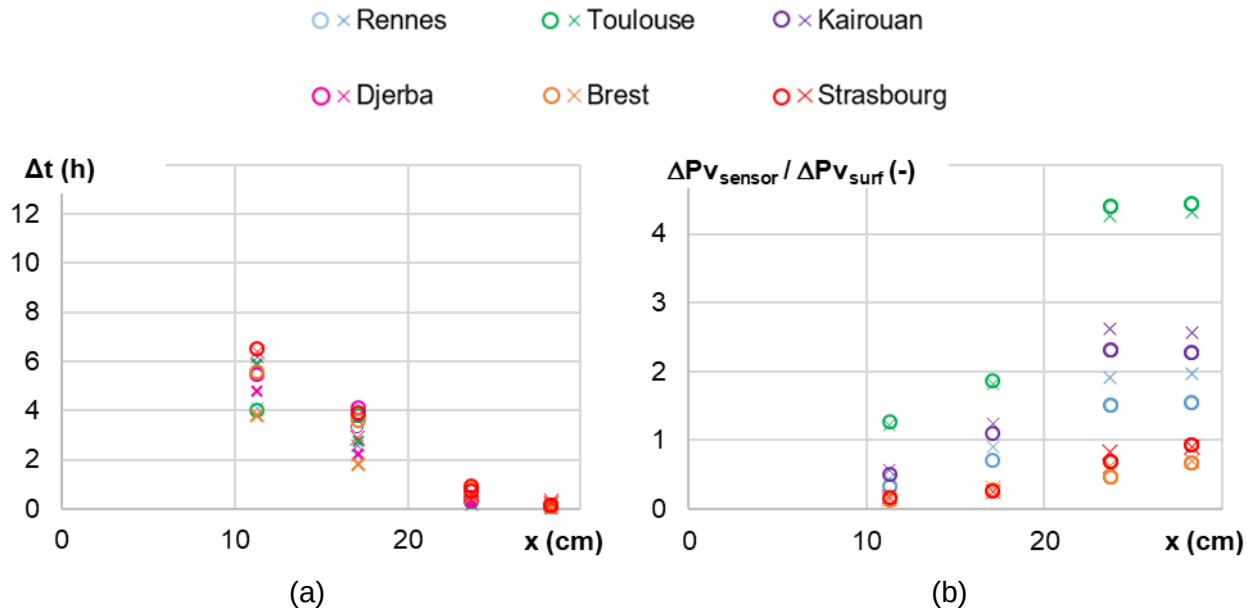


Figure III-11 : Paramètres hygriques dynamiques en fonction de l'emplacement pour toutes les villes (×/o : calculés pendant l'étape de pression de vapeur croissante/décroissante) : (a) Déphasage de la pression de vapeur, (b) variation relative de l'amplitude de pression de vapeur par rapport à l'amplitude en surface.

III.2.2 Evolution des profils au cours du dernier cycle

Les profils de température et de pression de vapeur expérimentaux et numériques sont tracés à plusieurs instants au cours du dernier cycle de l'étude dynamique sur les Figure III-12 à Figure III-15 et Figure III-16 et Figure III-17 pour les villes tunisiennes. Les profils d'humidité relative expérimentaux sont donnés en annexe A II.

Au cours de la journée, pour toutes les villes, sur la surface intérieure de la paroi, la température et la pression de vapeur sont quasi-constantes alors que sur la surface extérieure, elles évoluent en fonction du cycle jour-nuit.

Pour la température, au regard des résultats expérimentaux, les faisceaux de température montrent une faible amplitude sur le premier tiers de l'épaisseur du mur du côté intérieur. Pour les villes françaises, le gradient de température est négatif sur le premier tiers de l'épaisseur du mur du côté intérieur. Il n'y a pas d'apports de chaleur du mur vers l'ambiance intérieure lorsque l'ensoleillement n'est pas pris en compte. Pour les villes tunisiennes, les gradients de température sur le premier tiers de l'épaisseur de la paroi sont faibles et s'inversent pendant la journée, avec un gradient négatif pendant la journée et une inversion pendant la nuit. Ceci induit de légers apports retardés la nuit et des pertes le jour à travers la surface intérieure du mur. Sur la face extérieure du mur, la diminution de la température la nuit est plus prononcée pour les villes françaises en raison des nuits fraîches, l'augmentation de la température pendant la journée est plus importante pour les villes tunisiennes car le climat est plus chaud. Les gradients de température sur la surface extérieure du mur évoluent sensiblement en amplitude et en direction au cours de la journée, suivant la sollicitation de l'ambiance extérieure. Le transfert de chaleur sur la face extérieure conduit à un stockage/déstockage avec une augmentation/diminution rapide de la température dans les couches extérieures, puis différée sur l'épaisseur du mur. Enfin, les deux tiers de l'épaisseur de la paroi du côté extérieur sont actifs et contribuent à limiter, voire à éviter, les apports de chaleur du côté intérieur. En ce qui concerne les résultats numériques, les profils sont très cohérents avec les profils expérimentaux. Comme les signaux de sollicitation sont lissés pour être introduits dans la simulation numérique, l'amplitude numérique du faisceau de température est légèrement inférieure à l'amplitude expérimentale sur la face intérieure du mur. Sur les deux tiers de l'épaisseur de la paroi du côté extérieur, le faisceau de température numérique rejoint le faisceau expérimental.

Pour la pression de vapeur, en ce qui concerne les résultats expérimentaux, le profil de pression de vapeur montre un faisceau de faible amplitude augmentant tout au long du cycle sur le premier tiers de l'épaisseur du mur du côté intérieur. Cela induit un léger flux de la paroi vers l'ambiance intérieure. Il est observé pour toutes les villes, avec une valeur plus importante pour les villes tunisiennes que pour les villes françaises. Du côté extérieur de la paroi, on observe une amplitude de pression de vapeur plus élevée, liée aux sollicitations ambiantes. Le gradient de pression de vapeur près du côté extérieur de la paroi s'inverse au cours du cycle journalier. A la fin de la nuit, avant le changement de consigne, une valeur minimale de pression de vapeur est observée entre l'enduit extérieur chaux-chanvre et le terre-chanvre et une valeur maximale à mi-épaisseur. Le flux d'humidité provient à la fois de la partie intérieure du mur et du côté extérieur. Tout au long de la journée, la pression de vapeur augmente sur la partie extérieure du mur et la valeur inférieure se déplace vers l'intérieur du mur. Ensuite, la pression de vapeur continue d'augmenter dans la partie extérieure du mur. Cela conduit à un pic entre l'enduit et le terre-chanvre, qui se déplace vers la partie intérieure de la paroi au cours de la journée avance. Comme le souligne l'étude de la cinétique, la pression de vapeur atteint des valeurs supérieures à celles de l'ambiance. Elles sont induites par l'augmentation de la température, et mettent en évidence des phénomènes de désorption qui provoquent des flux d'humidité dans la paroi et à travers la surface extérieure. Le lissage des signaux de température et d'humidité relative ambiantes induit des variations numériques de pression de vapeur légèrement inférieures aux valeurs expérimentales sur les surfaces, ce qui est particulièrement sensible du côté intérieur. Pour toutes les villes, les profils numériques sur le mur ont la même tendance que les profils expérimentaux. Cependant, les pics de pression de vapeur élevés/bas induits par les phénomènes de désorption/sorption sont plus fins et plus proches de la surface extérieure que les pics expérimentaux. Ils induisent un gradient de pression de vapeur plus élevé vers le point de désorption/sorption. La sur- estimation et la sous-estimation des pressions de vapeur peut être expliquée par le fait que WUFI Pro ne prend pas en compte les phénomènes d'hystérésis ni les effets de cinétique. L'amplitude numérique de la pression de vapeur se propage moins dans l'épaisseur de la paroi que l'amplitude expérimentale. Comme indiqué pour la phase de stabilisation, la diffusion de la vapeur semble sous-estimée. Enfin, l'amplitude de la pression de vapeur est surestimée dans la troisième partie de l'épaisseur de la paroi du côté extérieur alors qu'elle est sous-estimée ailleurs.

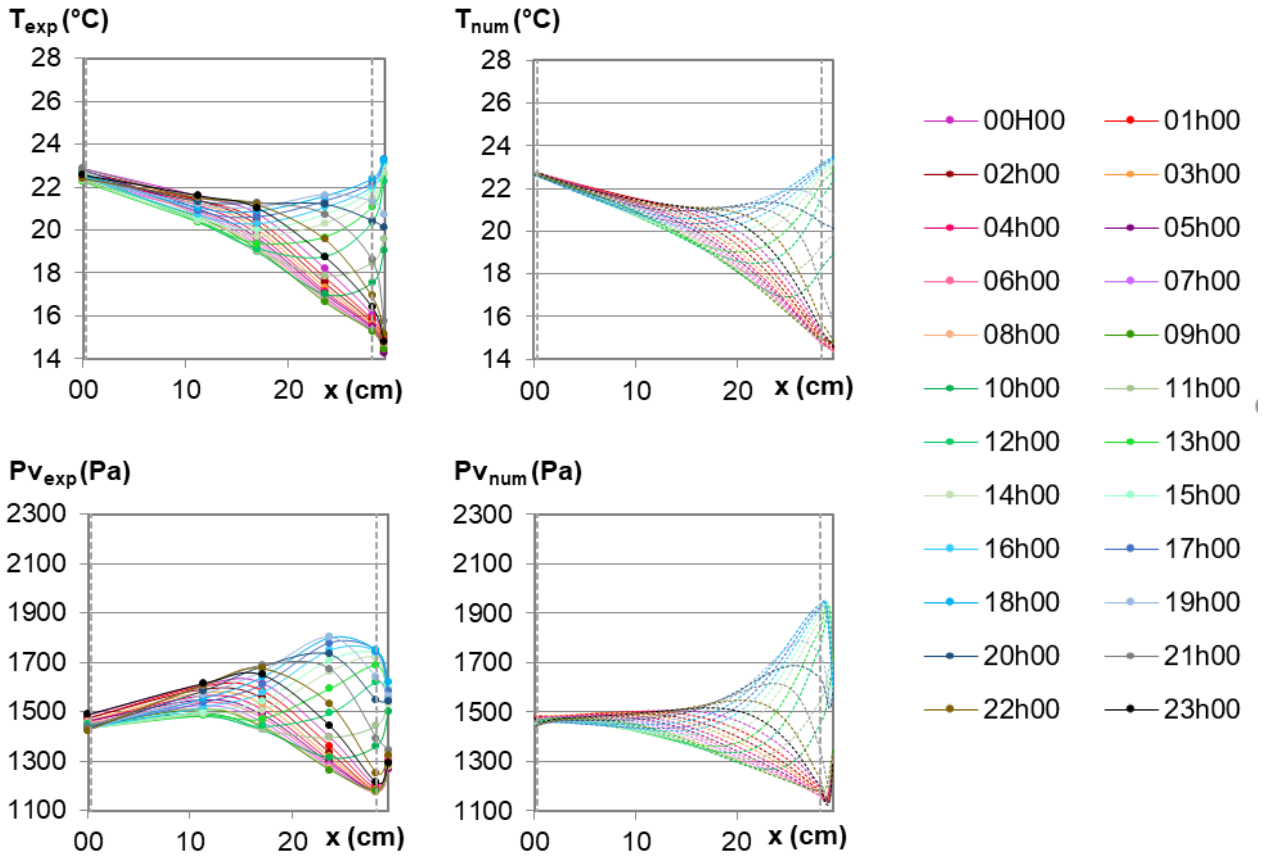


Figure III-12 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Rennes. Gauche : valeurs expérimentales ; droite : valeurs numériques.

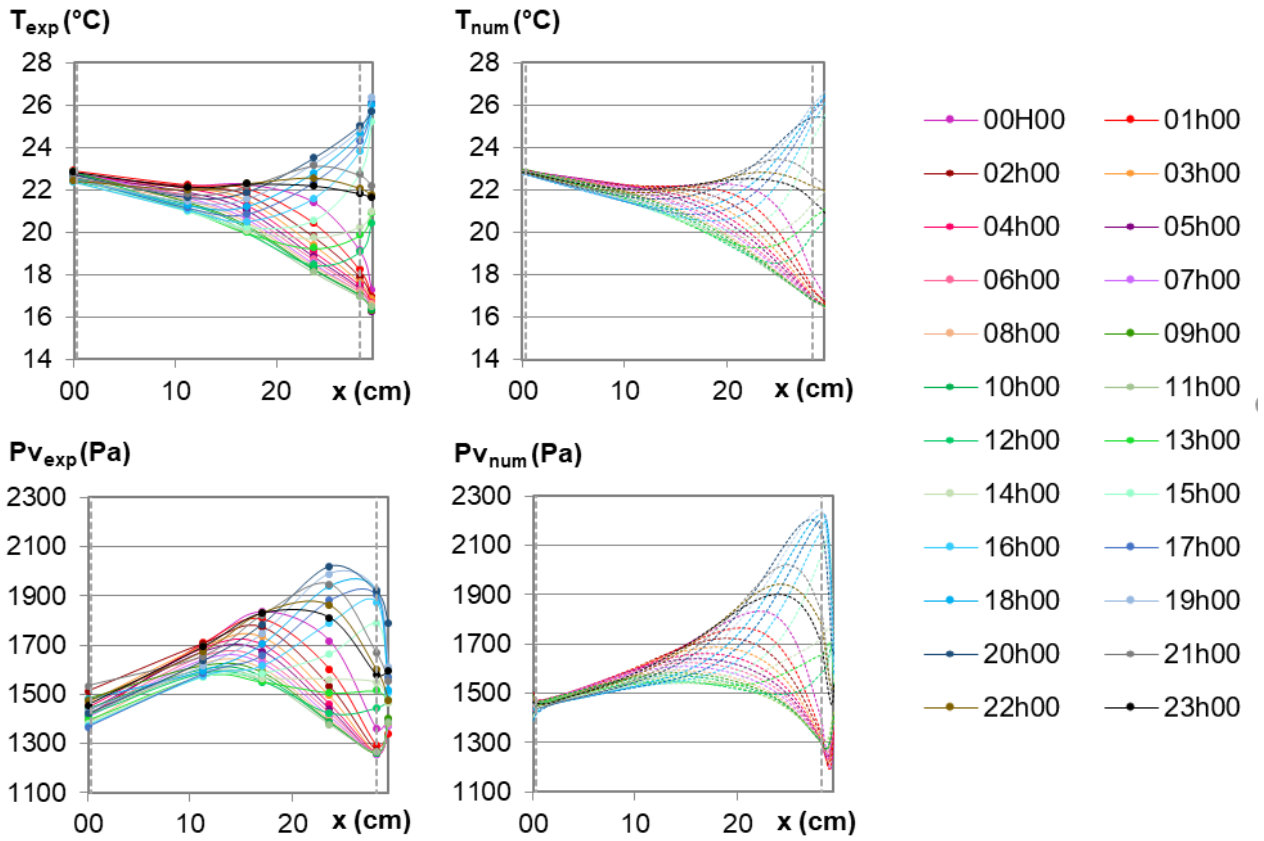


Figure III-13 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Toulouse. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques.

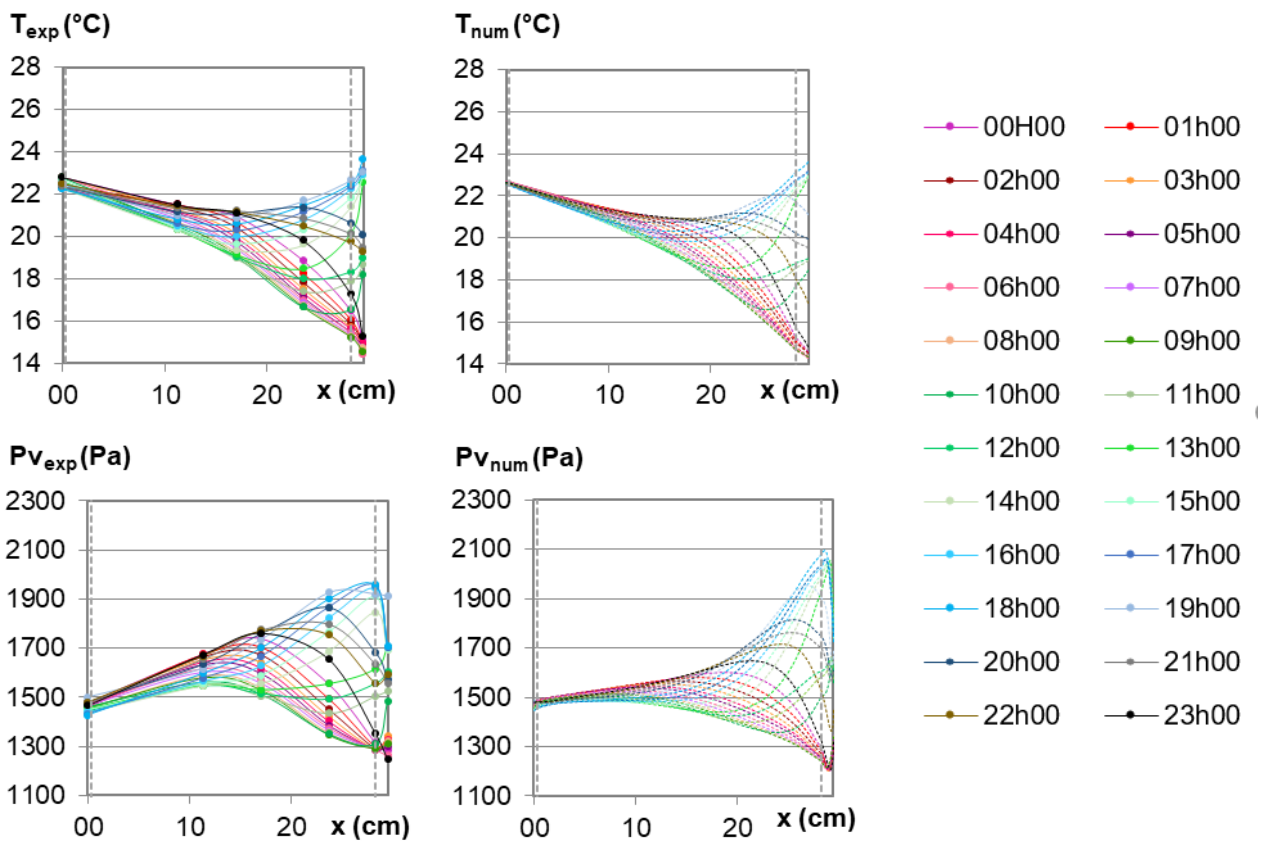


Figure III-14 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Strasbourg. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques.

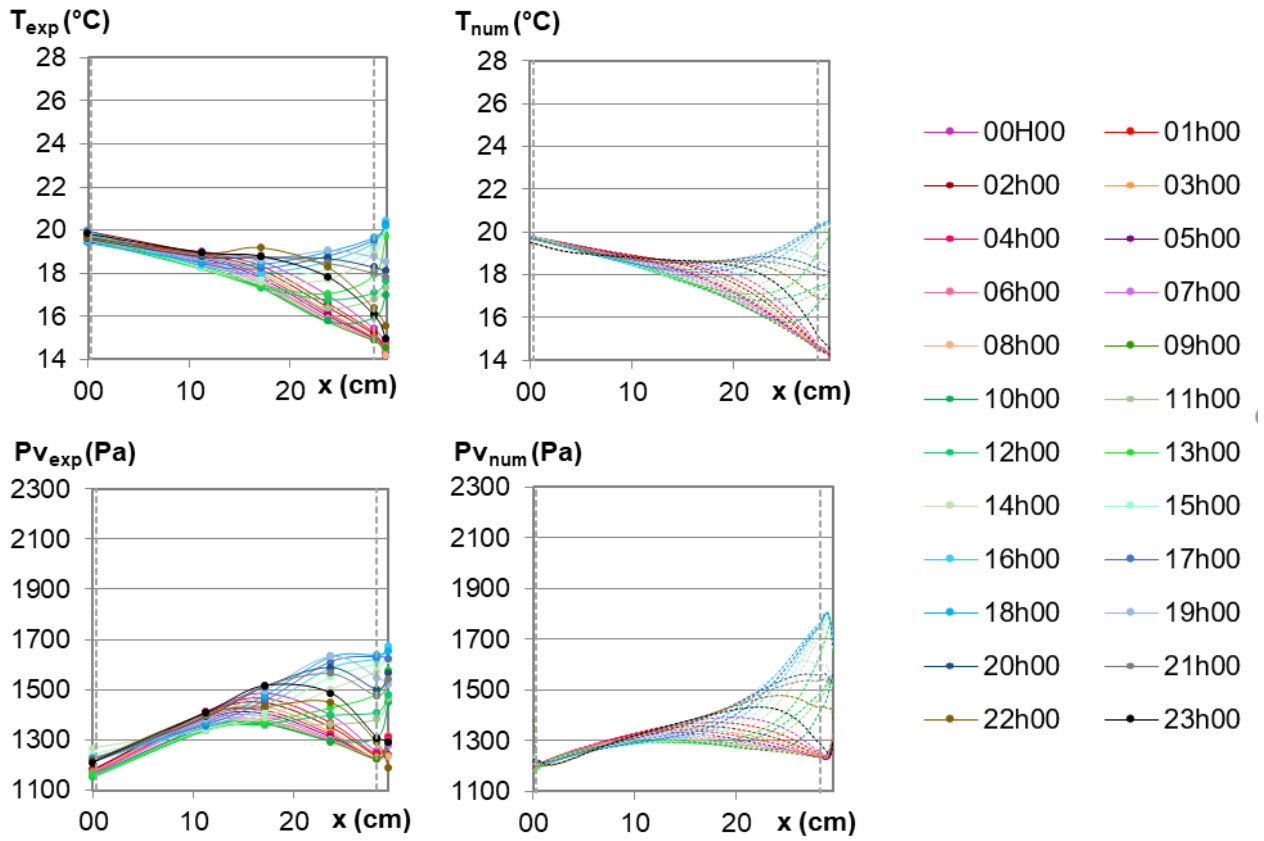


Figure III-15 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Brest. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques.

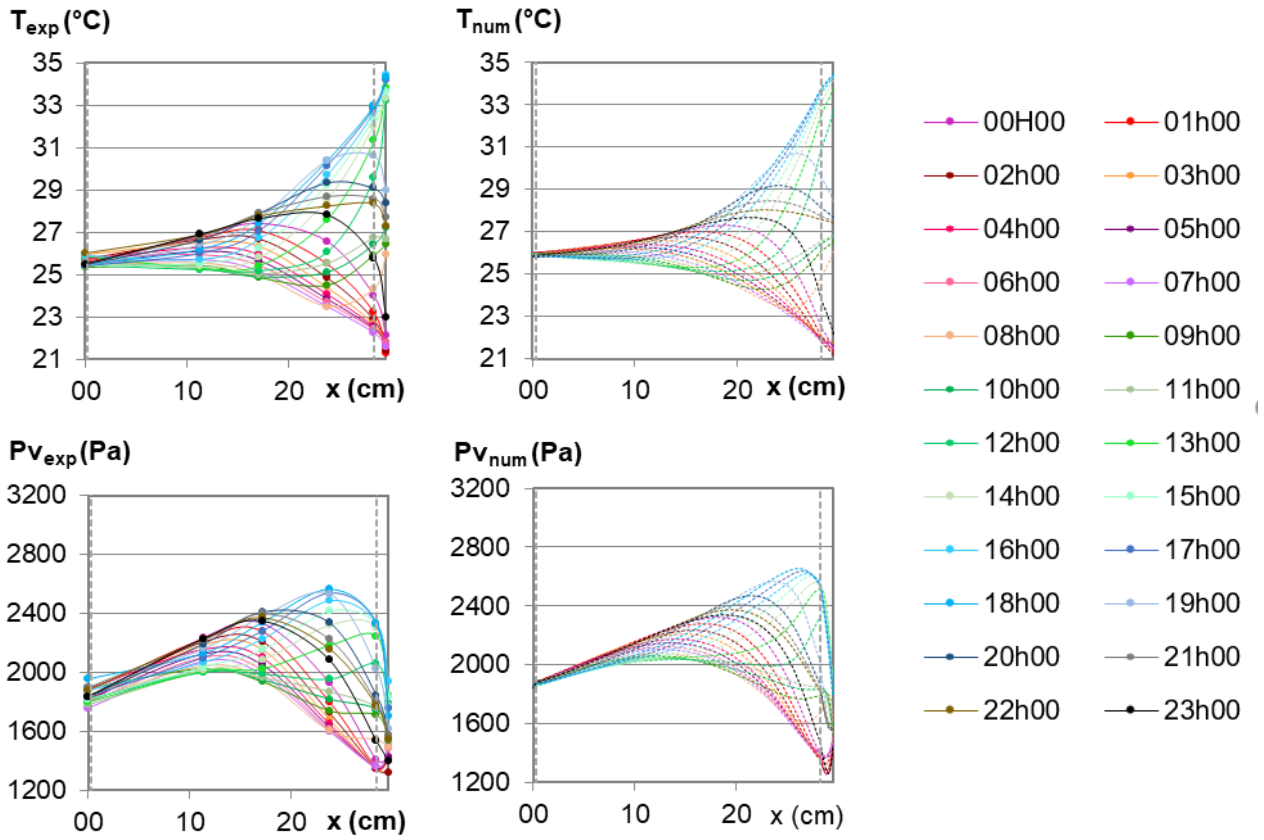


Figure III-16 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Kairouan. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques.

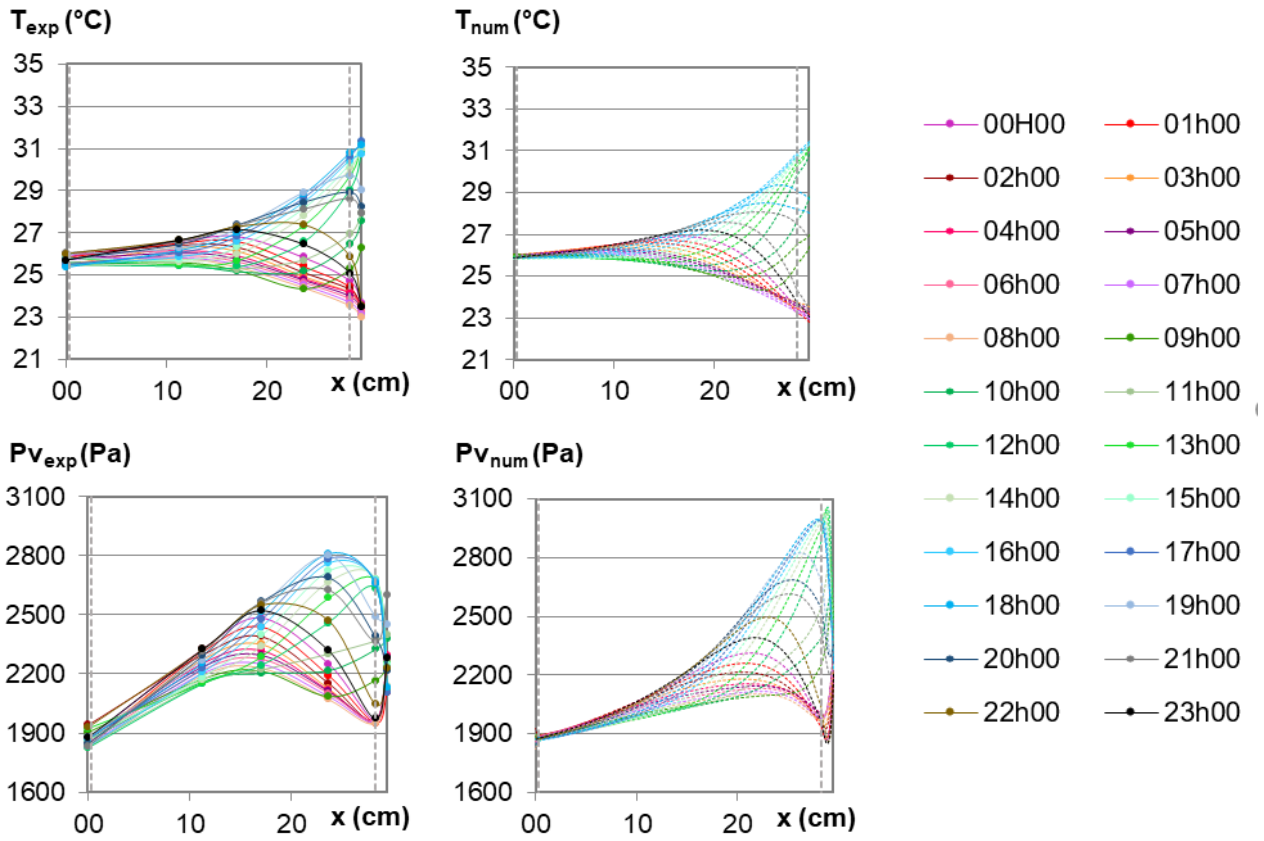


Figure III-17 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour le climat de Djerba. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques.

III.2.3 Flux de chaleur et d'humidité pendant les variations cycliques quotidiennes

La Figure III-18 donne la variation des flux de chaleur sur les surfaces intérieures et extérieures du mur sous les variations cycliques quotidiennes pour toutes les villes. Les résultats expérimentaux et numériques montrent les mêmes tendances pour toutes les villes.

Le flux de chaleur est positif lorsque la chaleur circule du côté intérieur vers le côté extérieur. Comme pour la température et la pression de vapeur, le flux de chaleur a une évolution cyclique qui se répète en suivant l'évolution de l'ambiance. Sur la surface intérieure, le flux de chaleur est très faible du fait d'une consigne constante et d'un flux non traversant comme indiqué lors des profils. Sur la surface extérieure, le flux de chaleur est induit par la variation de la température extérieure, avec un pic de flux de chaleur lors du changement de consigne, jusqu'à 20 W/m² pour Brest, 30 W/m² pour Rennes, Toulouse, Strasbourg et Djerba et 40 W/m² pour Kairouan. A la fin du palier haut du cycle journalier, le flux thermique est d'environ -5 W/m² pour Rennes, Strasbourg et Brest, -9 W/m² pour Toulouse, -10 W/m² pour Djerba et -12 W/m² pour Kairouan, en accord avec les gradients de température.

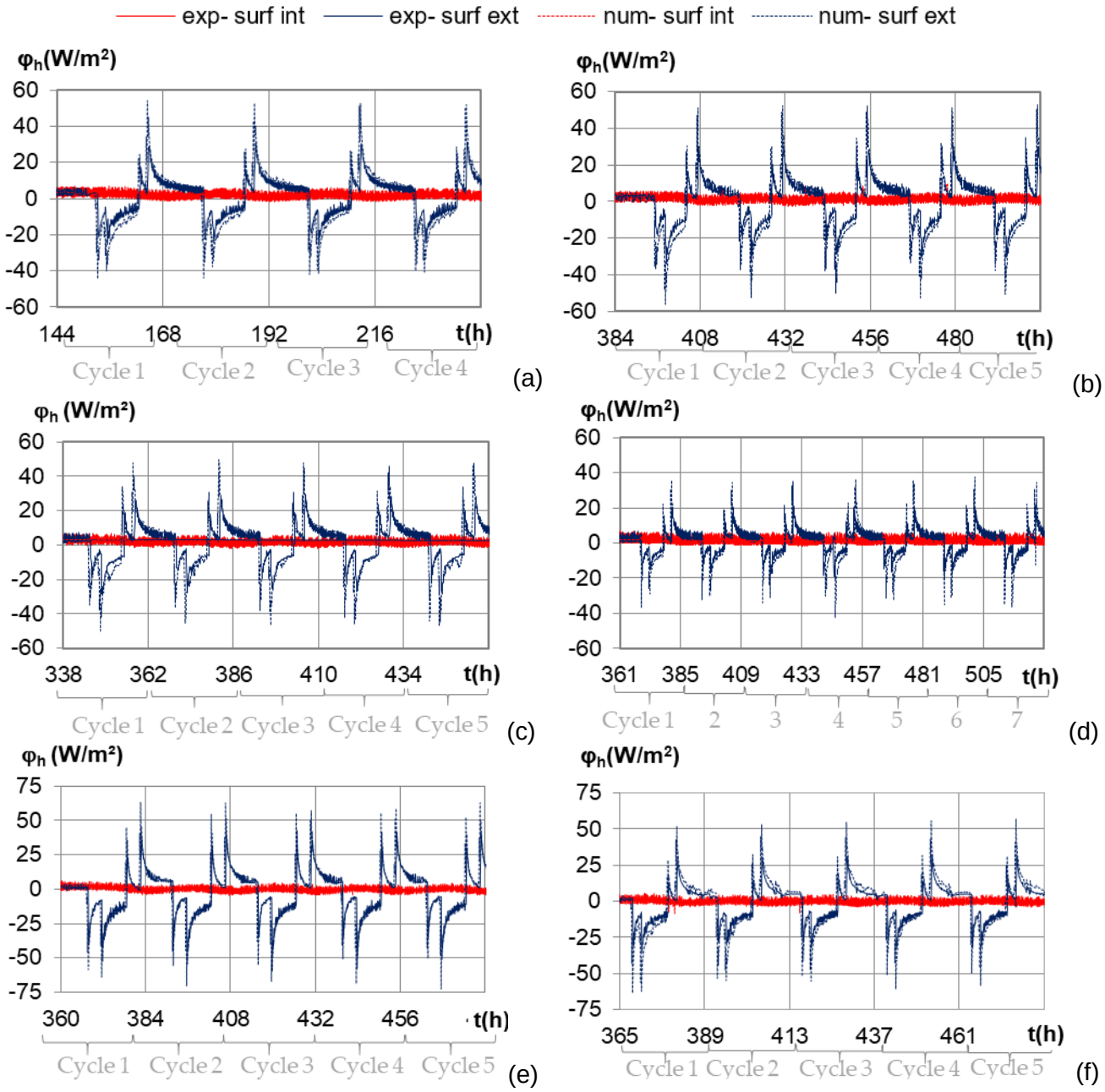


Figure III-18 : Flux de chaleur expérimentaux et numériques sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba.

La Figure III-19 montre les résultats numériques obtenus pour les flux d'humidité pour toutes les villes. Le flux d'humidité est positif lorsque l'humidité passe du côté intérieur au côté extérieur. Comme précédemment, le flux d'humidité se répète au cours des cycles. Le flux d'humidité présente des fluctuations plus importantes que les flux de chaleur car la pression de vapeur ambiante fluctue plus que la température ambiante. La pression de vapeur en ambiance extérieure est supérieure à celle de l'ambiance intérieure le jour pour toutes les villes. Le gradient de pression de vapeur entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure s'inverse entre le jour et la nuit pour Kairouan, il reste dans le même sens pour Djerba et il est quasi nul la nuit pour les autres villes. Sur la surface intérieure, le flux de d'humidité est proche de zéro. Sur la surface extérieure, le flux d'humidité présente des cycles journaliers avec des valeurs plus faibles la nuit que le jour. Le flux d'humidité présente un pic lors du changement de consigne, avec une intensité allant jusqu'à 2.10^{-6} kg/(m².s) pour Brest, 3.10^{-6} kg/(m².s) pour Kairouan et Rennes, 4.10^{-6} kg/(m².s) pour Strasbourg, 5.10^{-6} kg/(m².s) pour Toulouse et 8.10^{-6} kg/(m².s) pour Djerba. Les flux d'humidité entrants/sortants ne sont pas seulement dus au gradient de pression de vapeur ambiant mais aussi à des effets de sorption-désorption au voisinage de la surface extérieure renforcés par la variation de température sur le mur.

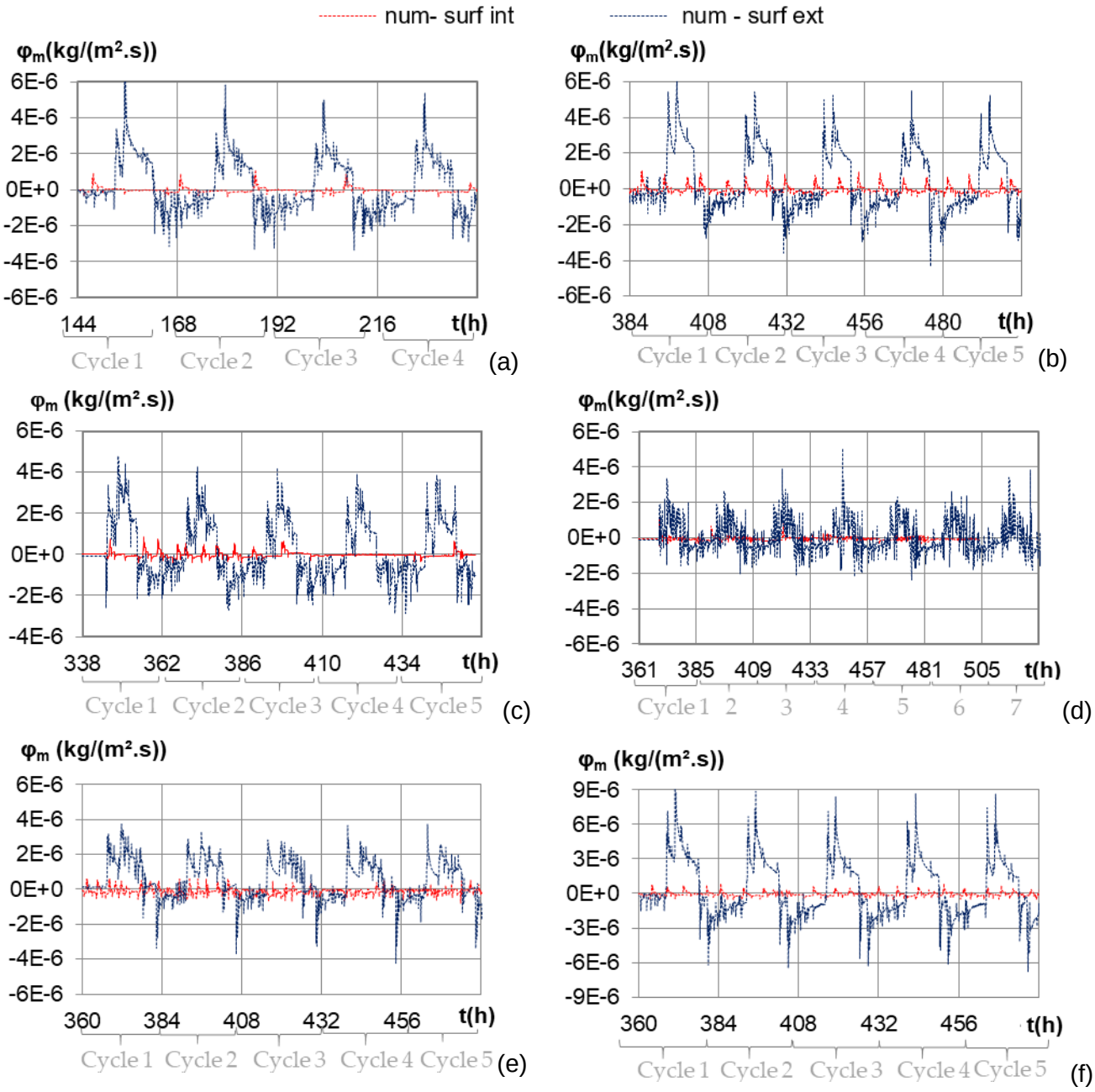


Figure III-19 : Flux d'humidité numériques sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers pour le climat de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan, (f) Djerba.

III.2.4 Stockage et déstockage de la chaleur et de l'humidité pendant les variations cycliques quotidiennes

La Figure III-20 présente la chaleur entrante et sortante calculée en intégrant les flux expérimentaux et numériques en fonction du temps pendant le dernier cycle sur chaque surface de la paroi ainsi que le total des deux surfaces.

Pour les résultats expérimentaux, pour toutes les villes, les chaleurs entrantes et sortantes sur la surface intérieure sont faibles, en lien avec le profil de température qui présente un faible gradient de température sur les dix premiers centimètres. Sur la surface extérieure, la chaleur entrante et sortante est plus importante que sur la surface intérieure, car elle est soumise aux sollicitations correspondant aux variations de températures d'un climat estival.

Pour les villes françaises, pour les ambiances intérieures considérées (20° à Brest et 23°C dans les autres villes), les flux conduisent à un apport de chaleur dans la paroi en surface intérieure. Comme vu précédemment, le flux de chaleur provenant du côté extérieur du mur n'atteint pas le côté intérieur. Sur la surface extérieure, la chaleur sortante est supérieure à la chaleur entrante en raison des nuits froides. Ainsi, la chaleur stockée pendant la journée est totalement restituée la nuit au niveau de la surface extérieure. Le bilan sur la paroi conduit à des valeurs légèrement supérieures en gain qu'en perte.

Pour les climats de Kairouan et Djerba, sur la surface intérieure, on observe une faible chaleur entrante et sortante. Sur la surface extérieure, la chaleur entrante est supérieure à la chaleur sortante. Finalement, le bilan thermique du mur est positif et induit un stockage de la chaleur conduisant à une élévation de la température du mur.

Les résultats numériques présentent les mêmes tendances que les résultats expérimentaux. En surface intérieure, les valeurs numériques sont proches des valeurs expérimentales pour les villes françaises et les sous-estiment légèrement pour les villes tunisiennes. En surface extérieure, les résultats numériques surestiment les valeurs expérimentales pour toutes les villes de 14% pour Kairouan et jusqu'à 59% pour Rennes. Cependant, l'écart entre chaleur entrante et chaleur sortante issu des résultats numériques est comparable à celui obtenu expérimentalement. Par conséquent, les chaleurs totales entrantes et sortantes sont numériquement surestimées. Cependant, les bilans thermiques numériques entre les chaleurs entrantes et sortantes sont du même ordre que les valeurs expérimentales, avec des valeurs allant de 3 Wh/m² pour Rennes à 30 Wh/m² pour Kairouan, à l'exception de Brest où il est proche de 0 en numérique et légèrement positif en expérimental.

La Figure III-20 donne l'humidité entrante et sortante calculée en intégrant les flux numériques en fonction du temps sur chaque surface du mur et le total des deux surfaces.

Sur la surface intérieure du mur, l'humidité entrante et sortante est très faible pour toutes les villes, avec des valeurs entrantes allant de 1 à 5 g/m², des valeurs sortantes allant de 4 à 11 g/m² et des écarts entrantes/sortantes entre 1,6 et 7,4 g/m². Ceci est lié à la régulation de l'ambiance intérieure à température et humidité relative constantes et aux faibles gradients observés dans le mur

Sur la surface extérieure, l'humidité entrante et sortante est beaucoup plus importante au cours du cycle que celle de la surface intérieure. En outre, l'humidité sortante est plus importante que l'humidité entrante pour toutes les villes hormis Brest et Rennes où elle est équivalente. Brest et Kairouan présentent l'humidité entrante la plus faible (24 g/m²), Rennes, Strasbourg et Toulouse présentent des valeurs intermédiaires (environ 50 g/m²) et Djerba la plus élevée (85 g/m²). L'humidité sortante est la plus faible pour Brest (26 g/m²), similaire pour Rennes, Toulouse et Kairouan (53 à 65 g/m²) et beaucoup plus élevée pour Strasbourg (80 g/m²) et Djerba (93 g/m²). Les écarts entre humidité entrante et sortante en surface extérieure sont quasi-nuls pour Brest et Rennes, faibles pour Djerba et Toulouse (0,8 et 1,8 g/m²) et plus élevés pour Kairouan et Strasbourg (2,9 et 3,3 g/m²).

Enfin, le bilan d'humidité est quasi nul pour Brest, et négatif pour toutes les villes, le plus important pour Kairouan et Strasbourg. Ce bilan explique la tendance décroissante observée sur les cinétiques de pression de vapeur.

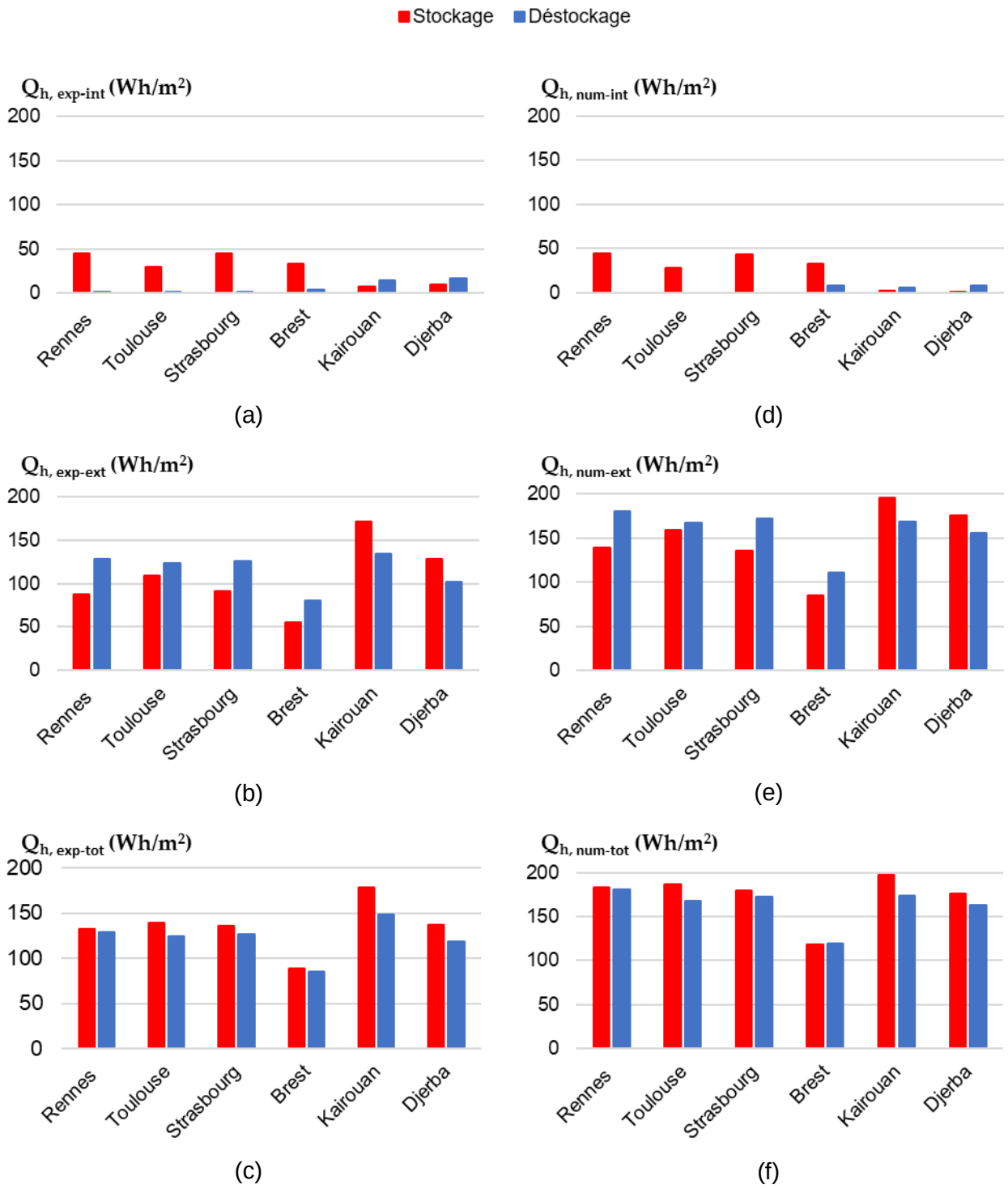


Figure III-20 : Chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle : (a, b, c) résultats expérimentaux, (a) surface intérieure, (b) surface extérieure, (c) total des deux surfaces, (d, e, f) résultats numériques, (d) surface intérieure, (e) surface extérieure, (f) total des deux surfaces.

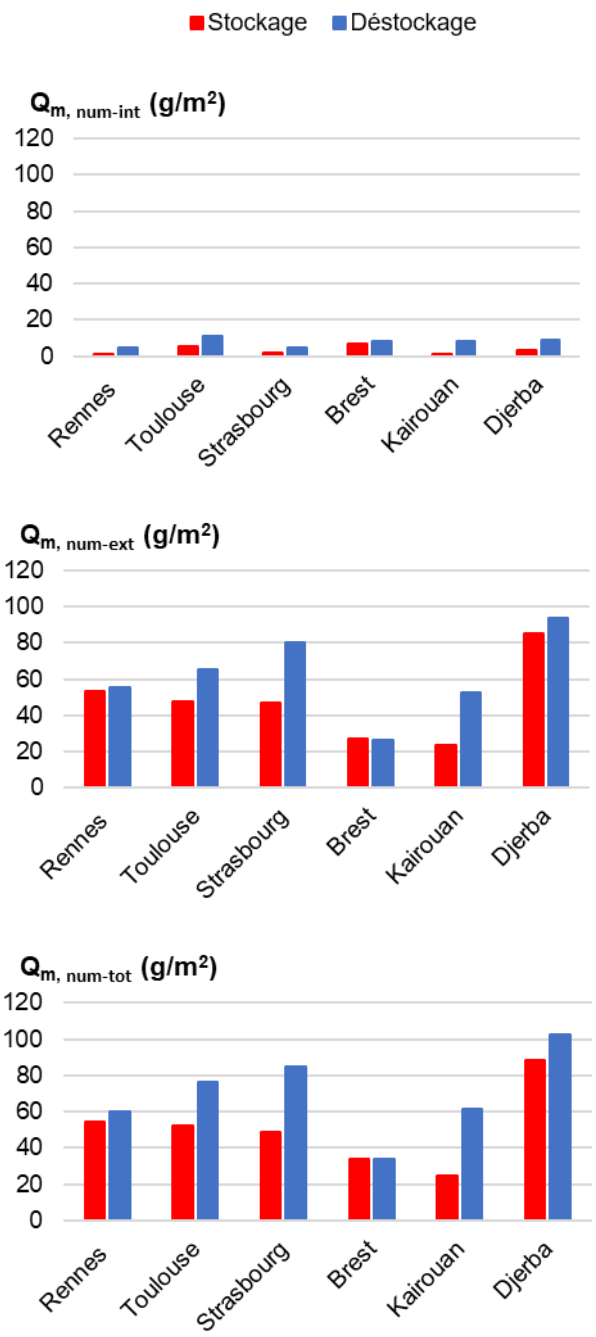


Figure III-21 : Humidité numérique entrante et sortante pendant le dernier cycle sur chaque surface du mur et total des deux surfaces.

III.3 Paroi terre chanvre sous sollicitations cycliques avec ensoleillement

Après l'étude sous sollicitations cycliques sans ensoleillement considérant uniquement la variation de la température ambiante extérieure, l'effet de l'ensoleillement est considéré en déterminant une température équivalente appliquée en ambiance extérieure pour les climats de Rennes et Brest. Les résultats sont analysés selon la même méthodologie que précédemment.

III.3.1 Résultats cinétiques

La Figure III-22 donne les résultats expérimentaux pour le climat de Rennes et le climat de Brest. Elle montre la cinétique de la température, de l'humidité relative et de la pression de vapeur à plusieurs positions : conditions ambiantes, surfaces d'échange et différentes profondeurs dans le mur.

Les conditions ambiantes intérieures et extérieures sont en bon accord avec les points de consigne. Pour les conditions jour, les températures ambiantes extérieures sont supérieures d'environ 10°C à celles lors des conditions sans ensoleillement alors que les conditions nuit restent les mêmes. L'ajustement de l'humidité relative permet d'obtenir les mêmes pressions de vapeurs que celles considérées sans ensoleillement. Comme pour les essais précédents, il y a de faibles fluctuations induites par la régulation et lors du changement de point de consigne, la fluctuation de l'humidité relative est amplifiée par la variation de température, ce qui entraîne un pic de pression de vapeur d'environ 15 minutes.

Pendant les premiers cycles, les faisceaux de température augmentent, la paroi s'échauffe sur toute son épaisseur en lien avec la sollicitation. Les températures au sein de la paroi sont plus élevées sur les moyennes cycliques que lors des sollicitations sans prise en compte de l'ensoleillement.

Pour les pressions de vapeur, les niveaux sont plus élevés que ceux observés lors des sollicitations sans ensoleillement, avec des amplitudes de variation plus élevées. En outre, de façon générale, les pressions de vapeur au sein de la paroi sont plus élevées que celles en ambiance. Les faisceaux de pression de vapeur évoluent différemment selon la position dans le mur. Au cœur de la paroi, ils sont croissants, montrant une redistribution de l'humidité alors qu'à proximité de la surface extérieure, les faisceaux sont décroissants du fait à la fois de la redistribution de l'humidité et d'un séchage vers l'extérieur.

Les deux cycles du quatrième et du cinquième jour se superposent, avec des écarts relatifs inférieurs à 1% en température et en pression de vapeur pour les deux villes. L'étude du régime dynamique est réalisée sur le dernier cycle présenté Figure III-23 et Figure III-24.

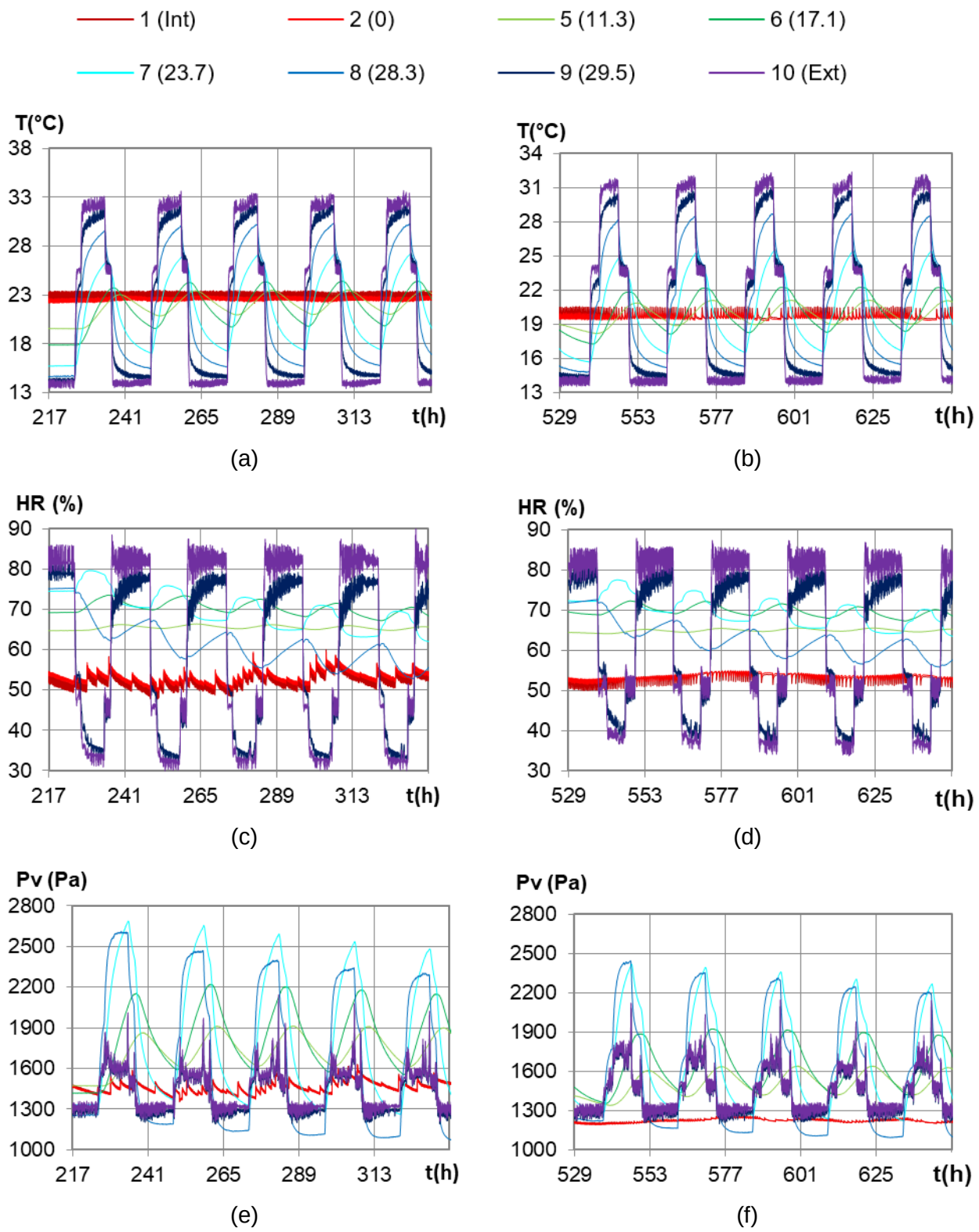


Figure III-22 : Cinétique expérimentale de la (a, b) température, (c, d) humidité relative, (e, f) pression de vapeur à plusieurs profondeurs dans le mur, pendant les cycles dynamiques, pour le climat avec ensoleillement de : (a, c, e) Rennes, (b, d, f) Brest.

Les résultats expérimentaux donnés montrent que les signaux de température et de pression de vapeur à la surface extérieure et à proximité de celle-ci présentent la même forme que le signal ambiant. En allant de l'extérieur vers l'intérieur, le signal évolue progressivement vers une sinusoïde, entre x = 23,7 cm et x = 17,1 cm, et le décalage du signal augmente.

La cinétique numérique de la température est cohérente entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques, pour les deux villes et à toutes les positions, sauf entre l'enduit chaux-chanvre et le composite terre-chanvre comme précédemment.

La cinétique numérique de la pression de vapeur est cohérente avec les résultats expérimentaux, sauf entre l'enduit chaux-chanvre et le composite terre chanvre. Comme pour l'étude sans soleil, la dynamique est bien reproduite mais les résultats numériques sous-estiment toujours les résultats expérimentaux, avec un écart de l'ordre de 10 à 100 Pa au cœur du mur pour Brest et de 100 à 240 Pa pour Rennes.

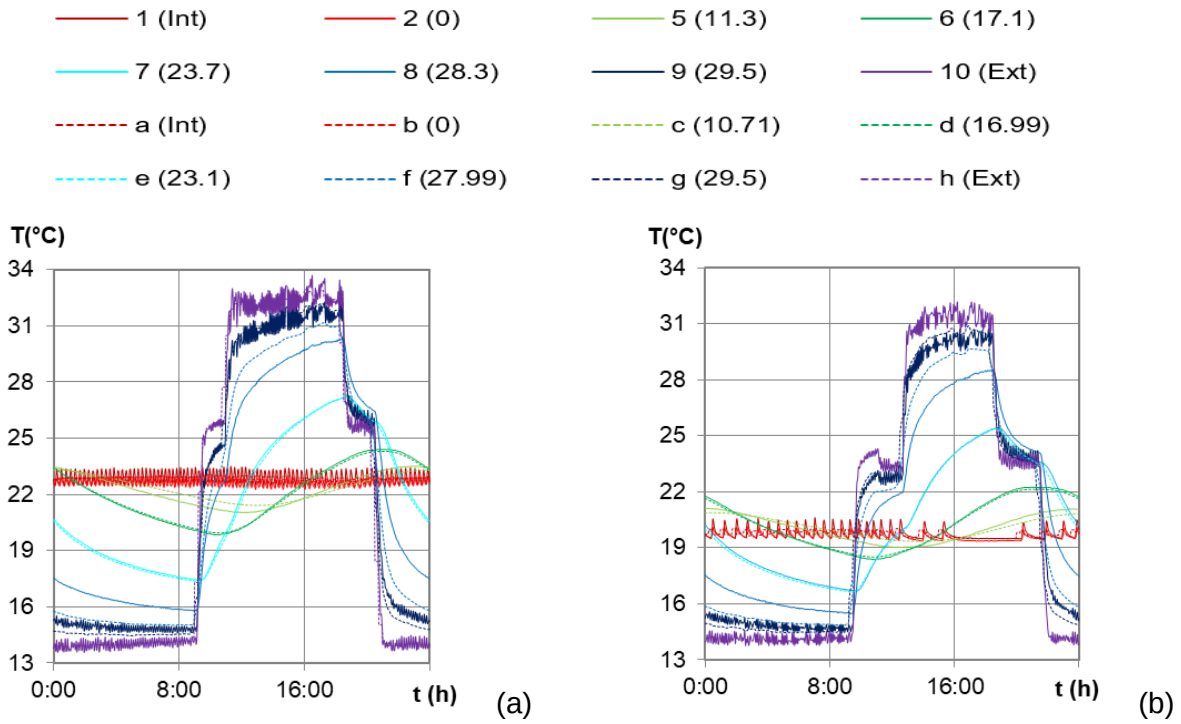


Figure III-23 : Variation de la température dans la paroi au cours du dernier cycle stabilisé pour le climat avec ensoleillement de : (a) Rennes, (b) Brest. Résultats expérimentaux : lignes continues ; résultats numériques : lignes pointillées.

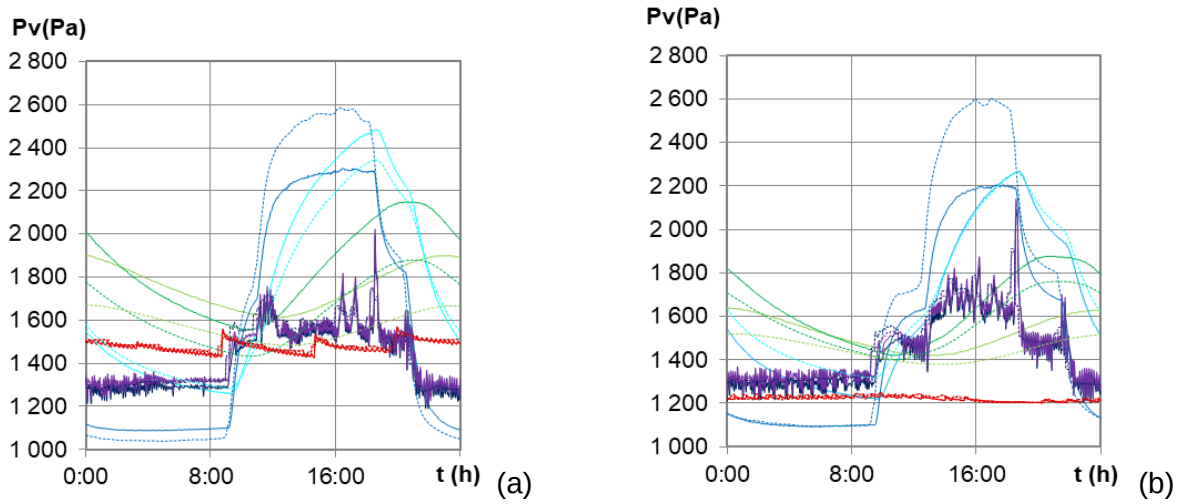


Figure III-24 : Variation de la pression de vapeur dans la paroi au cours du dernier cycle stabilisé pour le climat avec ensoleillement de : (a) Rennes, (b) Brest. Résultats expérimentaux : lignes continues ; résultats numériques : lignes pointillées

La Figure III-25 donne le déphasage et la variation relative de l'amplitude de température pour les deux villes, en fonction de la position. Les résultats obtenus à la fois pour le déphasage et la variation relative de l'amplitude de température sont similaires à ceux obtenus sans ensoleillement. En effet, ils dépendent uniquement de la diffusion de la chaleur dans la paroi, l'augmentation de l'amplitude du signal en surface s'est traduite par une augmentation de l'amplitude du signal dans l'épaisseur du mur.

Pour la pression de vapeur, les déphasages sur l'épaisseur de la paroi sont similaires à ceux obtenus sans soleil. Les variations relatives de l'amplitude de pression de vapeur sont supérieures à celles obtenues dans le cas des sollicitations sans soleil. Pour Brest, ces valeurs étaient inférieures à 1 sur toute l'épaisseur de la paroi dans le cas des sollicitations sans soleil et deviennent supérieures à 1 sur la moitié extérieure. Pour Rennes, ces valeurs étaient supérieures à 1 sur la moitié extérieure dans le cas des sollicitations sans soleil et deviennent supérieures à 1 sur toute l'épaisseur. Cela souligne l'amplification des phénomènes de désorption induits par l'élévation de température.

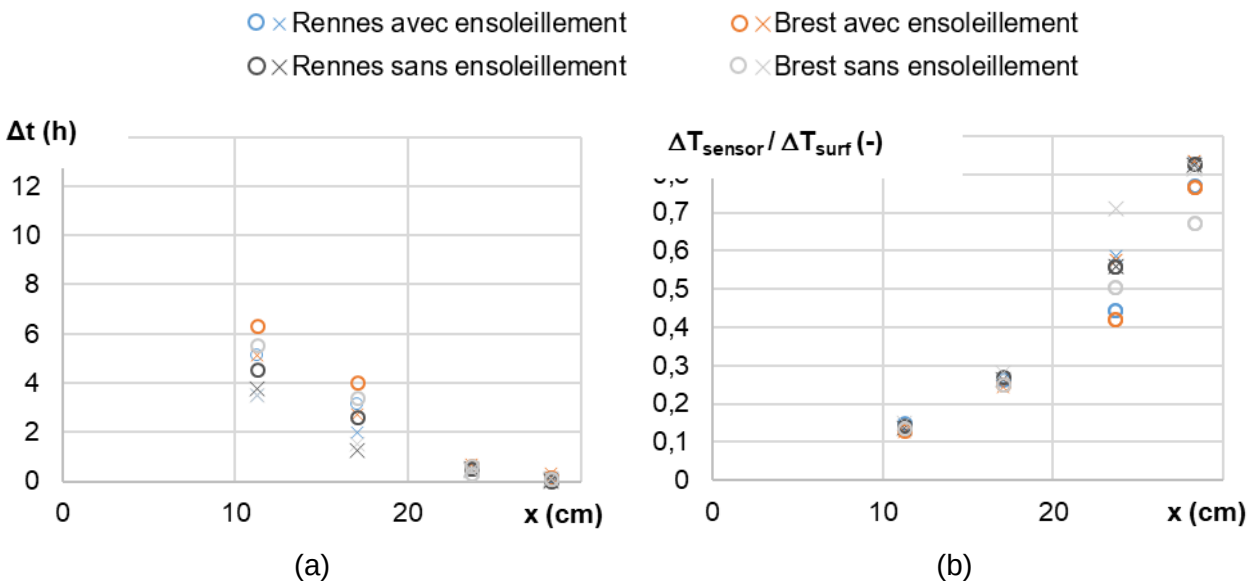


Figure III-25 : Paramètres thermiques dynamiques en fonction de l'emplacement pour Rennes et Brest dans le cas des sollicitations avec ensoleillement (×/o : calculé pendant le palier de température croissant/décroissant) : (a) Déphasage de la température, (b) Variation relative de l'amplitude de température.

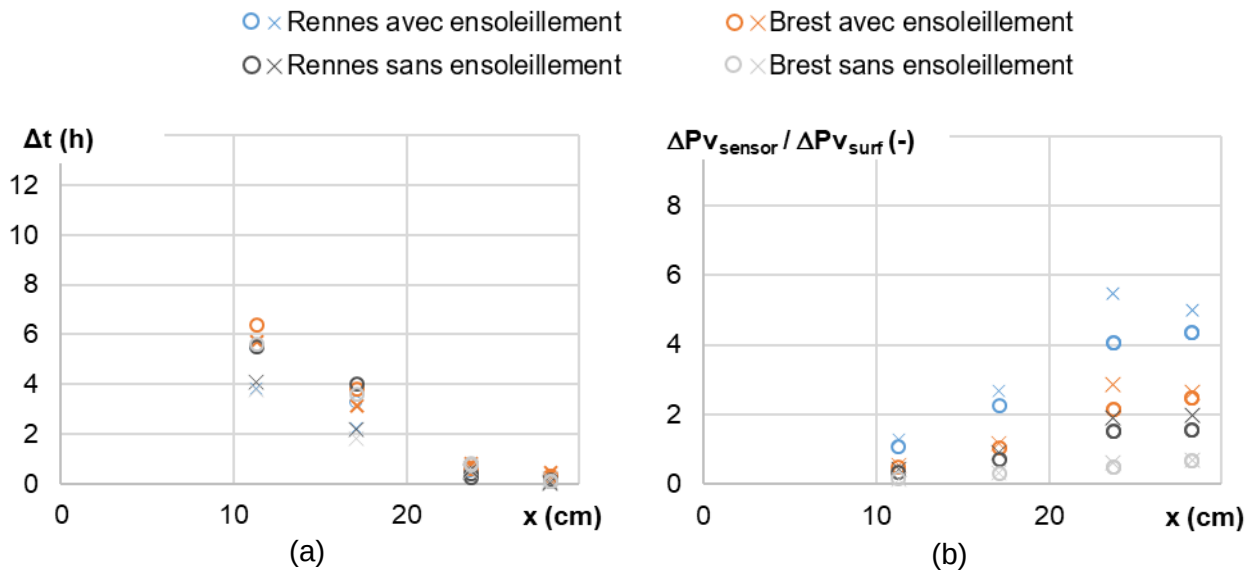


Figure III-26 : Paramètres hygriques dynamiques en fonction de l'emplacement pour Rennes et Brest dans le cas des sollicitations avec ensoleillement (x/o : calculés pendant le palier de pression de vapeur croissante/décroissante) : (a) Déphasage de la pression de vapeur, (b) Variation relative d'amplitude.

III.3.2 Profils

Les profils de température et de pression de vapeur sont présentés chaque heure pendant le dernier jour de l'étude dynamique dans la Figure III-27 pour le climat de Rennes et Figure III-28 pour le climat de Brest.

Au cours de la journée, sur la surface intérieure de la paroi, la température et la pression de vapeur sont quasi-constantes alors que sur la surface extérieure, elles évoluent en fonction des points de consigne.

Pour les deux villes, par rapport au cas sans ensoleillement, l'augmentation de la température en ambiance extérieure le jour conduit à une augmentation de la température moyenne sur toute l'épaisseur de la paroi d'autant plus marquée du côté extérieur de la paroi.

L'augmentation de température à proximité de la surface extérieure conduit à une propagation de la chaleur qui atteint le côté intérieur de la paroi et induit un léger gradient de température qui s'inverse au cours de la journée et conduit à de légers apports retardés la nuit. Cet effet n'était pas observé lorsque l'effet de l'ensoleillement n'était pas pris en compte. Les deux tiers de l'épaisseur de la paroi du côté extérieur sont actifs et contribuent à limiter les gains de chaleur du côté intérieur. Les résultats numériques sont très cohérents avec les profils expérimentaux. Toutefois, le faisceau de température numérique est plus resserré que le faisceau expérimental, ceci s'explique en partie par le fait que les signaux de sollicitation sont lissés pour être introduits dans la simulation numérique.

Pour la pression de vapeur, l'amplitude de la pression de vapeur au cours de la journée s'amplifie sur les deux-tiers extérieurs de la paroi. La pression de vapeur maximale atteinte augmente notablement du fait de l'amplification des phénomènes de désorption associés à la prise en compte de l'ensoleillement. La pression de vapeur augmente en moyenne sur toute l'épaisseur de la paroi. Le gradient de pression de vapeur près du côté extérieur de la paroi s'inverse au cours du cycle journalier. Du côté intérieur, le gradient reste faible mais augmente légèrement lors de la prise en compte de l'ensoleillement.

Comme dans le cas de l'étude sans ensoleillement, les profils numériques ont la même tendance que les profils expérimentaux. Cependant, les pics de pression de vapeur élevés/bas induits par les phénomènes de désorption/sorption sont plus fins et plus proches de la surface extérieure que les pics expérimentaux. Ils induisent un gradient de pression de vapeur plus élevé vers le point de désorption/sorption. La sur- estimation et la sous-estimation des pressions de vapeur peut être expliquée par le fait que WUFI Pro ne prend pas en compte les phénomènes d'hystérésis. L'amplitude numérique de la pression de vapeur se propage moins dans l'épaisseur de la paroi que l'amplitude expérimentale. Comme vu pour la phase de stabilisation, la diffusion de la vapeur semble sous-estimée.

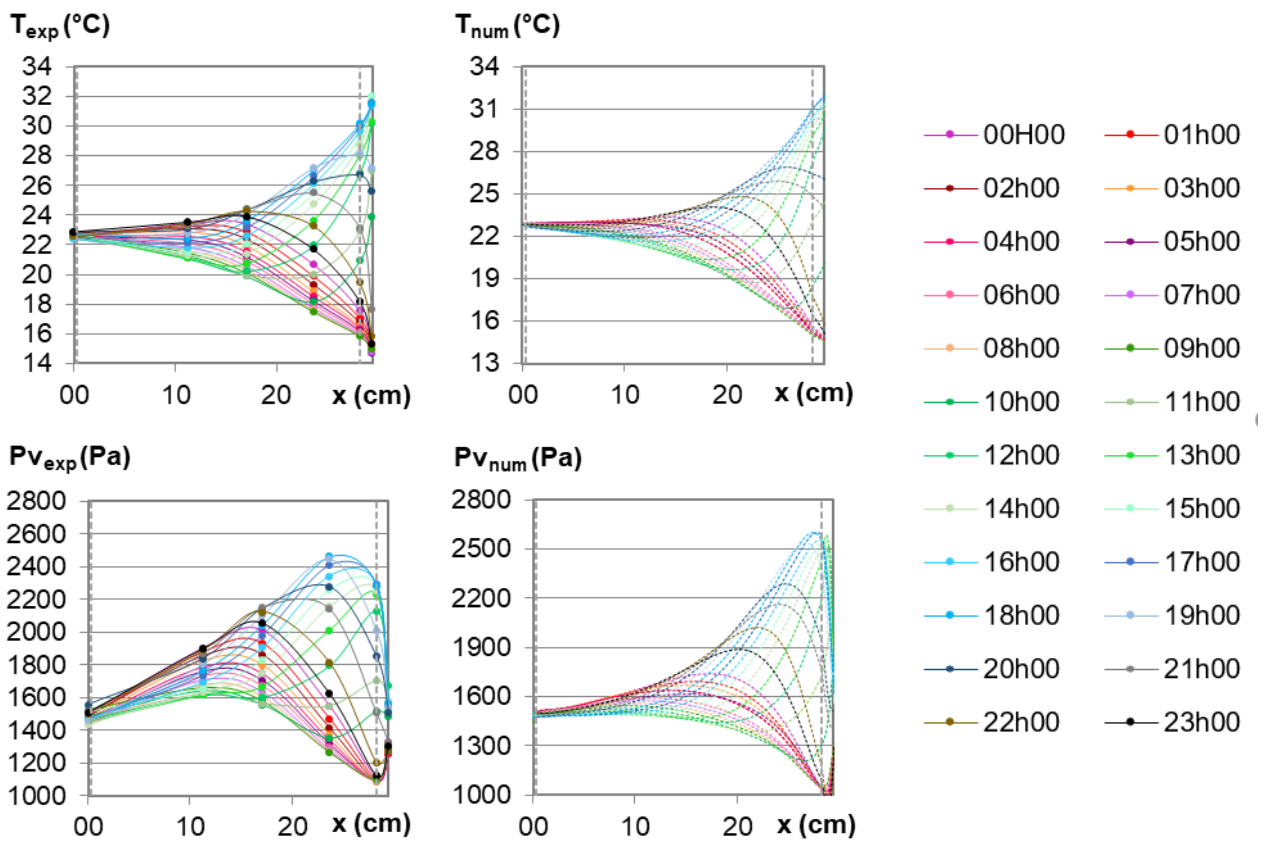


Figure III-27 : Profils de température et de pression de vapeur au cours du dernier cycle dynamique avec ensoleillement pour le climat de Rennes. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques.

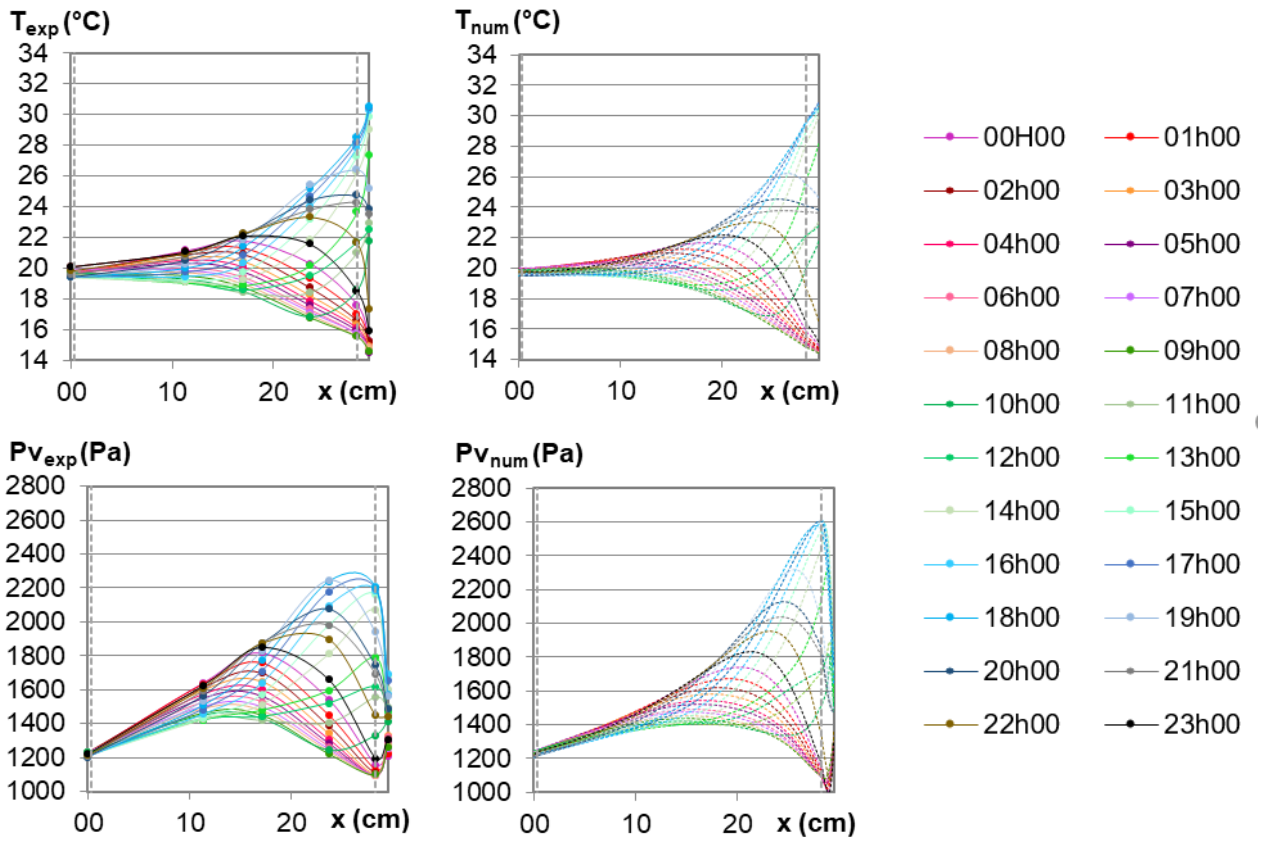


Figure III-28 : Profils de température et de pression de vapeur au cours du dernier cycle dynamique avec ensoleillement pour le climat de Brest. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques.

III.3.3 Flux de chaleur et d'humidité

La Figure III-29 présente l'évolution des flux de chaleur sur les surfaces intérieures et extérieures de la paroi sous les variations cycliques quotidiennes, avec ensoleillement, pour les deux villes. Les résultats expérimentaux et numériques montrent les mêmes tendances. Comme dans le cas de l'étude sans ensoleillement, le flux de chaleur se répète au cours des cycles mais présente une amplitude beaucoup plus forte. Sur la surface intérieure, le flux de chaleur reste très faible.

De la même façon, les flux d'humidité numériques présentés sur la Figure III-30 montrent les mêmes évolutions cycliques que pour le cas des sollicitations sans prise en compte de l'ensoleillement, avec toutefois des amplitudes plus élevées.

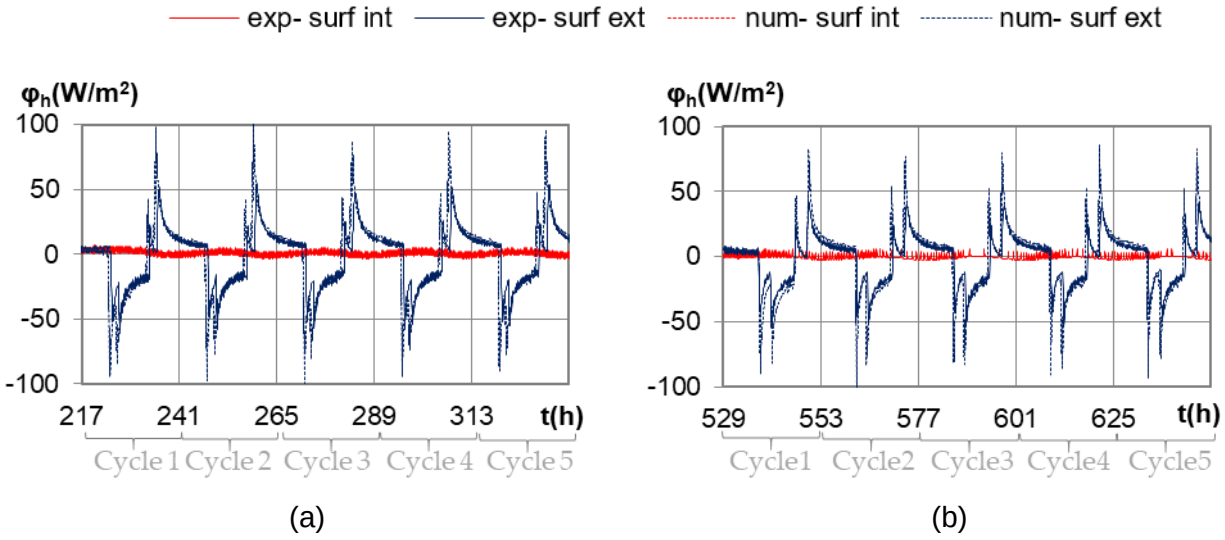


Figure III-29 : Flux de chaleur expérimentaux et numériques sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers avec ensoleillement pour le climat de : (a) Rennes, (b) Brest.

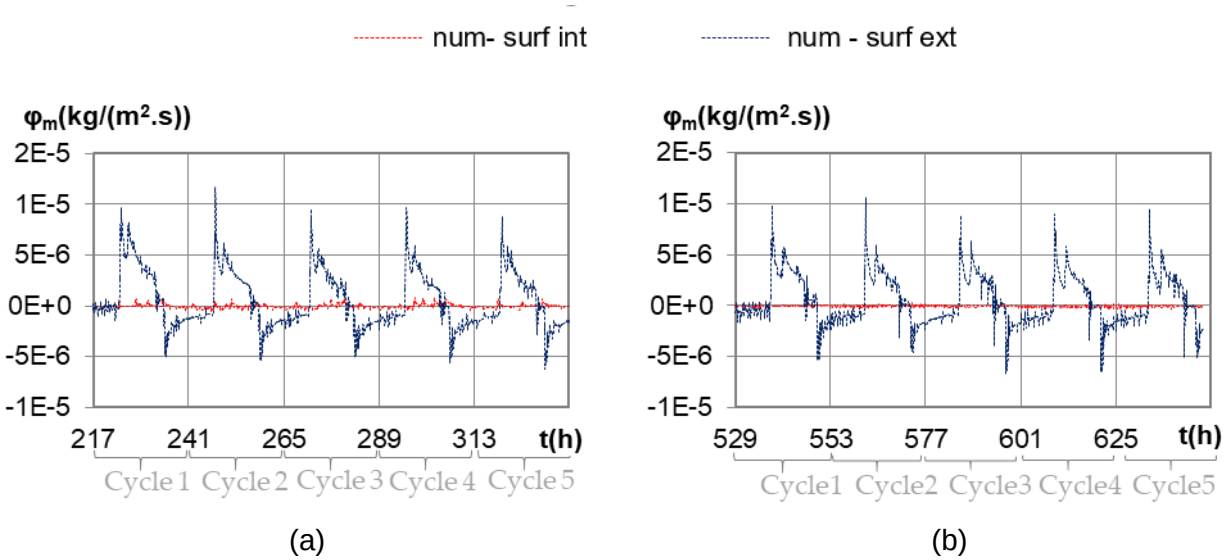


Figure III-30 : Flux d'humidité numériques sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers avec ensoleillement pour le climat de : (a) Rennes, (b) Brest.

III.3.4 Stockage et déstockage de la chaleur et de l'humidité dans la paroi

Les Figure III-31 et Figure III-32 donnent respectivement la chaleur et l'humidité entrantes et sortantes calculées par intégration des flux sur chaque surface et le total des deux surfaces.

D'un point de vue thermique, en surface extérieure, les échanges sont plus importants dans le cas d'une sollicitation avec ensoleillement que sans ensoleillement. Les quantités de chaleur stockées sont multipliées par 3 pour Rennes à 3,6 pour Brest. Les quantités déstockées sont multipliées par 1,2 à Rennes à 2,1 à Brest. De plus, le mur stocke plus de chaleur qu'il n'en déstocke aussi bien à Rennes qu'à Brest. En surface intérieure à Rennes, bien que la température du mur se soit élevée avec l'ensoleillement, elle reste du même ordre que la température ambiante considérée. De fait, le mur déstocke très peu de chaleur vers l'ambiance intérieure. La quantité de chaleur stockée est comparable à celle sans ensoleillement car le stockage se produit en situation de nuit. En surface intérieure à Brest, considérant une ambiance intérieure plus basse, l'élévation de température du mur conduit à une valeur proche de l'ambiance et ainsi à des échanges réduits de jour comme de nuit. La prise en compte des échanges sur les deux surfaces, conduit à un bilan faiblement positif à Brest (23 Wh/m²), légèrement supérieur au cas sans ensoleillement, et plus élevé à Rennes (154 Wh/m² au lieu de 3 Wh/m² sans ensoleillement).

Les résultats numériques présentent les mêmes tendances que les résultats expérimentaux. En surface intérieure, les valeurs numériques sont proches des valeurs expérimentales pour les deux villes. En surface extérieure, les résultats numériques surestiment les valeurs expérimentales pour les deux villes de 25% pour Rennes et 47% pour Brest. Cependant, l'écart entre chaleur entrante et chaleur sortante issu des résultats numériques est comparable à celui obtenu expérimentalement.

D'un point de vue hygrique, en surface intérieure, les quantités d'humidité stockées et déstockées sont faibles et équivalentes à celles obtenues pour les cycles sans soleil, avec des valeurs entrantes allant de 1 à 5 g/m² pendant le dernier cycle et des valeurs sortantes allant de 5 à 7 g/m².

Sur la surface extérieure, l'humidité entrante et sortante est beaucoup plus importante au cours du cycle que celle de la surface intérieure. En outre, l'humidité sortante est plus importante que l'humidité entrante pour les deux villes. L'humidité entrante est similaire pour les deux villes (52 g/m² pour Rennes et 59 g/m² pour Brest), identique au cas sans soleil pour Rennes et deux fois plus importante pour Brest. L'effet de l'ensoleillement conduit à multiplier l'humidité sortante par 3 pour Rennes et par 10 pour Brest.

Enfin, le bilan d'humidité pour la paroi est négatif pour les deux villes, avec une valeur deux fois plus importante pour Brest. Ceci conduit à un séchage du mur, observé par la décroissance des cinétiques de pression de vapeur.

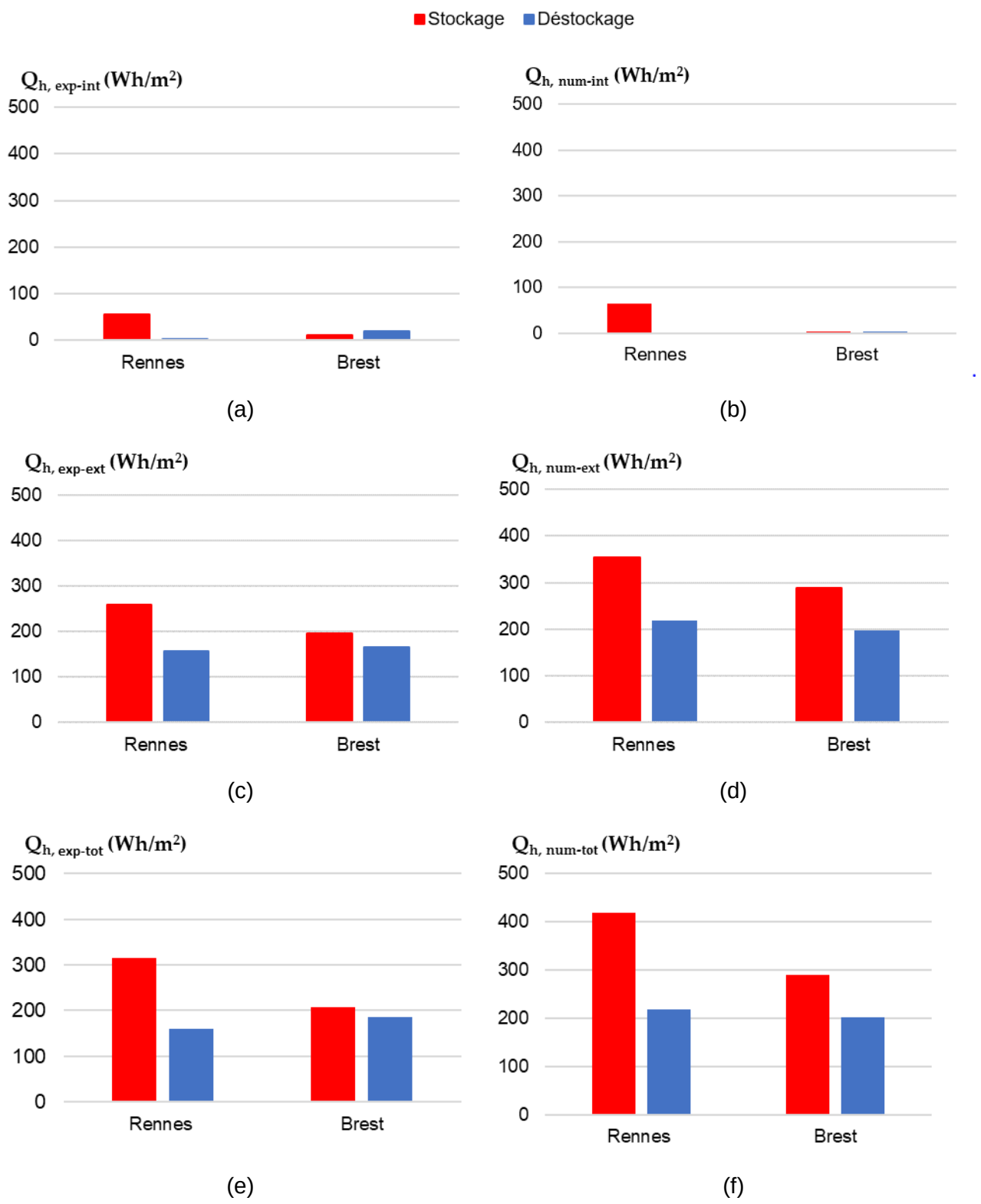


Figure III-31 : Chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle avec ensoleillement : (a, b, c) résultats expérimentaux, (a) surface intérieure, (b) surface extérieure, (c) total des deux surfaces, (d, e, f) résultats numériques, (d) surface intérieure, (e) surface extérieure, (f) total des deux surfaces.

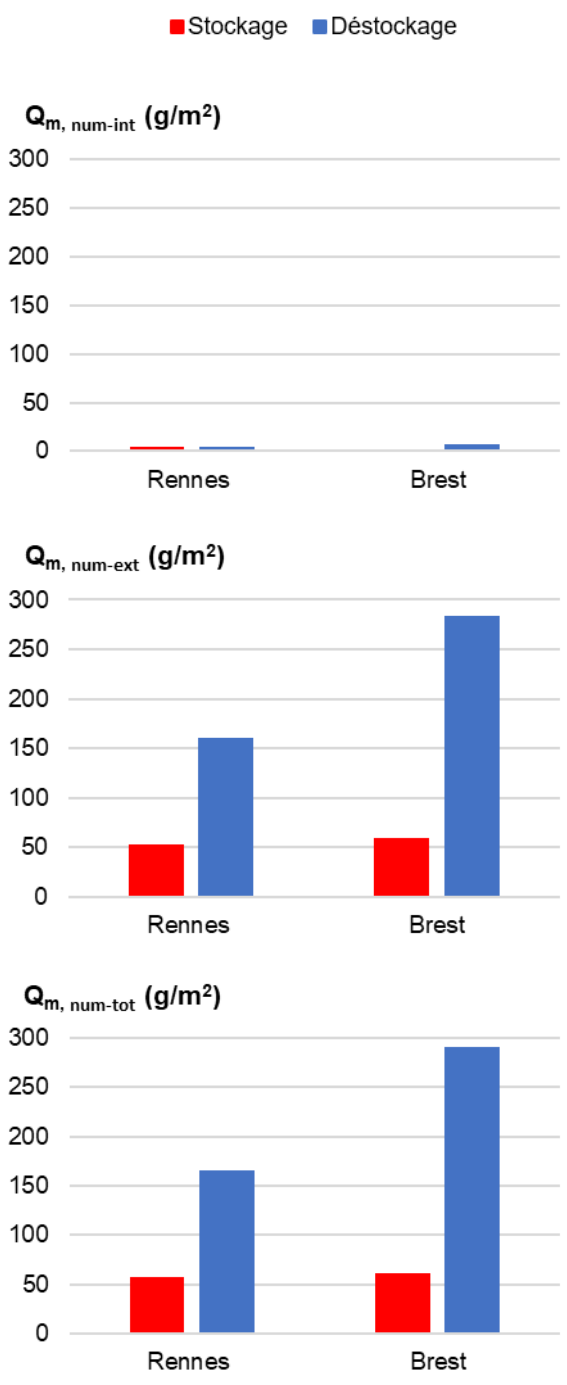


Figure III-32 : Humidité numérique entrante et sortante pendant le dernier cycle avec ensoleillement sur chaque surface du mur et total des deux surfaces.

III.4 Paroi terre chanvre - saison d'été et mi-saison avec une sollicitation hygrique en ambiance intérieure

Cet essai étudie l'effet d'une charge hygrique en ambiance intérieure sur le comportement hygrothermique de la paroi. Pour cela, un créneau d'humidité cyclique est réalisé en ayant des consignes de 75% pendant 8 heures et 40% pendant 16 heures. Ces conditions peuvent être rencontrées dans des locaux de type bureaux. Les conditions extérieures correspondent au cycle de Rennes été sans ensoleillement.

III.4.1 Résultats cinétiques

La Figure III-33 donne les résultats expérimentaux de la cinétique de la température, de l'humidité relative et de la pression de vapeur à plusieurs positions : conditions ambiantes, surfaces d'échange et différentes profondeurs dans le mur.

L'évolution de l'ambiance extérieure est conforme aux évolutions observées précédemment. Pour les conditions jours (23°C, 75 %), l'ambiance intérieure est conforme aux consignes imposées. Pour les conditions nuit, la mise en route du groupe froid pour déshumidifier conduit à une baisse de la température ambiante malgré le recours aux radiateurs pour essayer de maintenir la température. L'humidité relative descend rapidement, en une demi-heure à 60 %, mais n'atteindra que 45 % au point le plus bas.

Au sein du mur, l'effet de la régulation sur la température se ressent nettement sur les deux tiers de l'épaisseur. Les cinétiques de température sont décalées vers des valeurs plus faibles pour toutes les positions. Pour les points les plus proches du côté intérieur, l'amplitude est également impactée.

Les cinétiques d'humidité relative présentent des valeurs inférieures à 100 % sur toute l'épaisseur du mur, montrant qu'il n'y a pas de condensation interne même en présence de pic hygrique.

En pression de vapeur, sur la moitié extérieure du mur, les cinétiques restent proches de celles observées sans pic hygrique. L'effet de l'amplitude de variation se fait ressentir jusqu'à mi-épaisseur côté intérieur.

Les cinétiques numériques sont superposées aux cinétiques expérimentales pour le dernier cycle Figure III-34.

La cinétique numérique de la température est cohérente avec les résultats expérimentaux, comme dans le cas sans pic hygrique.

Pour la pression de vapeur, les écarts entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux sont légèrement plus importants que dans le cas sans pic hygrique au cœur de la paroi (environ 200 Pa au maximum au lieu de 150 Pa). Ces écarts sont plus importants sur les valeurs maximales que sur les valeurs minimales conduisant à une amplitude numérique plus faible que l'amplitude expérimentale.

Le déphasage et la variation relative de l'amplitude de température et de pression de vapeur par rapport à la sollicitation côté extérieur sont présentés Figure III-35. Les résultats sont similaires à ceux obtenus sans sollicitation hygrique du fait que les positions considérées ne sont pas atteintes par la sollicitation côté intérieur. Le déphasage et la variation relative de l'amplitude de température et de pression de vapeur par rapport à la sollicitation côté intérieur n'ont pas pu être déterminés du fait de la défaillance du capteur dans la zone sollicitée.

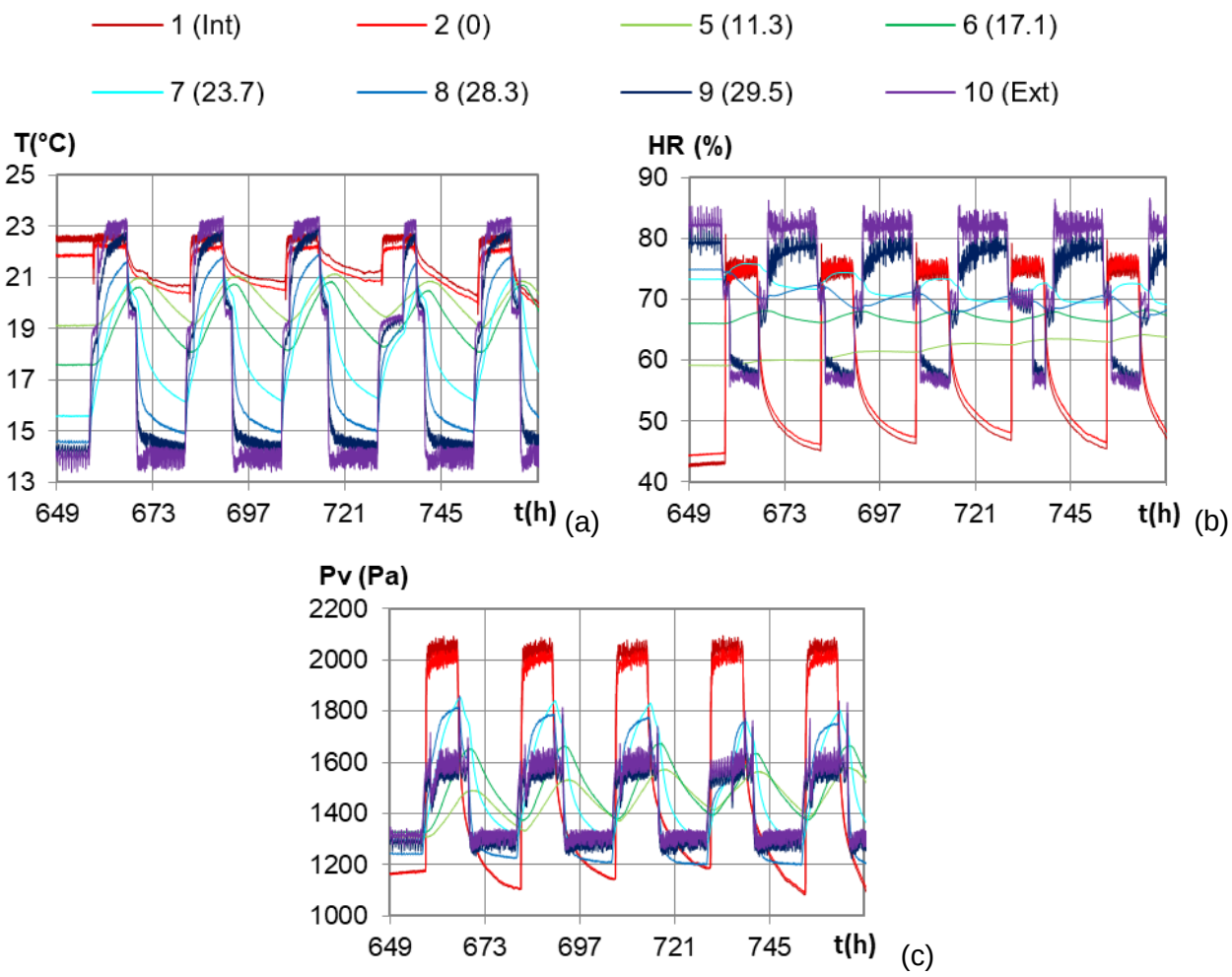


Figure III-33 : Cinétiques expérimentales de la (a) température, (b) humidité relative, (c) pression de vapeur pendant les cycles dynamiques à plusieurs profondeurs dans le mur.

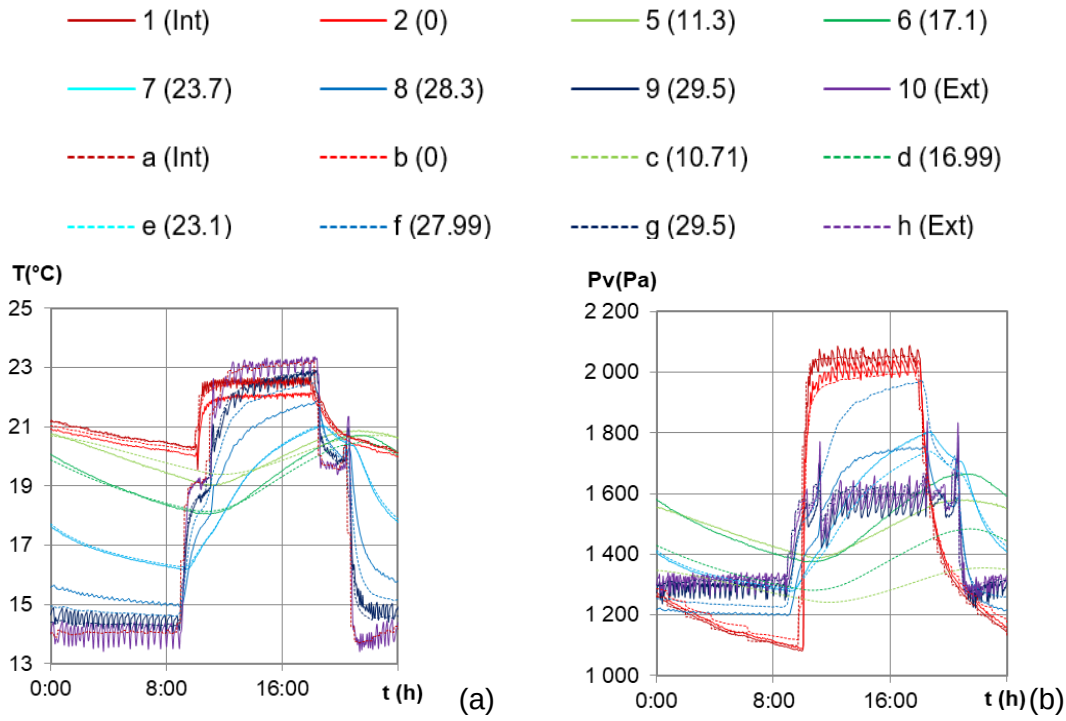


Figure III-34 : Cinétiques de (a) température et de (b) pression de vapeur dans la paroi au cours du dernier cycle stabilisé Résultats expérimentaux : lignes continues ; résultats numériques : lignes pointillées.

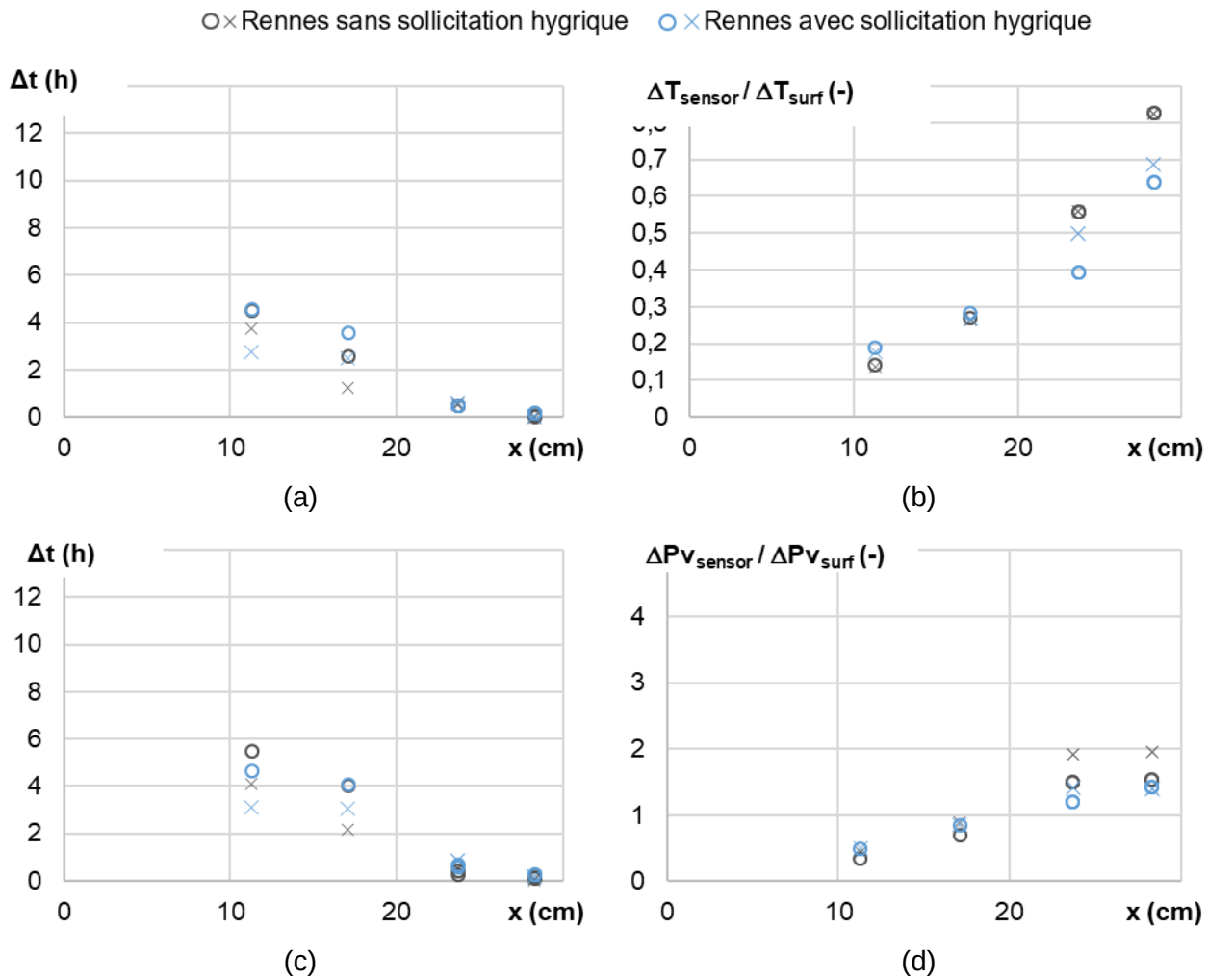


Figure III-35 : Paramètres thermiques et hygriques dynamiques en fonction de l'emplacement pour Rennes dans le cas des sollicitations hygriques intérieure et par rapport à la sollicitation en ambiance extérieure (×/o : calculé pendant le palier de température croissant/décroissant) : (a) Déphasage de la température, (b) Variation relative de l'amplitude de température, (c) Déphasage de la pression de vapeur, (d) variation relative de l'amplitude de pression de vapeur.

III.4.2 Profils

Les profils de température et de pression de vapeur sont présentés chaque heure pendant le dernier jour de l'étude dynamique sur la Figure III-36.

Le profil de température présente une allure similaire à celui observé sans pic hygrique. Toutefois, le faisceau est légèrement plus large sur la moitié intérieure du mur, avec des valeurs minimales plus basses du fait des températures ambiantes intérieures qui diminuent la nuit du fait de la régulation associée à la déshumidification.

Le profil de pression de vapeur reste similaire à celui observé sans pic hygrique sur la moitié extérieure du mur. En surface intérieure, l'amplitude de pression de vapeur est largement augmentée du fait de la sollicitation. Le faisceau est élargi aux alentours de 10 cm de profondeur. Toutefois, le manque de capteur dans les dix premiers centimètres ne permet pas de qualifier de façon précise l'effet du pic hygrique côté intérieur.

Comme dans le cas de l'étude sans pic hygrique, les profils de température numériques reproduisent correctement les résultats expérimentaux.

Pour la pression de vapeur, de la même façon que précédemment, le pic observé côté extérieur est trop étroit et trop élevé. Les pressions de vapeur au cœur du mur sous-estiment les valeurs expérimentales. Côté intérieur, le pic de pression de vapeur conduit à une profondeur de pénétration de l'ordre de 8 cm. Etant donné les observations côté extérieur, cette profondeur de pénétration peut être sous-estimée.

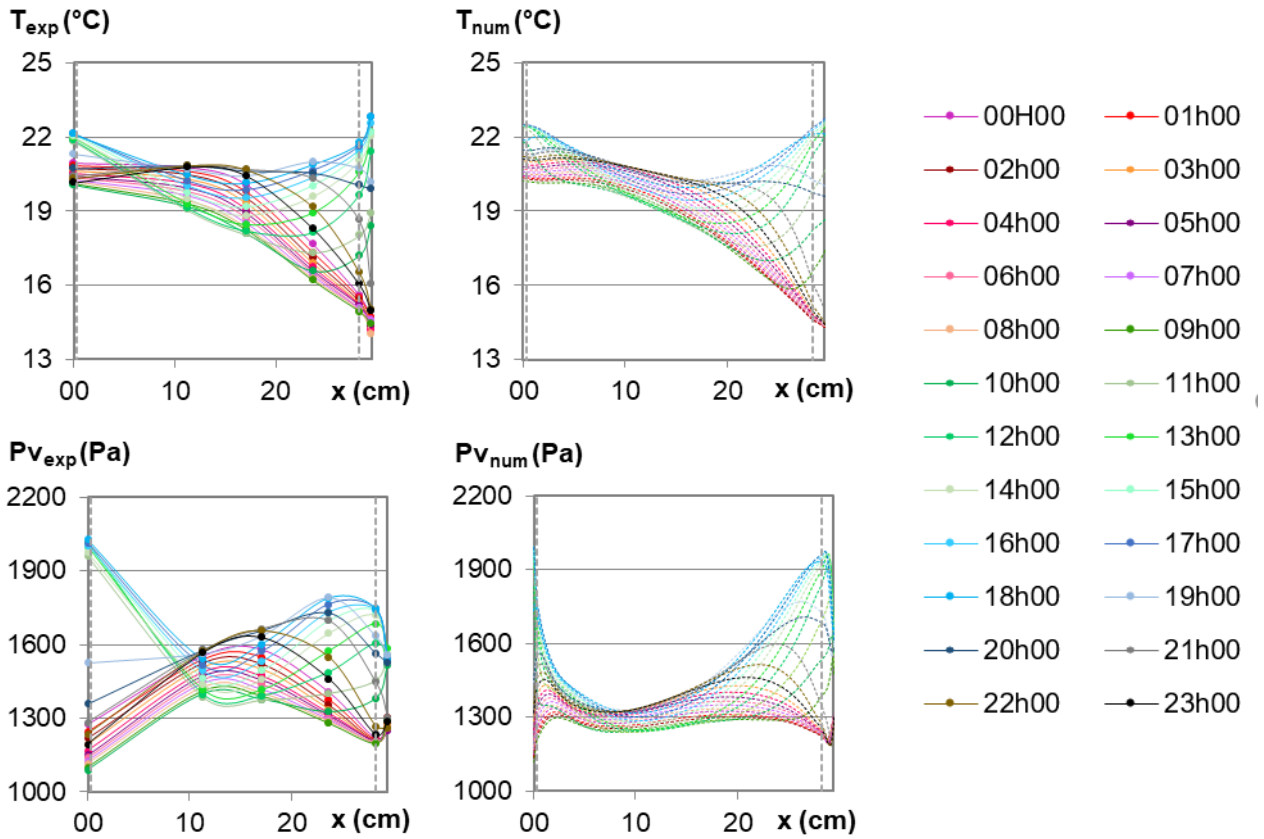


Figure III-36 : Profils de température et de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique. Points : valeurs expérimentales ; lignes pointillées : valeurs numériques.

III.4.3 Flux de chaleur et d'humidité

La Figure III-37 donne l'évolution des flux de chaleur et des flux d'humidité sur les surfaces intérieures et extérieures du mur sous les variations cycliques quotidiennes.

Pour le côté extérieur, aussi bien pour le flux de chaleur que pour le flux d'humidité, les évolutions quotidiennes sont comparables à celles obtenues sans cycles hygriques.

Pour le côté intérieur, le flux de chaleur présente des valeurs légèrement positives du fait de la remontée en température de l'ambiance suite à l'arrêt du groupe froid pour la déshumidification conduisant au réchauffement du mur. Le flux d'humidité fait apparaître nettement l'effet d'absorption et désorption d'humidité dans le mur sous l'effet de la sollicitation hygrique, avec des flux plus importants durant la phase d'absorption.

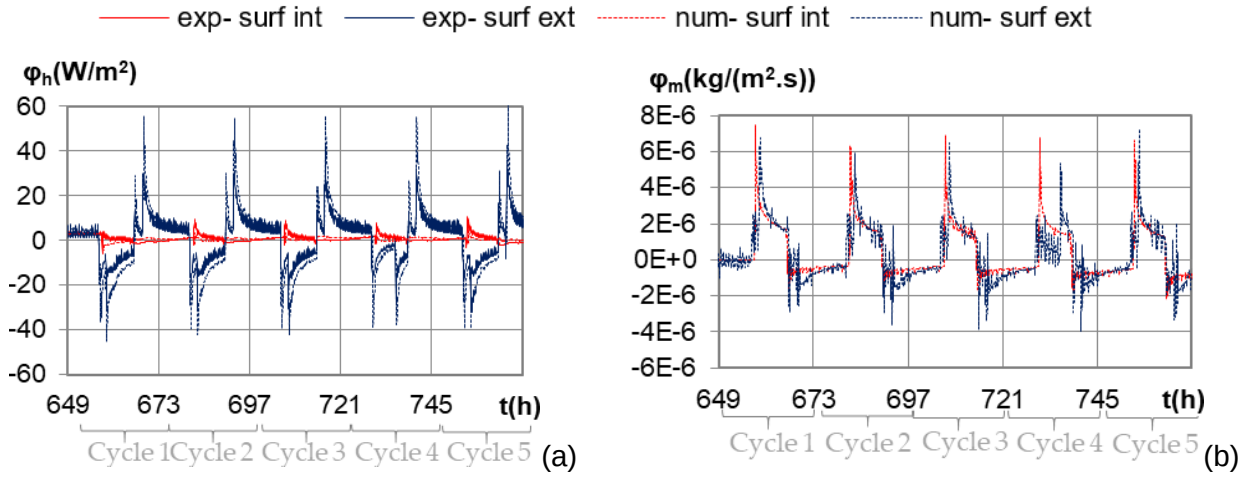


Figure III-37 : Evolution des (a) Flux de chaleur expérimentaux et numériques et (b) flux d'humidité numériques sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers.

III.4.4 Stockage et déstockage de la chaleur et de l'humidité dans la paroi

La Figure III-38 donne la chaleur et l'humidité entrante et sortante calculée par intégration des flux sur chaque surface et le total des deux surfaces.

D'un point de vue thermique, en surface extérieure, les quantités de chaleur stockée/déstockée sont similaires au cas du climat de Rennes sans ensoleillement. En surface intérieure, la quantité de chaleur stockée est plus faible que dans le cas sans sollicitation hygrique (26 Wh/m² pour 44 Wh/m²) et la chaleur déstockée est de 7 Wh/m² au lieu de 0. Ceci est induit par les variations de température ambiante intérieure liée au fonctionnement du groupe froid pour déshumidifier.

Les résultats numériques présentent les mêmes tendances que les résultats expérimentaux. En surface intérieure, les valeurs numériques sous-estiment les valeurs expérimentales. En surface extérieure, les résultats numériques surestiment les valeurs expérimentales. Cependant, l'écart entre chaleur entrante et chaleur sortante issu des résultats numériques est comparable à celui obtenu expérimentalement.

D'un point de vue hygrique, en surface extérieure, la quantité d'humidité déstockée est comparable au cas sans sollicitation hygrique, alors que la quantité stockée est légèrement plus faible, en lien avec un gradient plus faible pour les basses pressions de vapeur. En surface intérieure, les quantités d'humidité stockées et déstockées augmentent en cas de sollicitation hygrique. Les quantités d'humidité stockée et déstockée sont alors respectivement de 56 et 42 g/m² pendant le dernier cycle. Au bilan, la quantité d'humidité stockée/déstockée en surface intérieure du fait de la sollicitation hygrique ne se transmet pas jusqu'à la surface extérieure, comme observé sur les profils.

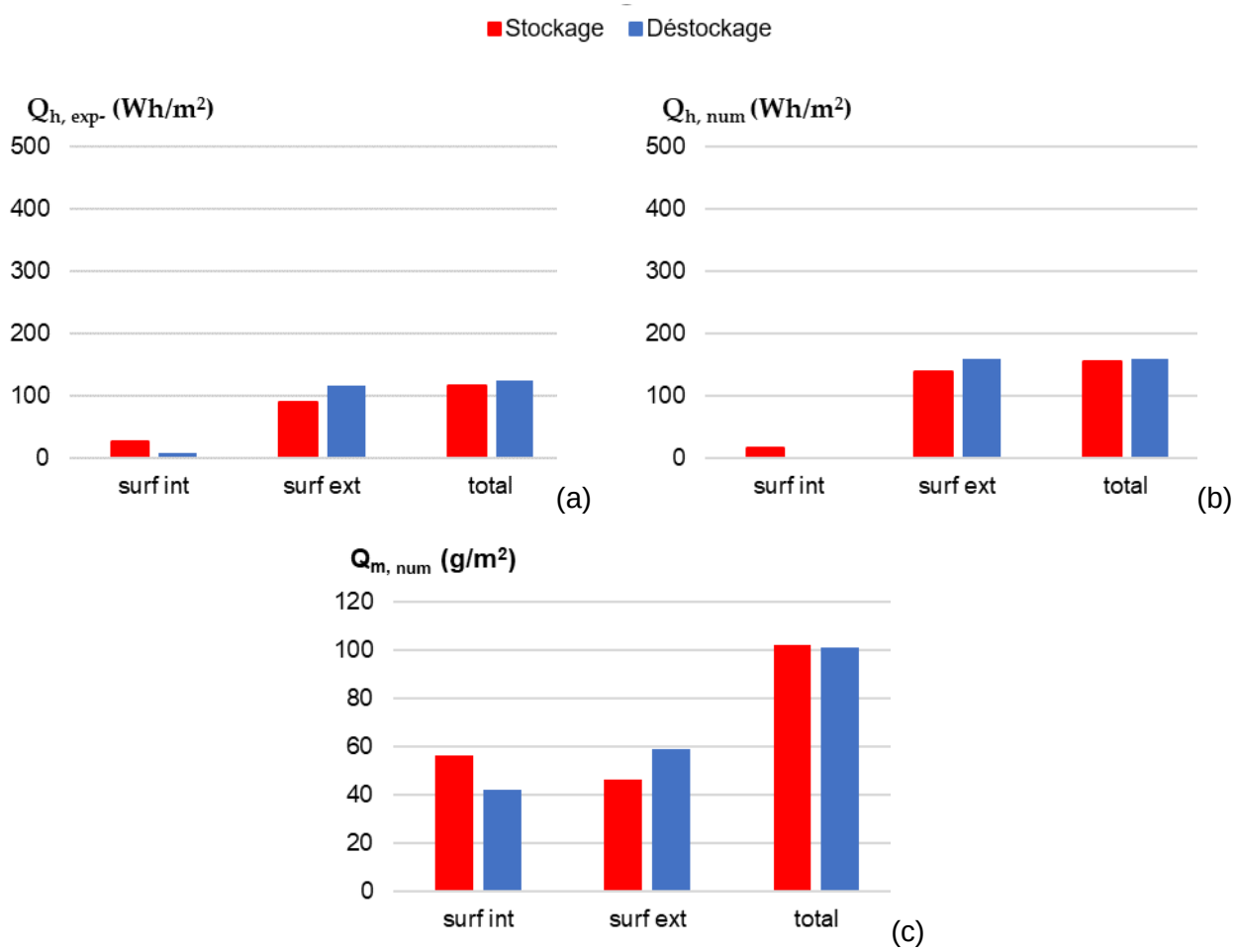


Figure III-38 : Chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle sous sollicitation hygrique en ambiance intérieure : (a) résultats expérimentaux, (b) résultats numériques et (c) humidité numérique entrante et sortante pendant le dernier cycle sur chaque surface du mur et total des deux surfaces.

III.5 Comparaison aux autres parois - saison d'été

Les résultats expérimentaux obtenus sur la paroi terre-chanvre sont comparés à ceux obtenus sur les autres parois pour le climat de Rennes pour les mêmes sollicitations : gradient constant de température et de pression de vapeur, cycles été sans soleil, cycles été avec soleil, sollicitation hygrique en ambiance intérieure. Pour les conditions sous gradient constant de température et de pression de vapeur, l'étude présente les profils de température et de pression de vapeur, les flux de chaleur et les résistances thermiques. Pour les cycles dynamiques, l'analyse est réalisée sur les profils de température et de pression de vapeur, les flux en surface et les bilans de quantité de chaleur. Les cinétiques de température, humidité relative et pression de vapeur aux différentes positions sont données en annexe A II.

III.5.1 Sous conditions de gradients de température et de pression de vapeur constants

A l'issue de la phase de stabilisation sous gradients constants de température et de pression de vapeur pour la paroi terre-chanvre, les variations relatives de température et de pression de vapeur sont inférieures à 2% pour toutes les autres parois, sur toute leur épaisseur, au cours des dernières 24 heures.

III.5.1.1 Profils

Les Figure III-39 et Figure III-40 donnent respectivement les profils de température et de pression de vapeur pour les quatre parois. Les profils expérimentaux correspondent aux valeurs moyennes sur 24 h : les 24 premières pour les profils initiaux et les 24 dernières pour les profils finaux, ainsi que les profils à t= 50 heures et t = 62 heures, la consigne ayant été modifiée à t = 50 heures. Les profils théoriques sont calculés à partir des ambiances et des propriétés des matériaux.

Pour les températures, pour les quatre parois, les profils expérimentaux à l'état final sont en bon accord avec les profils théoriques. Les gradients de température les plus forts sont observés au sein des couches les plus isolantes : l'isolant souple Biofib trio (au sein des parois Isobio, Maïs et Colza), le panneau Cavac (côté extérieur de l'isolant Biofib Trio de la paroi Isobio), le panneau PVA-Chanvre (de part et d'autre de l'isolant Biofib Trio dans la paroi Maïs) et le panneau en résidu de paille de colza (de part et d'autre de l'isolant Biofib Trio dans la paroi Colza). Toutefois, le gradient de température au sein de l'isolant Biofib Trio obtenu expérimentalement à la fin de la phase de stabilisation est légèrement plus faible que le gradient théorique dans les trois parois. Ceci peut être dû à l'état hygrique du matériau, ou à un léger compactage au sein de la paroi.

Pour les pressions de vapeur, comme vu précédemment, le régime permanent n'est pas complètement atteint du point de vue hygrique à la fin de la phase de stabilisation. Les profils expérimentaux présentent des tendances comparables à celles des profils théoriques, avec des pressions de vapeur décroissantes sur toute l'épaisseur de la paroi pour les parois terre-chanvre, Maïs et Colza et une discontinuité importante au niveau de la membrane Intello pour la paroi Isobio. La pression de vapeur côté intérieur de la membrane montre une augmentation indiquant un blocage de l'humidité par la membrane Intello.

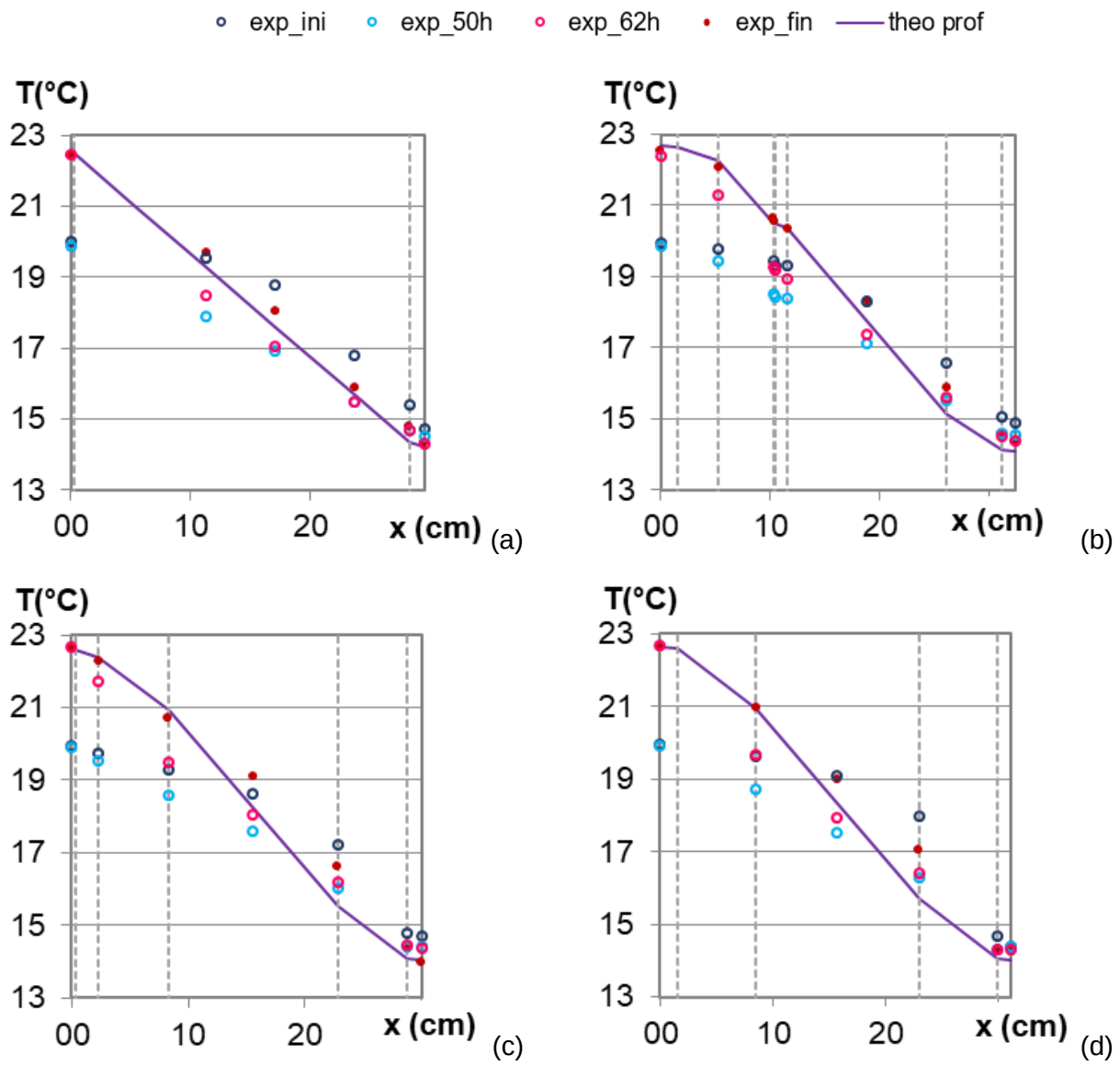


Figure III-39 : Profils de température sous gradients de température et de pression de vapeur constants, valeurs moyennes théoriques et expérimentales sur les dernières 24 h de la phase de stabilisation : (a) Paroi terre chanvre (b) paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza.

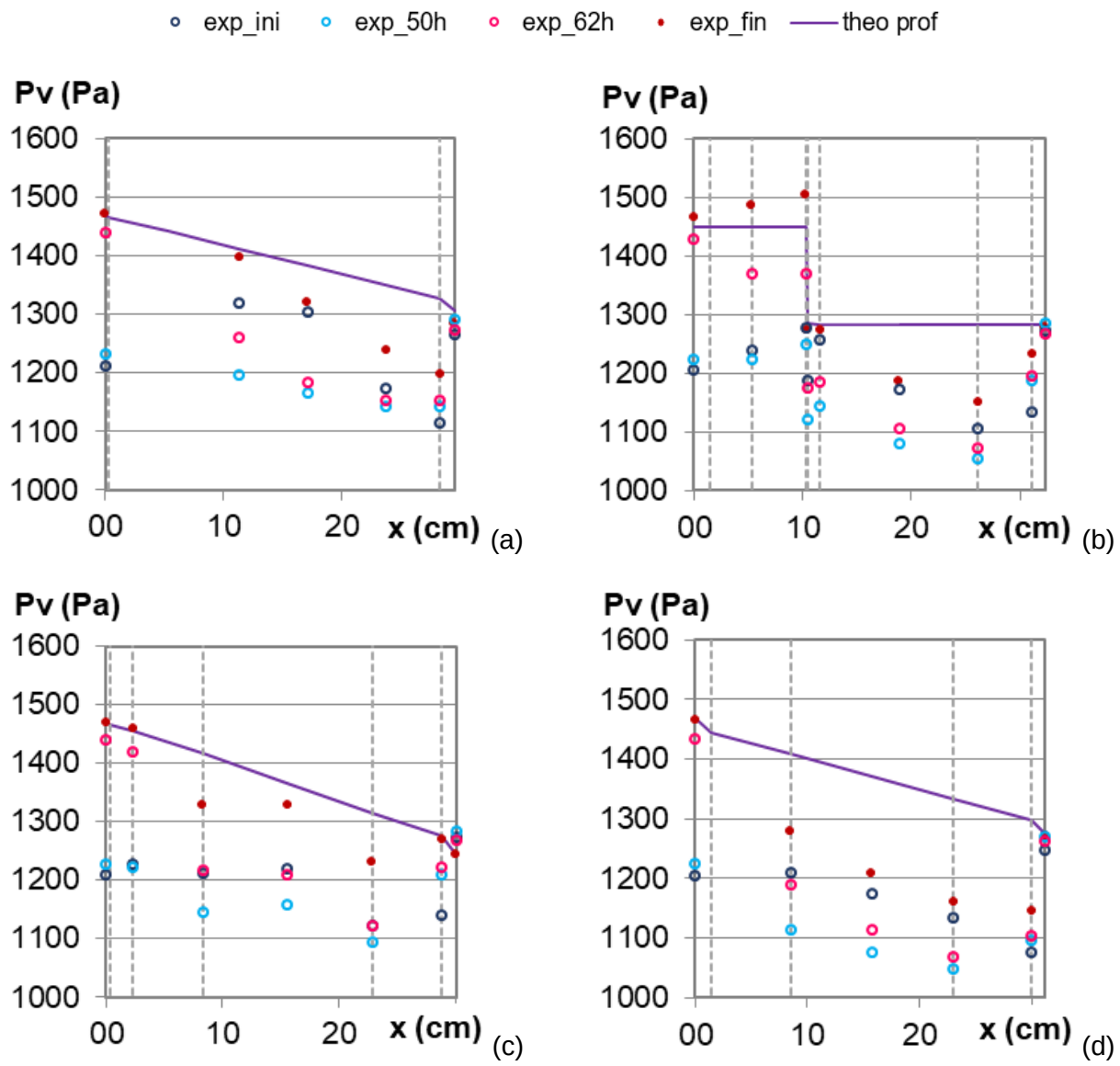


Figure III-40 : Profils de pression de vapeur sous gradients de température et de pression de vapeur constants, valeurs moyennes théoriques et expérimentales sur les dernières 24 h de la phase de stabilisation : (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (c) Paroi Colza.

III.5.1.2 Flux de chaleur et résistances thermiques

Le Tableau III-6 donne les résultats expérimentaux à la fin de la phase de stabilisation. Ce tableau donne les températures de surface intérieures et extérieures, les flux de chaleur intérieurs et extérieurs, les valeurs de résistance thermique de conduction R_h (intérieur, extérieur, moyenne) et les valeurs théoriques de $R_{thèo}$ de chaque paroi.

Tableau III-6 : Flux de chaleur expérimentaux et valeurs R_h à la fin de la phase de stabilisation.

	T_{2_exp} (°C)	T_{9_exp} (°C)	φ_{hint_exp} (W/m²)	φ_{hext_exp} (W/m²)	R_{h,int_exp} (m²·K/W)	$R_{h,\ ext_exp}$ (m²·K/W)	$R_{h,\ exp}$ (m²·K/W)	$R_{h,\ théo}$ (m²·K/W)
Terre chanvre	22,45	13,34	3,092	3,493	2,621	2,320	2,470	2,539
Isobio	22,55	14,03	1,200	1,613	7,101	5,281	6,191	6,188
Mais	22,59	14,34	1,200	1,613	6,877	5,114	5,996	5,908
Colza	22,61	13,96	1,223	1,975	7,070	4,378	5,724	6,099

A la fin de la phase de stabilisation, les flux de chaleur intérieurs et extérieurs diffèrent pour toutes les parois, de 12 % pour la paroi terre-chanvre, 29 % pour les parois Isobio et Maïs et 47 % pour la paroi Colza. Les flux moyens pour les parois Isobio et Maïs sont identiques, ils sont supérieurs de 13 % pour la paroi Colza et 2,3 fois plus importants pour la paroi terre-chanvre.

A la fin de la phase de stabilisation, pour les trois parois, les valeurs résistances thermiques de conduction expérimentales de Rh sont cohérentes avec leurs valeurs théoriques sauf la paroi RAP, où la valeur expérimentale est légèrement inférieure à celle théorique, avec des écarts de 0 à 3 % pour les parois terre-chanvre, Isobio et Maïs et de 6,6 % pour la paroi Colza pour laquelle le flux en surface intérieure diffère le plus du flux en surface extérieure. La résistance thermique de conduction maximale est celle de la paroi Isobio. Celles des parois Maïs et Colza sont légèrement inférieures (de 3,8 et 4,5 %) alors que celle de la paroi terre-chanvre est beaucoup plus faible (de 60 %).

III.5.2 Sollicitations cycliques – été sans ensoleillement

III.5.2.1 Profils et analyse dynamique en température

Les Figure III-41, Figure III-42 et Figure III-43 donnent les profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur à plusieurs instants pendant le dernier cycle de l'étude dynamique.

Pour la température, les quatre parois présentent des faisceaux similaires avec une tendance décroissante pour tous les instants sur les deux tiers de l'épaisseur du mur, côté intérieur, et qui s'inverse sur le cycle journalier côté extérieur. Les températures atteintes dans les parois Isobio, Maïs et Colza présentent des valeurs similaires entre elles et qui diffèrent légèrement de celles de la paroi terre-chanvre. A proximité de la surface extérieure, le bas du faisceau est légèrement plus haut pour la paroi terre-chanvre. Au cœur du mur, le haut du faisceau est légèrement plus bas pour la paroi terre-chanvre. Cette position correspond à celle de l'isolant au sein des parois Isobio, Maïs et Colza. A proximité de la surface intérieure, le faisceau est resserré et horizontal pour les parois Isobio et Maïs.

L'humidité relative reste inférieure à 100 % sur toute l'épaisseur de la paroi pour les quatre parois, indiquant l'absence de condensation interne. Pour les parois Maïs et Colza, elle est croissante de l'intérieur vers l'extérieur, sauf dans l'enduit extérieur où le gradient s'inverse au cours de la journée. Pour la paroi terre-chanvre, elle est également croissante de l'intérieur vers l'extérieur sur les deux tiers de l'épaisseur côté intérieur, elle est décroissante sur le tiers extérieur et le gradient s'inverse dans l'enduit extérieur au cours du cycle. Pour la paroi Isobio, l'humidité relative est globalement croissante sur l'épaisseur de la paroi, avec une chute au niveau de l'ensemble membrane Intello-OSB.

Pour la pression de vapeur, toutes les parois présentent des profils avec un pic à proximité de la surface extérieure. Celui-ci est très similaire pour les parois Isobio, Maïs et Colza et est plus large pour la paroi terre-chanvre pour laquelle la valeur maximale mesurée est comparable, avec une valeur plus élevée possible entre les deux points de mesure. A proximité de la surface intérieure, les pressions de vapeur sont similaires pour toutes les parois. L'évolution dans le tiers de l'épaisseur côté intérieur est croissante et varie peu au cours de la journée pour la paroi Isobio, jusqu'à la membrane Intello. Pour la paroi terre-chanvre, de la même façon l'évolution de la pression de vapeur sur le tiers de l'épaisseur côté intérieur est croissante sur toute la journée, mais avec un faisceau plus large. Pour la paroi Maïs, dans l'épaisseur de la couche de Maïs, la pression de vapeur est croissante sur toute la journée et dans le panneau PVA-Chanvre, l'évolution de pression de vapeur s'inverse au cours de la journée. Pour la paroi Colza, sur le tiers de l'épaisseur côté intérieur, le gradient de pression de vapeur s'inverse au cours de la journée. Au cœur de la paroi, les faisceaux des parois Maïs et Colza sont similaires avec des inversions de gradient au cours de la journée, un faisceau plus large et des pressions de vapeur légèrement plus forte pour la paroi Maïs. La paroi terre-chanvre présente un faisceau de pressions de vapeur assez resserré, avec des inversions de gradient, et des valeurs minimales plus élevées que pour les autres parois induites par le pic côté extérieur. Pour la paroi Isobio, l'amplitude de pression de vapeur est forte au cœur du Biofib Trio, avec des inversions de gradients au cours de la journée.

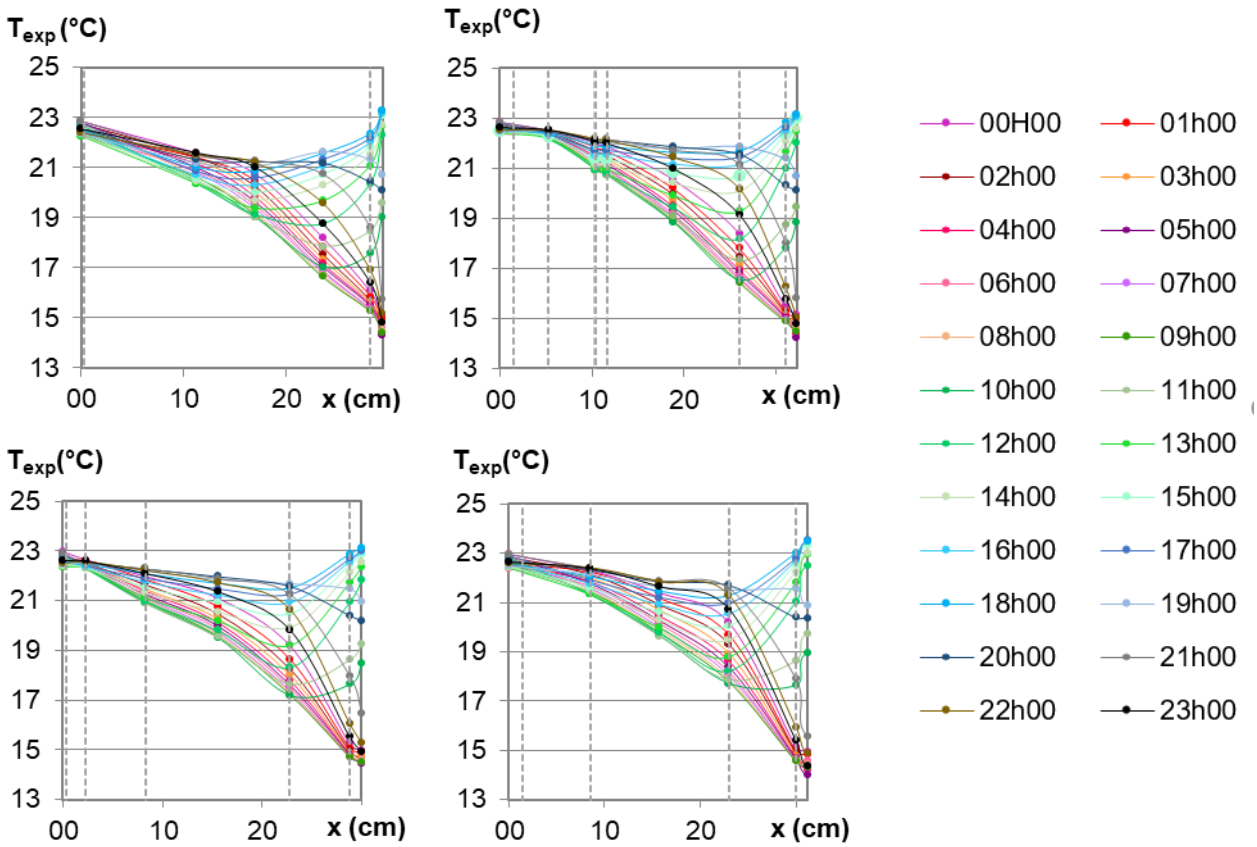


Figure III-41 : Profils de température pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza

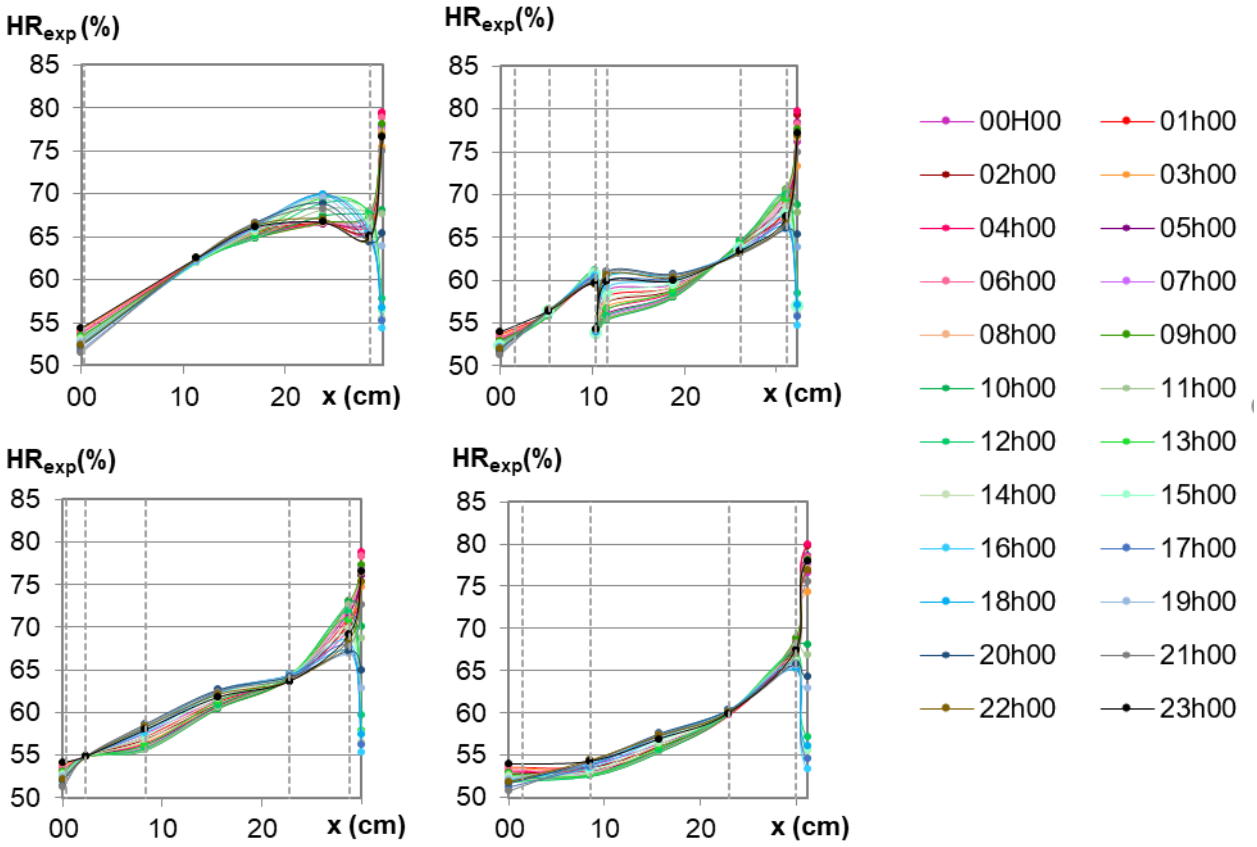


Figure III-42 : Profils d'humidité relative pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza

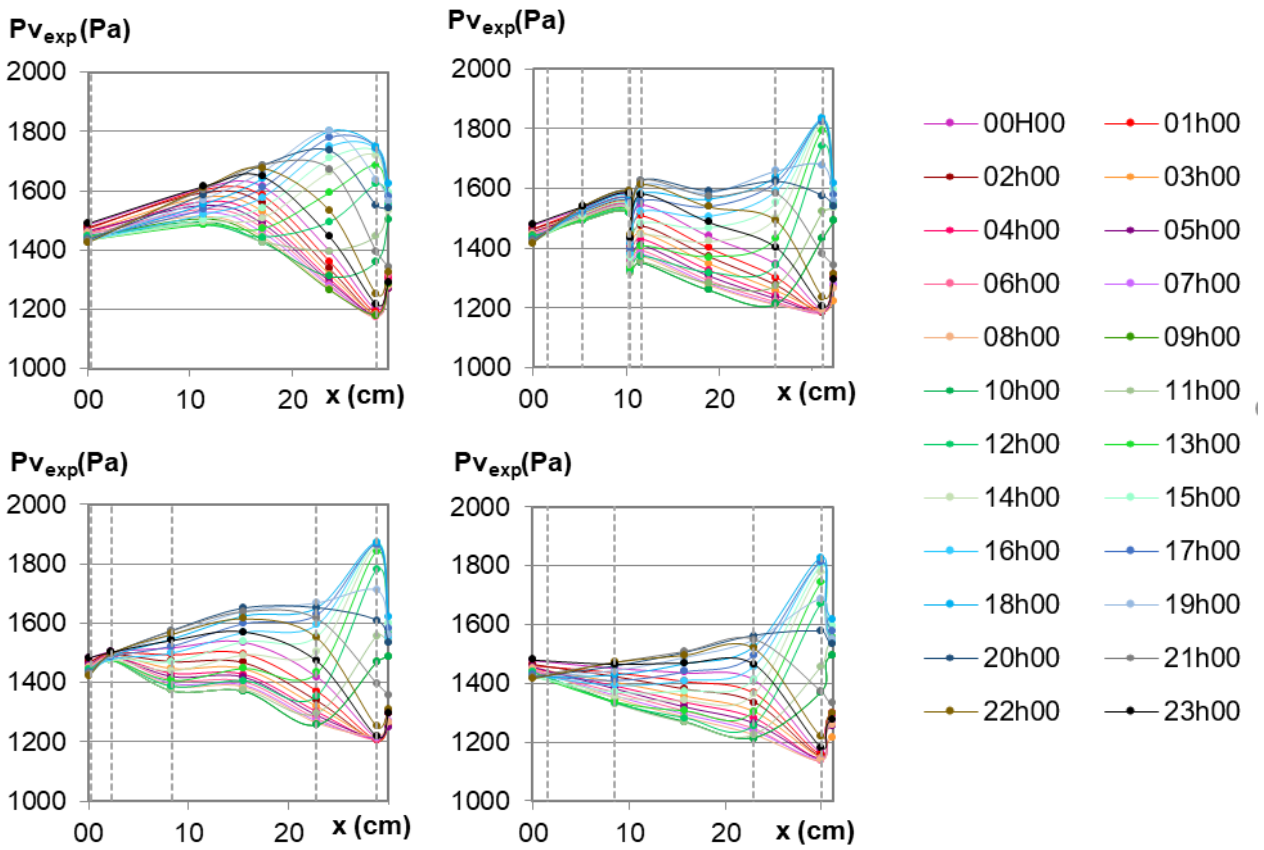


Figure III-43 : Profils de pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza

La Figure III-44 donne les paramètres thermiques dynamiques des quatre parois. Ces parois n'ayant pas les mêmes épaisseurs l'axe des abscisses donne la position par rapport à la surface extérieure et correspond donc à la différence entre l'épaisseur e de la paroi et la position x du capteur. De façon générale, les déphasages sur l'épaisseur de la paroi sont sur la même tendance, avec des valeurs légèrement supérieures pour celui de la paroi terre-chanvre. Les variations relatives d'amplitudes présentent également une évolution comparable, avec des valeurs généralement plus faibles pour la paroi terre-chanvre. Ainsi, la paroi terre-chanvre a une inertie légèrement plus importante que celle des autres parois, qui sont similaires entre elles.

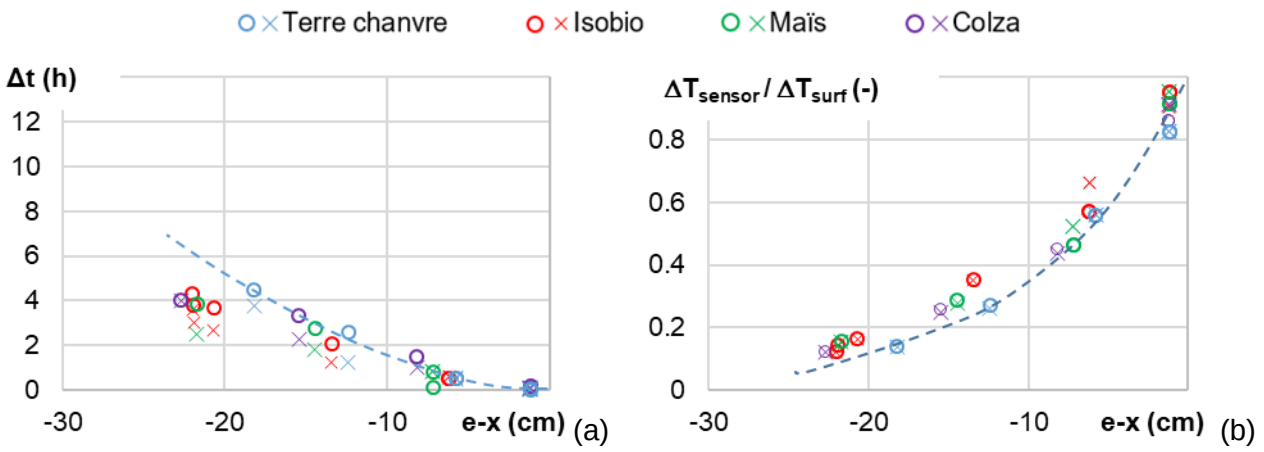


Figure III-44 : Paramètres thermiques dynamiques en fonction de l'emplacement par rapport à la sollicitation en ambiance extérieure pour les différentes parois sans ensoleillement (x/o : calculé pendant le palier de température croissant/décroissant) : (a) Déphasage de la température, (b) Variation relative de l'amplitude de température.

III.5.2.2 Flux de chaleur

La variation des flux de chaleur sur les surfaces intérieures et extérieures sous les variations cycliques quotidiennes montre les mêmes tendances pour toutes les parois (Figure III-45). Le flux de chaleur se répète au cours des cycles. Sur la surface intérieure, le flux de chaleur est très faible. Sur la surface extérieure, le flux de chaleur est induit par la variation de la température extérieure, avec un pic de flux de chaleur lors du changement de consigne. Il entre dans la paroi le jour, et sort la nuit. A la fin du palier haut du cycle journalier, la densité du flux de chaleur entrant dans la paroi est d'environ 5 W/m² pour la paroi terre-chanvre et 3 W/m² pour les autres parois, en accord avec les résistances thermiques des parois.

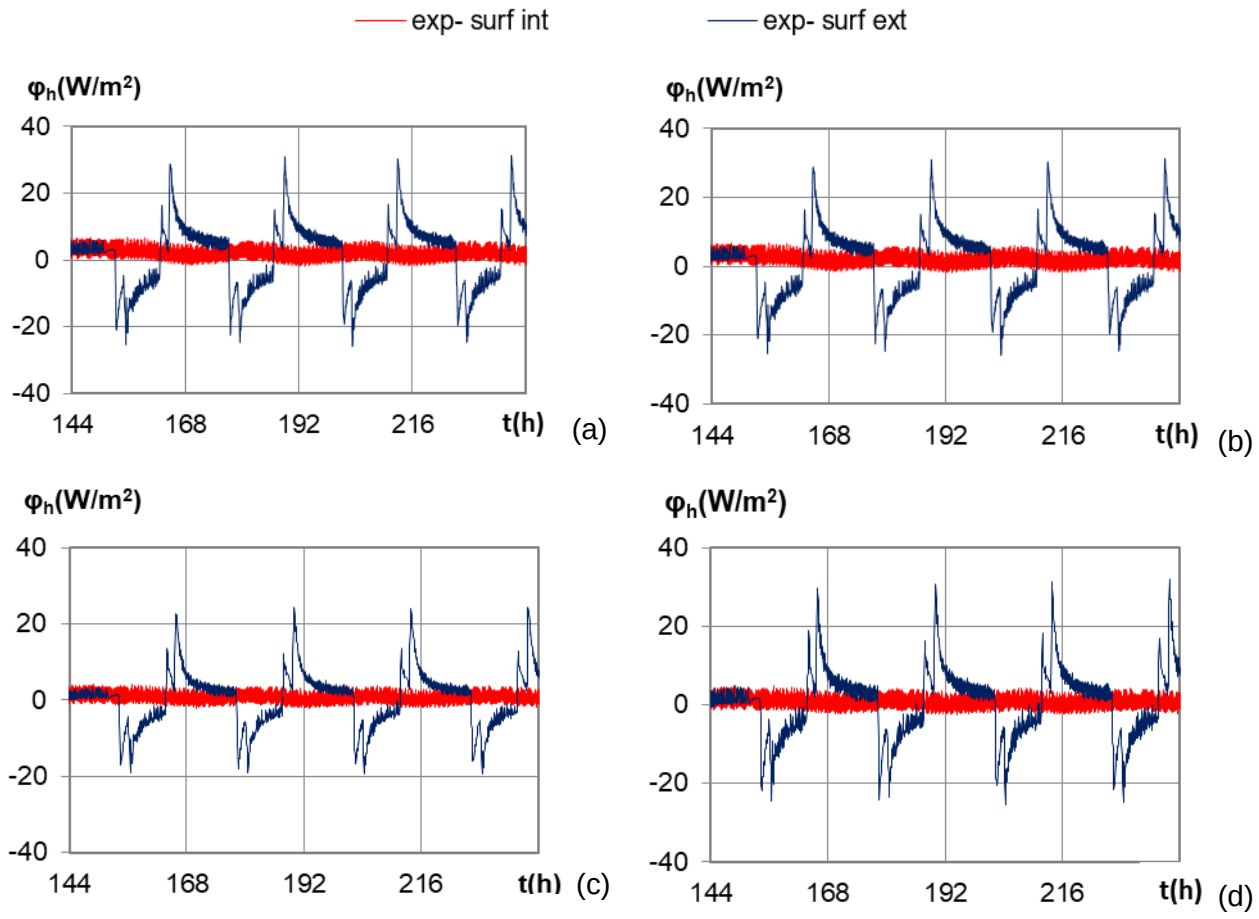


Figure III-45 : Flux de chaleur expérimentaux sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers des parois : (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza

III.5.2.3 Stockage et déstockage de chaleur

La Figure III-46 donne la chaleur entrante et sortante calculée par intégration des flux sur chaque surface et le total des deux surfaces.

En surface intérieure, la quantité de chaleur stockée est la plus forte pour la paroi terre-chanvre, la plus faible pour la paroi Colza et équivalente pour les parois Isobio et Maïs. Inversement, la quantité de chaleur déstockées est la plus forte pour la paroi Colza, la plus faible pour la paroi Isobio et proches pour les parois Isobio et Maïs. Les écarts entre les chaleurs entrantes et sortantes en surface intérieure sont compris entre 3 Wh/m² pour la paroi Colza et 44 Wh/m² pour la paroi terre-chanvre.

En surface extérieure, les chaleurs entrante / sortante sont plus importantes qu'en surface intérieure pour toutes les parois du fait des sollicitations correspondant aux variations de températures d'un climat estival. Les quantités de chaleur déstockées sont supérieures à celles stockées en raison des nuits froides. Comme en surface intérieure, les chaleurs stockées / déstockées sont les plus importantes pour la paroi terre-chanvre et les plus faible pour la paroi Colza, avec de valeurs intermédiaires équivalentes pour les paroi Maïs et Isobio. Les écarts entre les

chaleurs entrantes et sortantes en surface extérieure sont compris entre 16 Wh/m² pour les parois Maïs et Colza et 41 Wh/m² pour la paroi terre-chanvre.

Ainsi, les totaux des chaleurs stockées / déstockées en surfaces intérieure et extérieure sont les plus importants pour la paroi terre-chanvre et les plus faibles pour la paroi Colza. Les bilans sont proches et quasiment nuls sur toutes les parois, à l'exception de la paroi Colza qui présente un déficit de 13 Wh/m².

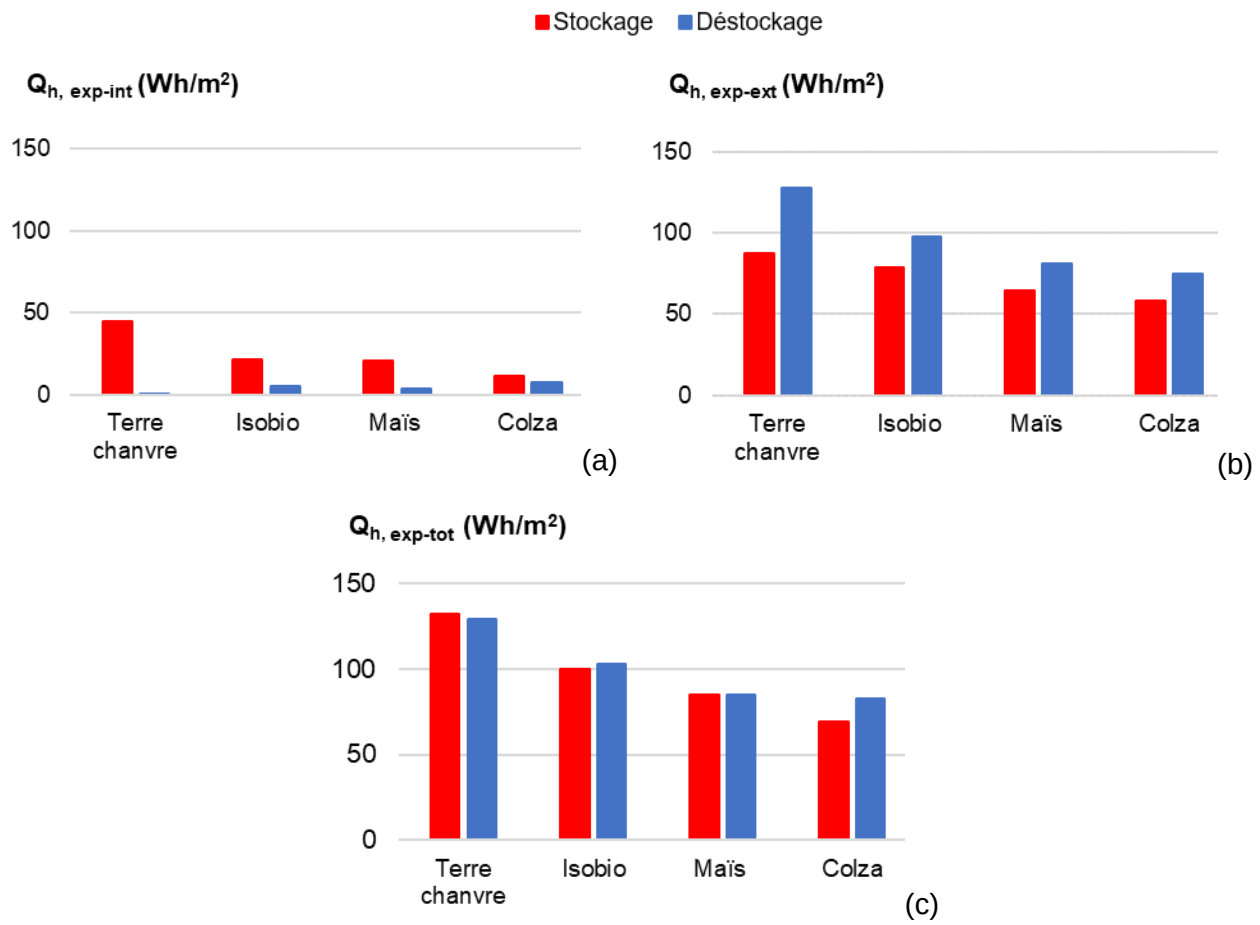


Figure III-46 : Chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle :résultats expérimentaux, (a) surface intérieure, (b) surface extérieure, (c) total des deux surfaces

III.5.3 Sollicitations cycliques - été avec ensoleillement

III.5.3.1 Profils

L'évolution horaire des profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur au cours du dernier cycle sont présentés Figure III-47, Figure III-48 et Figure III-49 pour toutes les parois.

Au cours de la journée, sur la surface intérieure de la paroi, la température, l'humidité relative et la pression de vapeur sont quasi-constantes alors que sur la surface extérieure, elles évoluent en fonction des points de consigne.

Pour toutes les parois, la prise en compte de l'ensoleillement conduit à une augmentation de la température moyenne sur toute l'épaisseur de la paroi, avec un élargissement du faisceau d'autant plus marqué du côté extérieur de la paroi. En surface extérieure, les températures maximales atteignent environ 32°C et les minimales 15°C. La paroi Isobio présente le faisceau de température le plus large sur le tiers extérieur de la paroi. Les parois Maïs et Colza présentent des faisceaux similaires. La paroi en terre-chanvre présente un faisceau plus fin que les autres parois, en particulier au cœur du mur et sur la moitié intérieure. Ceci est dû à une inertie légèrement plus forte.

L'humidité relative reste inférieure à 100% sur l'ensemble des parois. Pour la paroi terre-chanvre, l'allure du faisceau reste la même, avec un déplacement du point haut, autour de 70%, vers la mi-épaisseur. Pour la paroi Maïs, de façon générale, l'humidité relative augmente jusqu'à la mi-épaisseur puis diminue. Le gradient d'humidité relative s'inverse ensuite dans le panneau de PVA-Chanvre côté extérieur. Pour la paroi Colza, l'humidité relative augmente également sur l'épaisseur et le gradient s'inverse au cours du cycle dans le panneau de Colza extérieur. Enfin, pour la paroi Isobio, l'humidité relative au cœur de la paroi augmente et présente un point haut en arrière de l'ensemble membrane Intello-OSB (60 à 70 % au lieu de 55 à 60 % sans soleil). De part et d'autre de la mi-épaisseur, le gradient d'humidité relative s'inverse au cours du cycle et l'humidité relative est décroissante dans le panneau Cavac puis le gradient s'inverse au cours du cycle dans l'enduit extérieur.

En pression de vapeur, pour toutes les parois, la prise en compte de l'ensoleillement conduit à des faisceaux d'allure similaire à ceux obtenus sans ensoleillement, mais plus larges. Les pics observés à proximité de la surface extérieure s'amplifient pour toutes les parois aussi bien en valeur haute qu'en valeur basse (sauf pour la paroi Colza pour la valeur basse). Les valeurs maximales atteintes sont comparables pour les parois terre-chanvre et Isobio, elles sont moins élevées pour la paroi Maïs et plus fortes pour la paroi Colza. Les valeurs minimales sont comparables pour toutes les parois, légèrement supérieures pour la paroi Colza. Enfin, le pic s'élargit pour la paroi Isobio. A proximité de la surface intérieure, les pressions de vapeur sont similaires pour toutes les parois. Pour la paroi Isobio, le faisceau est proche de celui observé sans ensoleillement, il est faiblement élargi et présente des valeurs hautes légèrement plus élevées. L'écart de pression de vapeur de part et d'autre de l'ensemble membrane-OSB met clairement en évidence l'effet de celui-ci sur la propagation de l'humidité. Pour la paroi terre-chanvre, comme dans le cas sans ensoleillement, l'évolution de la pression de vapeur sur le tiers de l'épaisseur côté intérieur est croissante sur toute la journée, mais avec un faisceau plus large et des valeurs basses nettement plus élevées. Pour la paroi Colza, le faisceau devient croissant sur le tiers intérieur du mur, avec des valeurs basses nettement plus élevées et le bas du faisceau qui devient constant et non plus décroissant. Pour la paroi Maïs, aussi bien dans la couche en résidus de rafles de maïs que dans la couche PVA-Chanvre, les gradients de pression s'inversent au cours de la journée, mais ceci à des instants différents, ce qui conduit à une amplitude de pression de vapeur faible au niveau de l'interface entre ces deux couches. Il est probable que cela soit dû à un amortissement au sein de la couche en rafle de maïs du fait de sa forte capacité de régulation hygrique, comme vu au chapitre 1. Au cœur de la paroi, les faisceaux de pression de vapeur se sont élargis, les valeurs basses restent similaires à celles sans ensoleillement pour la paroi Maïs et deviennent plus élevées pour les autres parois. Les faisceaux des parois Maïs et Colza sont similaires avec des inversions de gradient au cours de la journée. Les valeurs basses du faisceau de la paroi Colza sont devenues comparables à celles de la paroi Maïs. La paroi terre-chanvre présente le faisceau de pressions de vapeur le plus resserré, avec des inversions de gradient, et des valeurs minimales plus élevées que pour les autres parois. Pour la paroi Isobio, l'amplitude de pression de vapeur au cœur du Biofib Trio est particulièrement amplifiée par la prise en compte de l'ensoleillement, avec des inversions de gradients au cours de la journée. Au bilan, la prise en compte de l'ensoleillement conduit à une amplification des phénomènes hygriques au sein des parois, ce qui contribue à mettre en évidence les points particuliers tels que les phénomènes de sorption-désorption ou le blocage du flux d'humidité au niveau de l'ensemble membrane Intello - OSB.

Les paramètres caractéristique du point de vue thermique dynamique sont présentés Figure III-50. Comme dans le cas sans ensoleillement, l'évolution du déphasage et de l'amortissement en fonction de la position montre la même tendance pour les quatre parois, avec des déphasages les plus longs et des amortissements les plus importants pour la paroi terre-chanvre.

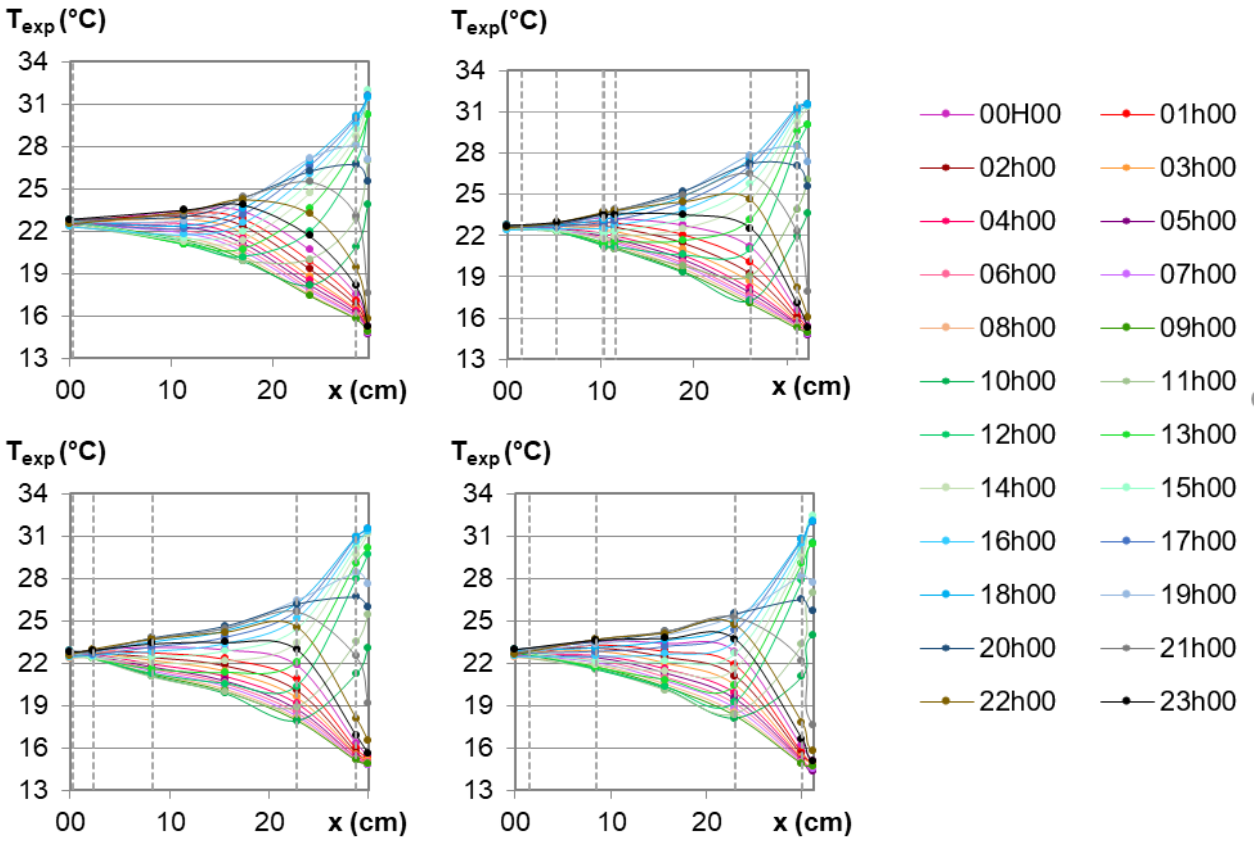


Figure III-47 : Profils de température pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique avec ensoleillement (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza.

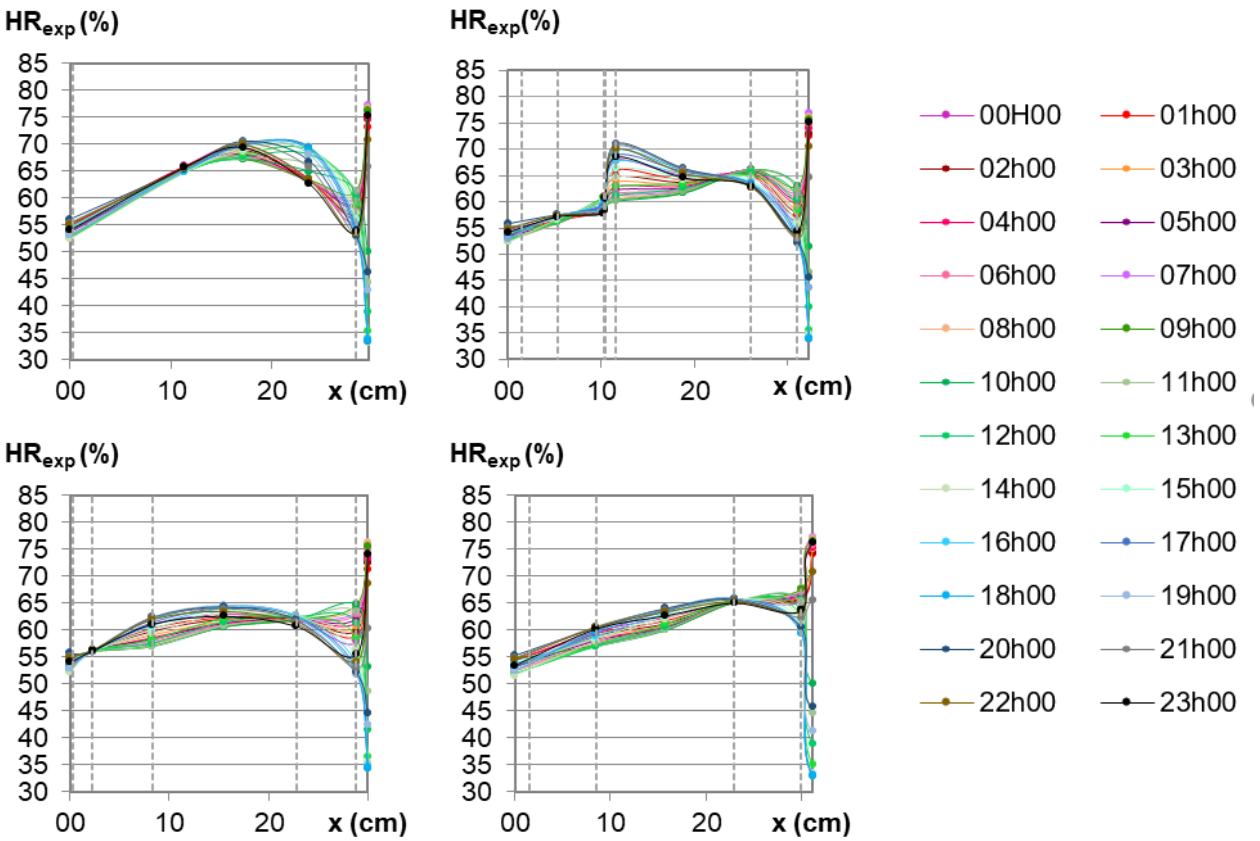


Figure III-48 : Profils d'humidité relative pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique avec ensoleillement (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza.

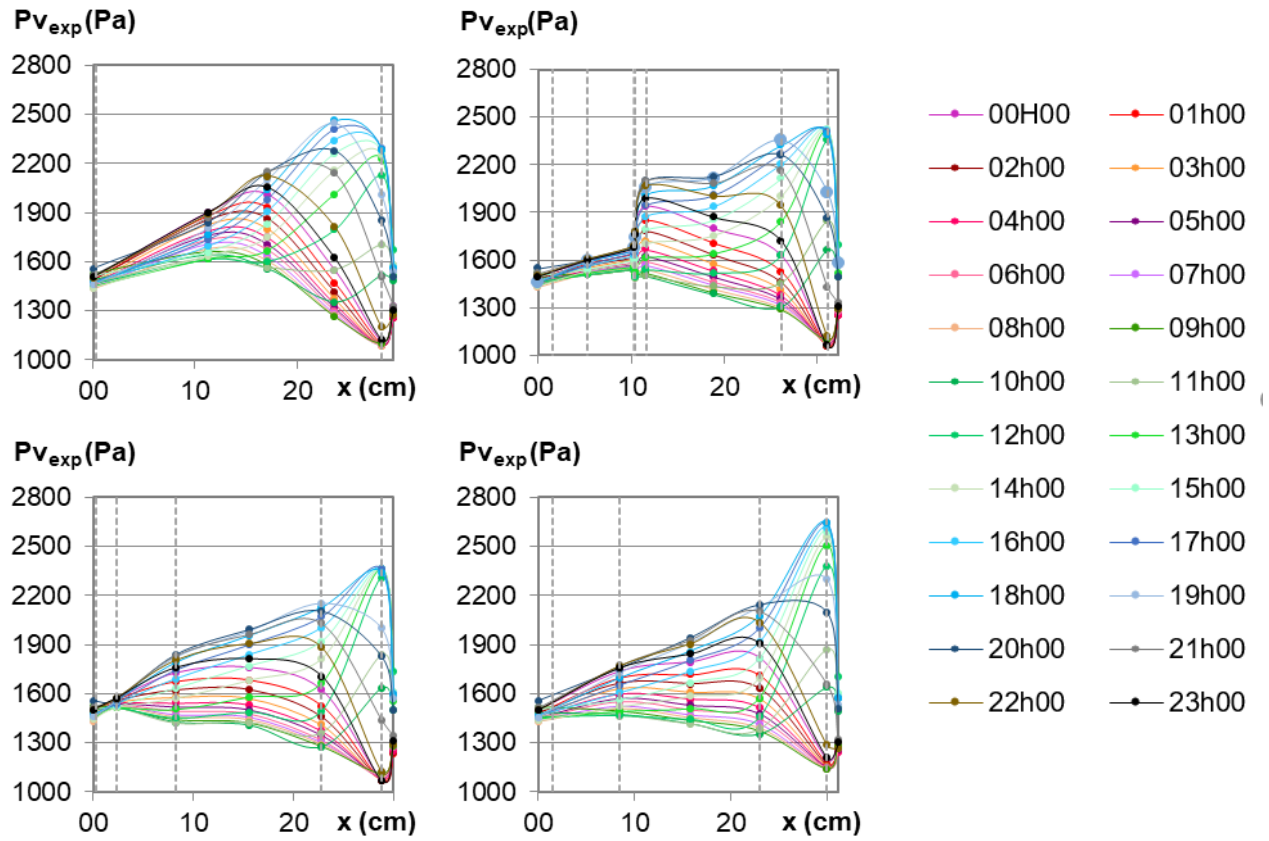


Figure III-49 : Profils de la pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique avec ensoleillement, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza.

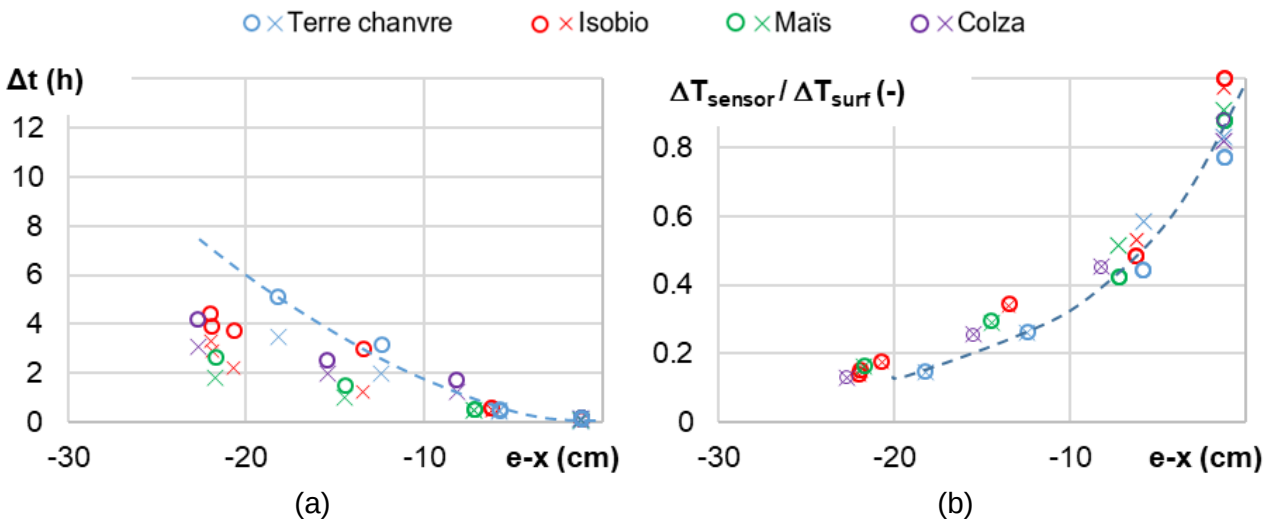


Figure III-50 : Paramètres thermiques dynamiques en fonction de l'emplacement par rapport à la sollicitation en ambiance extérieure pour les différentes parois avec ensoleillement (x/o : calculé pendant le palier de température croissant/décroissant) : (a) Déphasage de la température, (b) Variation relative de l'amplitude de température.

III.5.3.2 Flux de chaleur

La Figure III-51 présente l'évolution des flux de chaleur sur les surfaces intérieures et extérieures de toutes les parois sous les variations cycliques quotidiennes, avec ensoleillement. Sur la surface intérieure, le flux de chaleur reste très faible. Sur la surface extérieure, comme dans le cas de l'étude sans ensoleillement, le flux de chaleur se répète au cours des cycles mais présente une amplitude beaucoup plus forte, avec des valeurs au pic deux fois plus importante et des valeurs en fin de palier environ trois fois plus importantes (15 W/m² pour la paroi terre-chanvre et 12, 10, 8 W/m² pour les parois Isobio, Maïs et Colza respectivement).

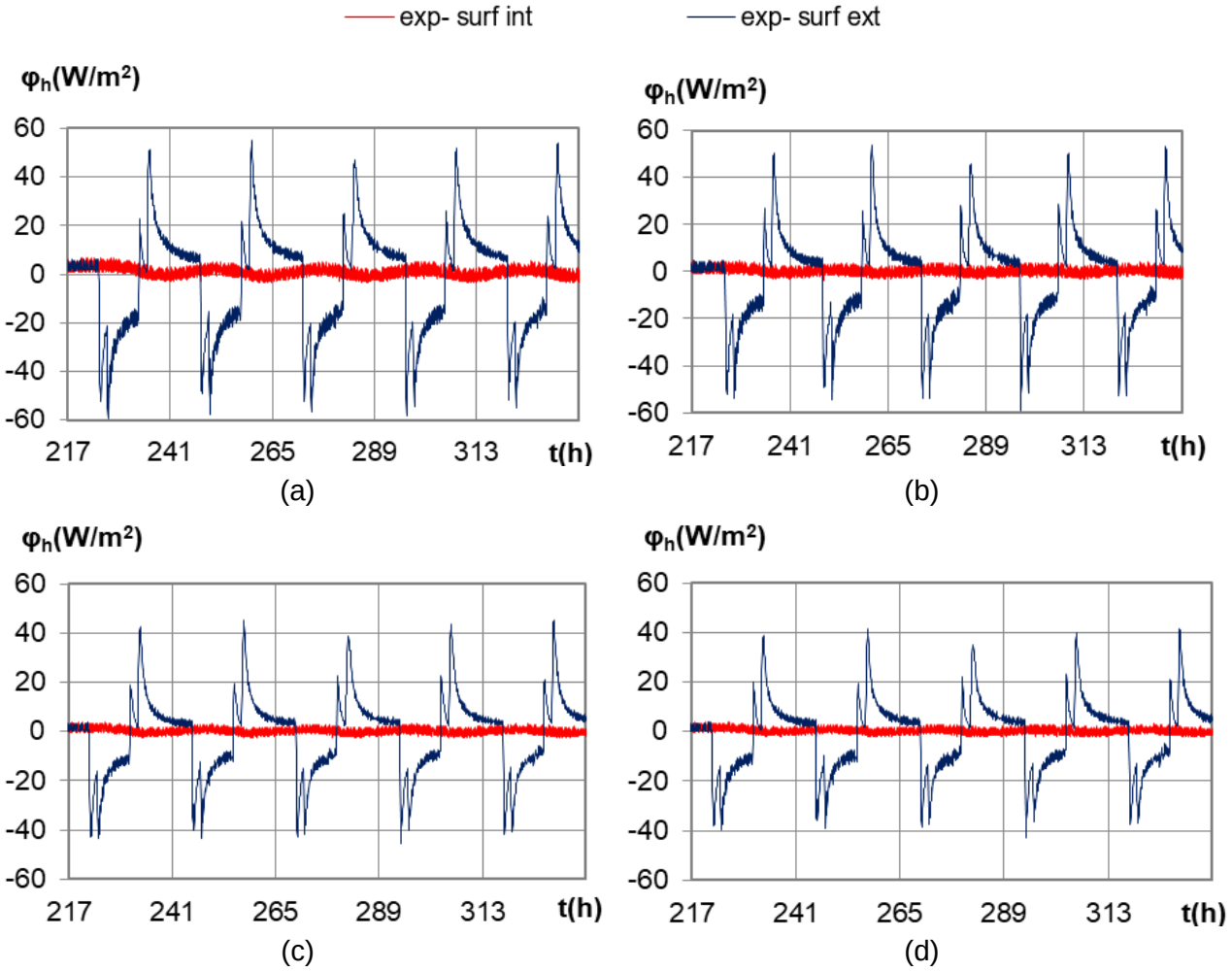


Figure III-51 : flux de chaleur expérimentaux sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers des parois : (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza.

III.5.3.3 Stockage et déstockage de chaleur

Les Figure III-52 présente les chaleurs entrantes et sortantes calculées par intégration des flux sur chaque surface et le total des deux surfaces pour toutes les parois.

En surface intérieure, les quantités de chaleur stockées et déstockées sont comparables à celles sans ensoleillement, voire inférieure du fait d'une température de paroi plus élevée. Le flux de chaleur provenant de l'extérieur, même avec ensoleillement, atteint très peu le côté intérieur de la paroi et ne constitue donc pas un apport par la paroi opaque.

En surface extérieure, les échanges sont plus importants avec la prise en compte de l'ensoleillement. Les quantités de chaleur stockées sont multipliées par 3 pour la paroi terre-chanvre, et environ 2,5 pour les parois Isobio, Maïs et Colza. Les quantités déstockées sont multipliées par 1,2 pour la Terre chanvre, et environ 1,7 pour les autres parois. Toutes les parois stockent plus de

chaleur qu'elles n'en déstockent. La quasi-totalité de la chaleur stockée à travers la surface extérieure y est également déstockée pour les parois Isobio, Maïs et Colza. Au total, le bilan est faiblement positif pour les parois Maïs (18 Wh/m²), Colza (18 Wh/m²) et Isobio (32 Wh/m²), légèrement supérieur au cas sans ensoleillement. Pour la paroi terre-chanvre, la prise en compte de l'ensoleillement conduit à un bilan positif de 154 Wh/m², au lieu de 3 Wh/m² sans ensoleillement.

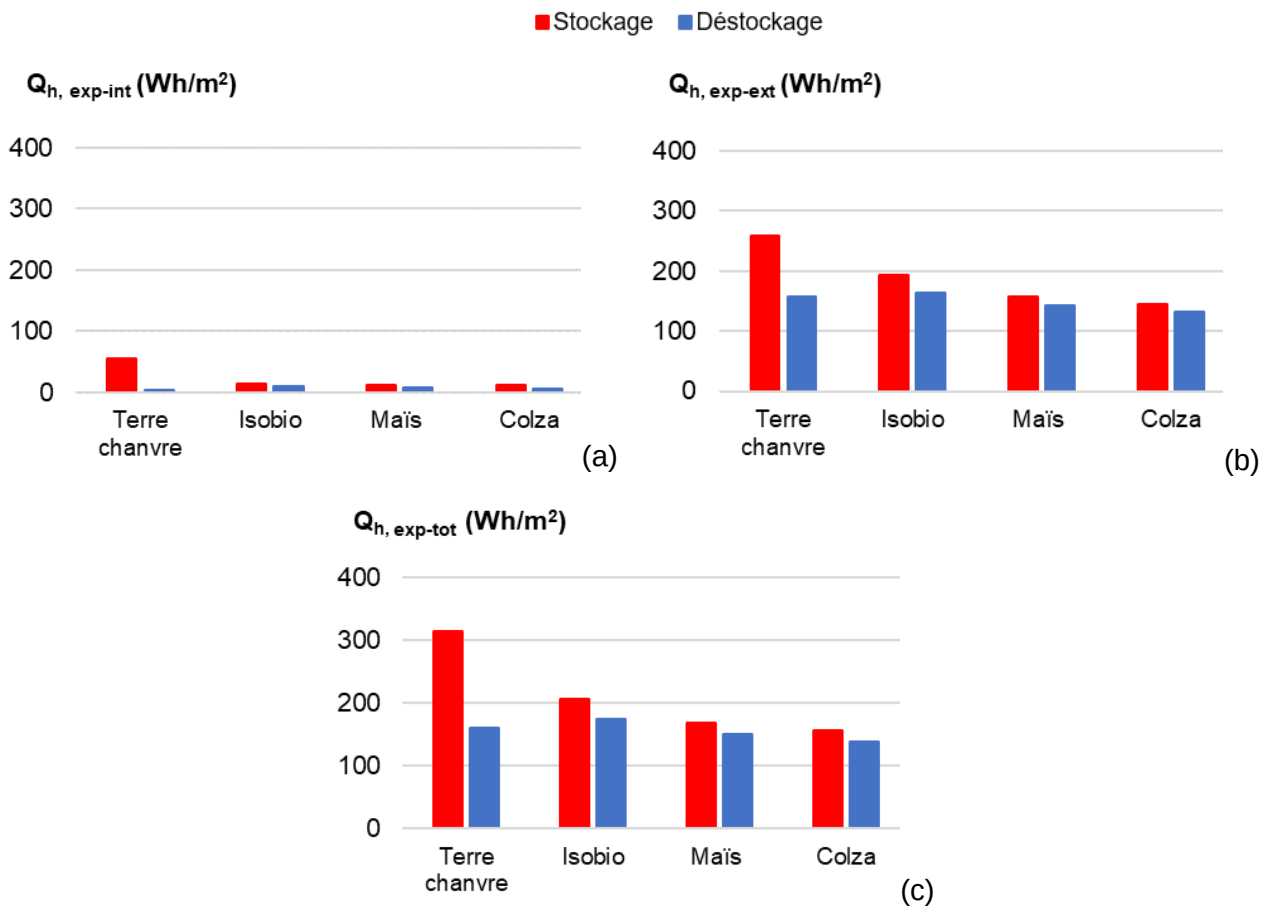


Figure III-52 : Chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle : résultats expérimentaux, (a) surface intérieure, (b) surface extérieure, (c) total des deux surfaces

III.5.4 Sollicitations cycliques -été avec une sollicitation hygrique en ambiance intérieure

III.5.4.1 Profils

Les profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur sont présentés chaque heure pendant le dernier jour de l'étude dynamique respectivement sur les Figure III-53, Figure III-54 et Figure III-55.

Le profil de température présente une allure similaire à celui observé sans pic hygrique pour l'ensemble des parois, comme vu pour la paroi terre-chanvre. Toutefois, le faisceau est légèrement plus large sur le tiers intérieur de chaque paroi, avec des valeurs minimales plus basses liées à des températures ambiantes intérieures qui diminuent la nuit du fait de la régulation associée à la déshumidification.

De nouveau, l'humidité relative reste inférieure à 100% sur toute l'épaisseur de la paroi pour les quatre parois montrant l'absence de risque de condensation interne. Le profil d'humidité relative est impacté du côté intérieur de la paroi, dans les 10 premiers centimètres pour la paroi terre-chanvre (absence de capteur entre la surface et cette profondeur), et dans l'épaisseur des panneaux intérieurs pour les trois autres parois (paille compressée pour la paroi Isobio, résidus de rafles de maïs pour la paroi Maïs, et panneau de colza pour la paroi Colza).

Le profil de pression de vapeur reste similaire à celui observé sans pic hygrique sur le tiers extérieur du mur, avec des valeurs basses du faisceau plus basses pour la paroi Maïs.

Côté intérieur, pour l'ensemble des parois, le faisceau présente une amplitude maximale en surface, identique pour toutes les parois en lien avec la sollicitation. L'évolution du faisceau diffère selon les parois. Il atteint une amplitude minimale à différentes positions : aux alentours de 10 cm de profondeur pour la paroi terre-chanvre, derrière le panneau de paille compressée pour la paroi Isobio, derrière le panneau de Colza pour la paroi Colza et derrière la couche de résidus de rafles de maïs pour la paroi Maïs. Les profondeurs de pénétrations sont liées aux propriétés hygriques des matériaux. Les matériaux classés excellents régulateurs hygriques (résidus de rafles de maïs, panneau de colza et terre-chanvre) conduisent à un fort effet tampon hygrique alors que les matériaux présentant un facteur de résistance à la vapeur plus élevé limitent le flux d'humidité (panneau de paille compressée).

Derrière le panneau de paille compressée, le faisceau de pression de vapeur rejoint progressivement les valeurs sous sollicitation sans pic hygrique.

Au cœur de la paroi, le faisceau de pression de vapeur reste inchangé pour la paroi Isobio comparativement au cas sans sollicitation hygrique. Pour les autres parois, il reste comparable avec des valeurs basses du faisceau légèrement plus faibles du fait du déstockage de l'humidité pendant la période à basse humidité relative.

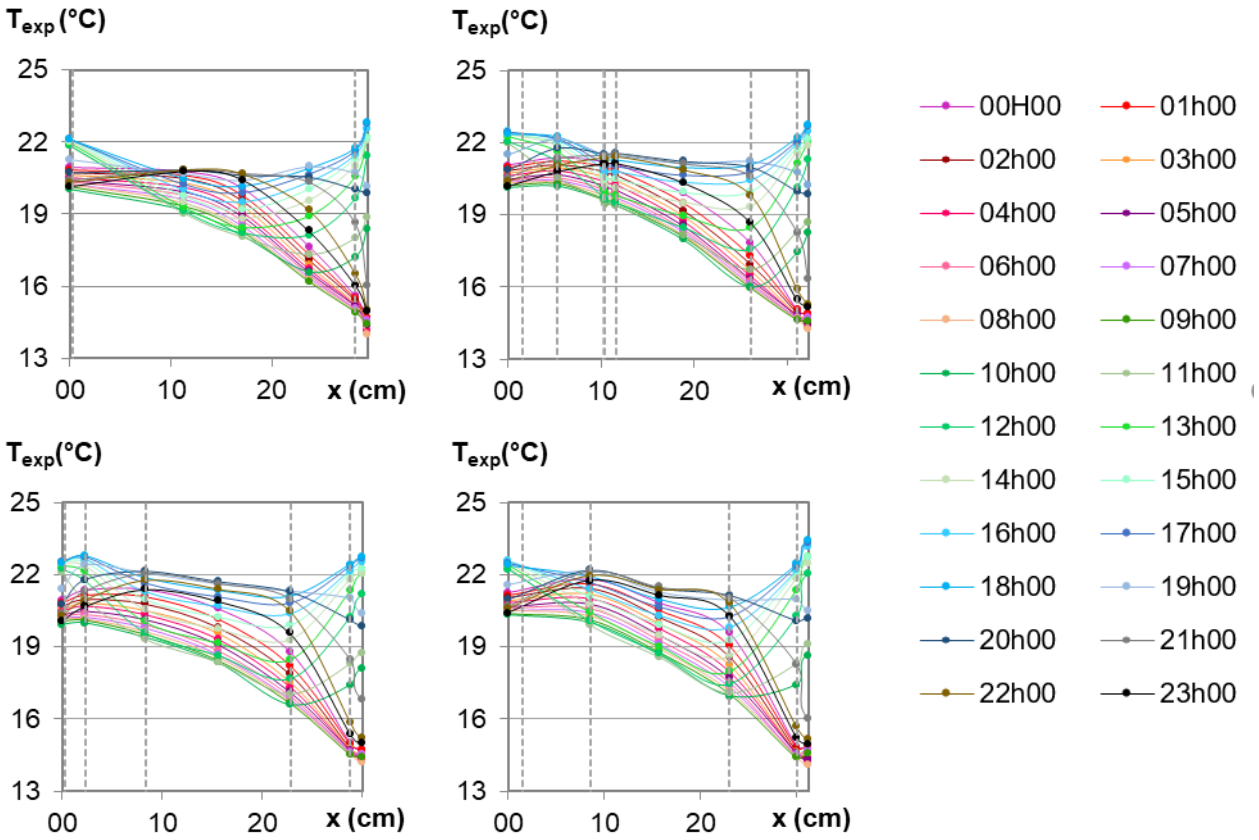


Figure III-53 : profils de la température pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza

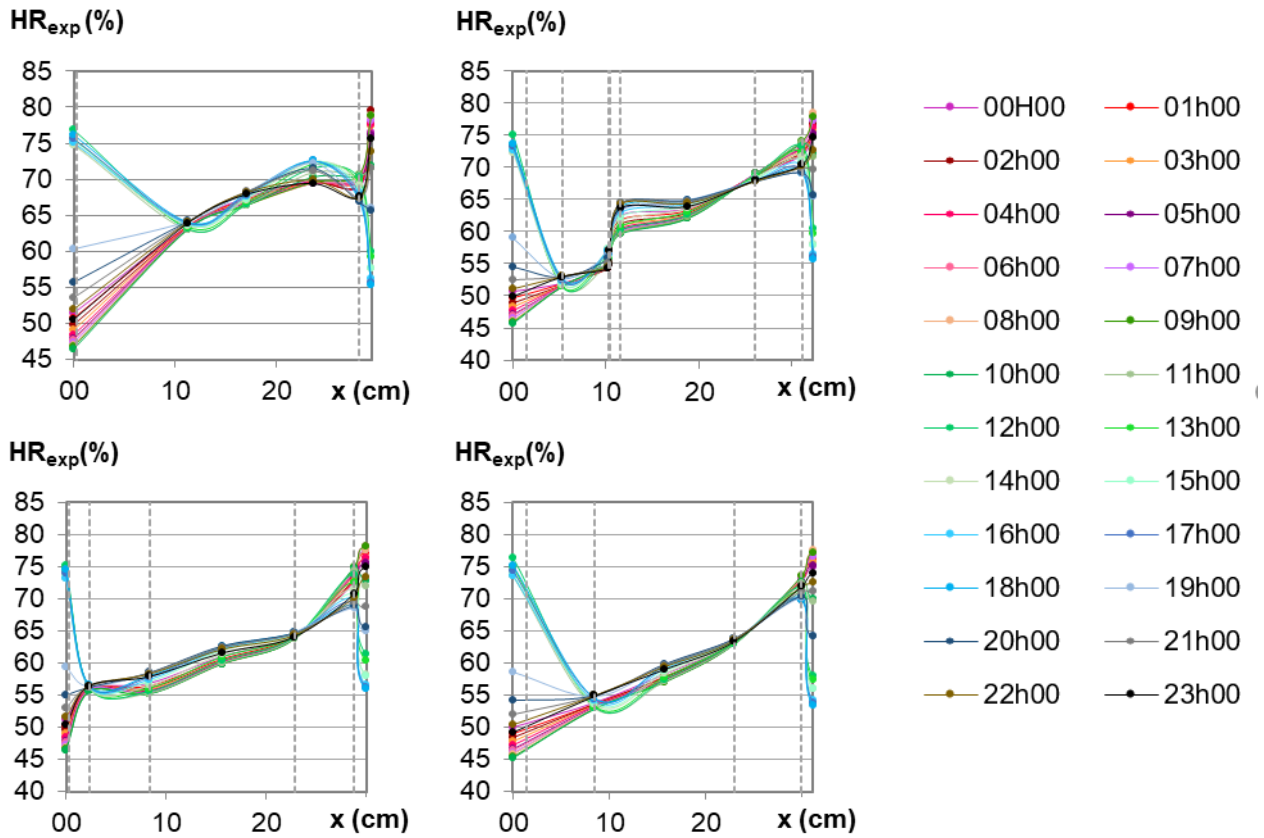


Figure III-54 : profils d'humidité relative pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza.

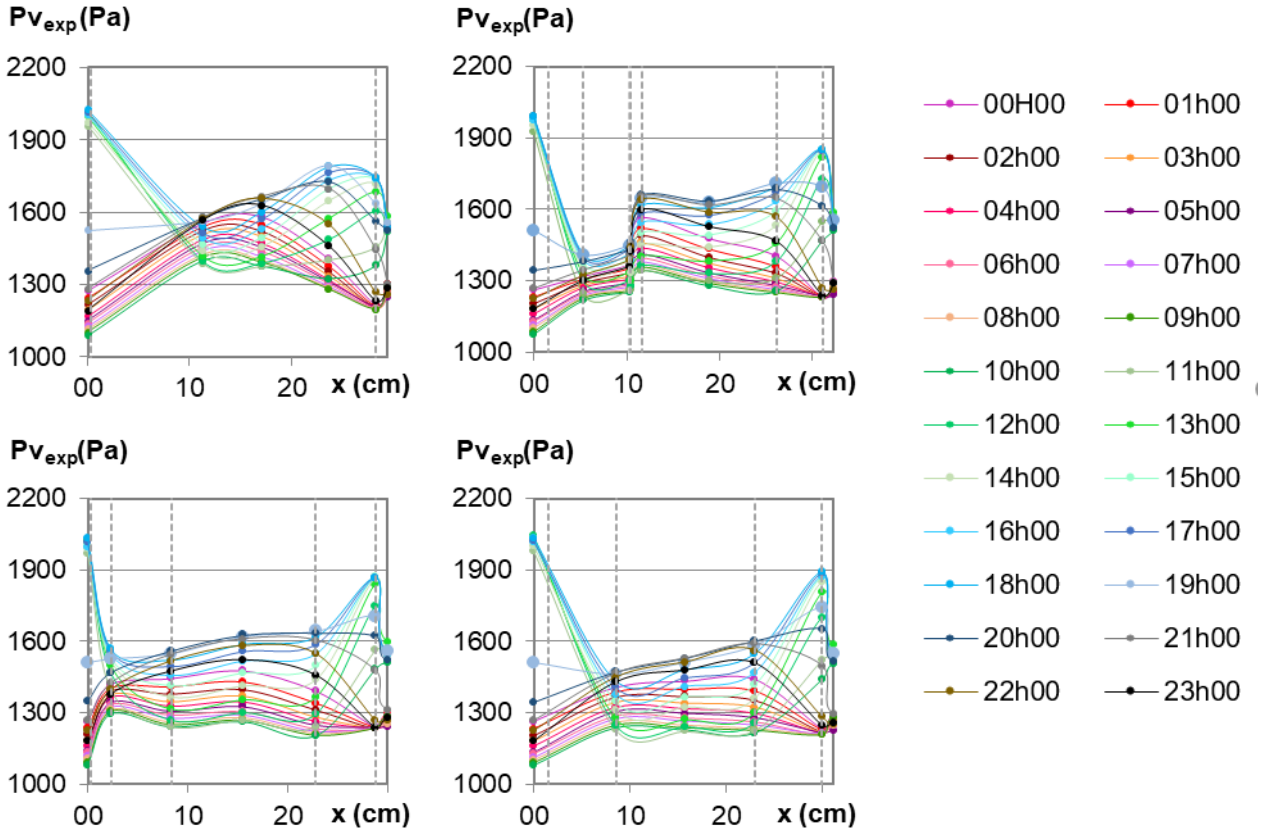


Figure III-55 : profils de la pression de vapeur pendant le dernier jour de la phase de sollicitation dynamique pour les parois, (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza.

III.5.4.2 Flux de chaleur

La Figure III-56 donne l'évolution des flux de chaleur sur les surfaces intérieures et extérieures du mur sous les variations cycliques quotidiennes.

Pour le côté extérieur, le flux de chaleur les évolutions quotidiennes sont comparables à celles obtenues sans cycles hygriques.

Pour le côté intérieur, le flux de chaleur présente des valeurs légèrement positives du fait de la remontée en température de l'ambiance suite à l'arrêt du groupe froid pour la déshumidification conduisant au réchauffement du mur.

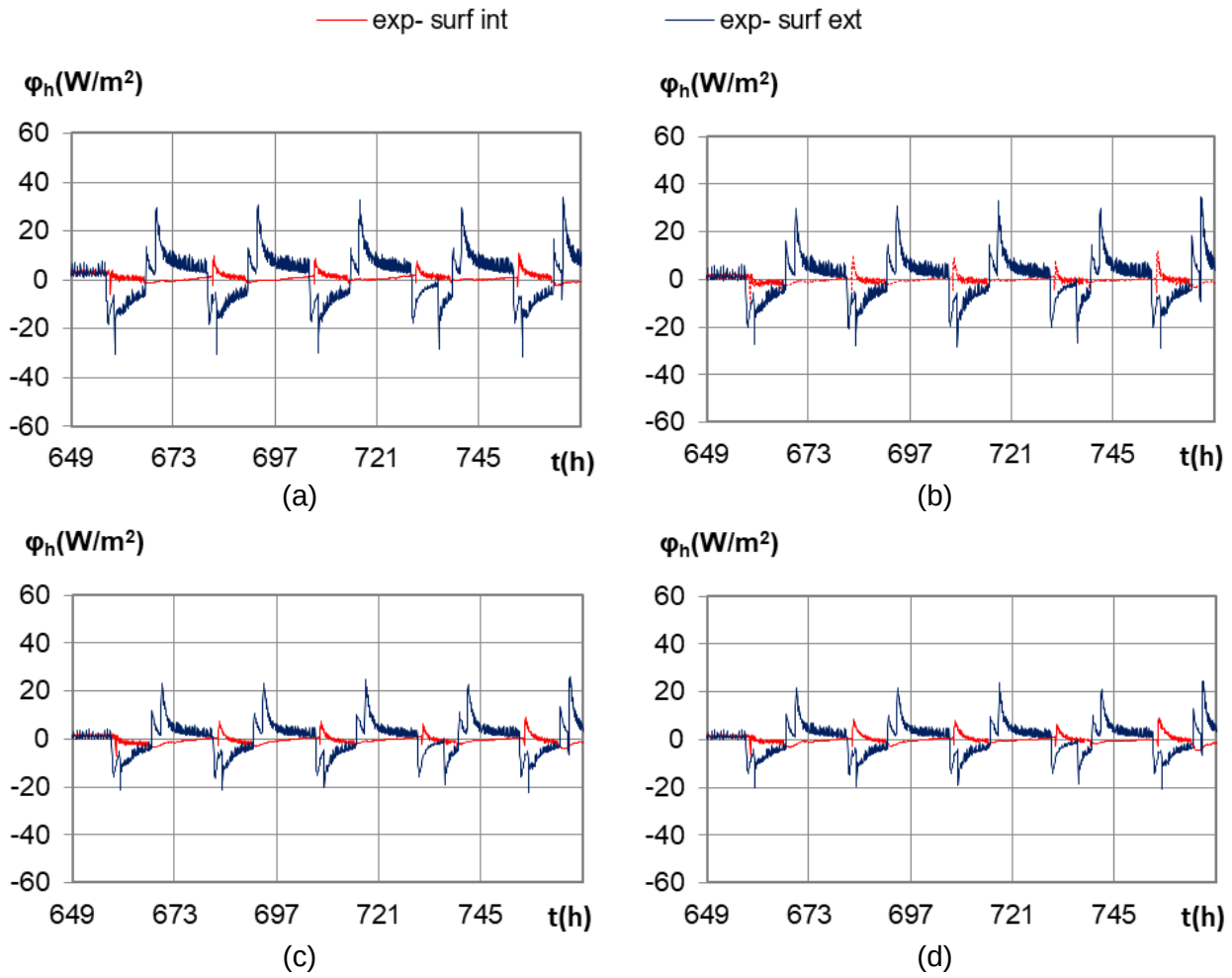


Figure III-56 : flux de chaleur expérimentaux sur les surfaces intérieures et extérieures au cours des cycles journaliers des parois : (a) paroi terre chanvre (b) Paroi Isobio et (c) Paroi Maïs (d) Paroi Colza.

III.5.4.3 Stockage et déstockage de chaleur

La Figure III-57 donne les chaleurs entrantes et sortantes calculées par intégration des flux sur chaque surface et le total des deux surfaces pour toutes les parois.

Du fait de la variation de température induite par la régulation de l'humidité ambiante, les quantités de chaleur stockées en surface intérieure sont plus faibles et celles déstockées sont plus forte. Pour la même raison, les parois étant légèrement plus froides que dans le cas sans sollicitation hygrique, les quantités de chaleurs stockées / déstockées en surface extérieure augmentent / diminuent très légèrement.

Au total, comparativement au cas sans sollicitation hygrique, les quantités de chaleurs déstockées sont comparables et celles stockées sont légèrement plus faibles du fait de la régulation. Au bilan, pour chaque paroi, les quantités de chaleur déstockées sont supérieures à celles stockées.

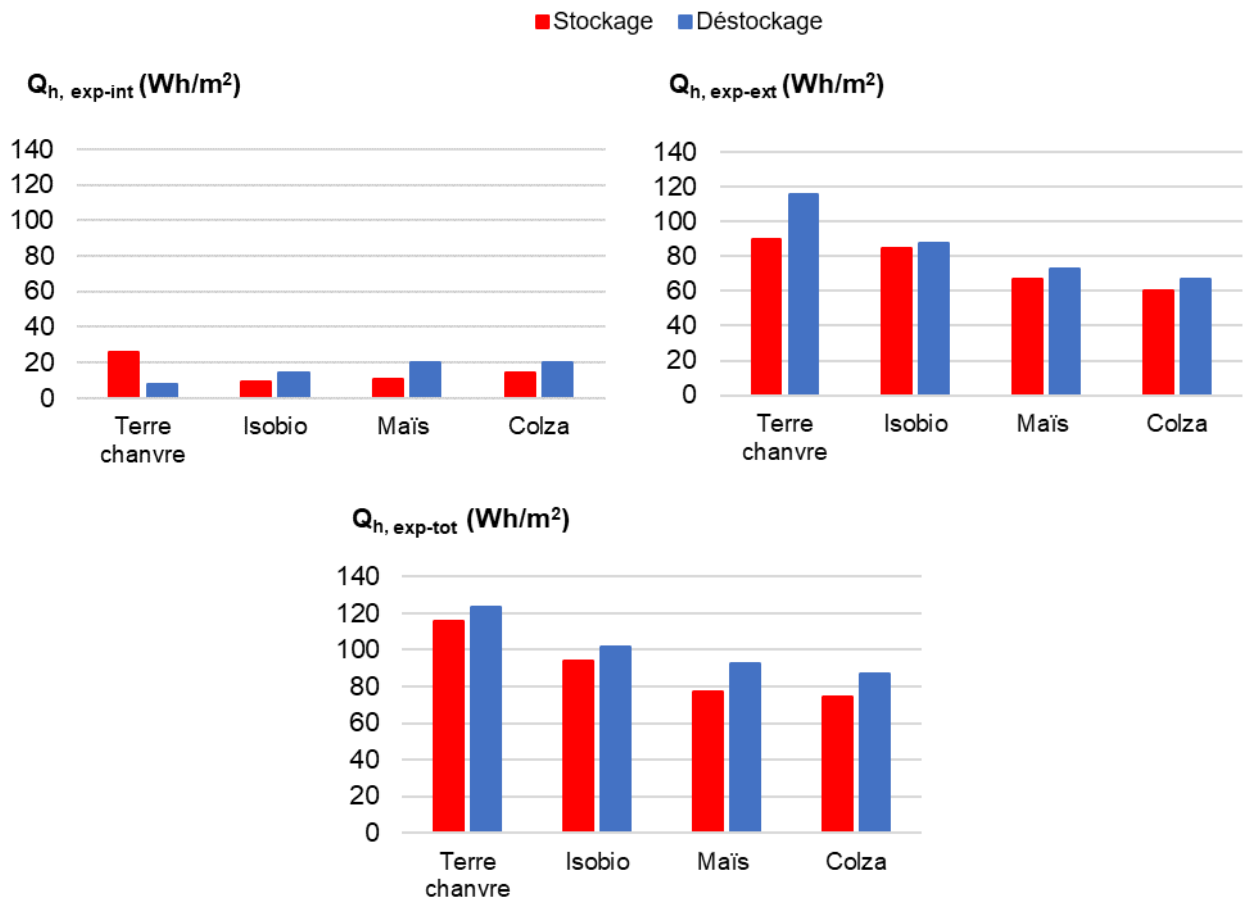


Figure III-57 : chaleur entrante et sortante pendant le dernier cycle : (a, b, c) résultats expérimentaux, (a) surface intérieure, (b) surface extérieure, (c) total des deux surfaces

III.6 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats de l'étude du comportement hygrothermique de parois en matériaux bio-sourcés sous différentes sollicitations : une paroi terre-chanvre, une paroi correspondant à la solution technique du projet européen Isobio, une paroi avec des panneaux de PVA-Chanvre et un parement intérieur en résidu de rafles de maïs enduit, une paroi avec des panneaux de Colza.

Dans un premier temps, la paroi terre-chanvre est étudiée expérimentalement et numériquement en conditions contrôlées, définies à partir de climats français et tunisiens de mi-saison et d'été, sous gradient constant et sous sollicitations cycliques sans ou avec prise en compte de l'ensoleillement et sans ou avec sollicitation hygrique en ambiance intérieure. Ensuite, son comportement est étudié expérimentalement comparativement à trois autres parois pour l'ensemble des sollicitations correspondant au climat de Rennes.

Le comportement hygrothermique de la paroi est analysé à partir des cinétiques et des profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur. Les résistances thermiques de conduction et hygrique de la paroi sont identifiées sous gradients de température et de pression de vapeur constants. Le comportement en régime dynamique est caractérisé par l'amortissement et le déphasage de température et de pression de vapeur ainsi que par les bilans de flux.

L'étude sous gradient constant de température et de pression de vapeur montre que le temps nécessaire à la stabilisation est plus court en thermique qu'en hygrique. A l'issue de la stabilisation, le calcul de la résistance thermique de conduction à partir des résultats expérimentaux et numériques conduit à des valeurs comparables à la valeur théorique. La résistance thermique de la paroi terre-chanvre est de l'ordre de 2,5 m².K.W^{-1}, celle des autres parois est d'environ 6 m².K.W^{-1} en partie due à la présence d'isolant Biofib Trio ®. La résistance hygrique calculée à partir des

résultats numériques pour la paroi terre-chanvre correspond aux résultats théoriques lorsque la simulation est prolongée jusqu'à atteindre un régime permanent.

Les humidités relatives obtenues dans les différentes conditions montrent qu'il n'y a pas de condensation interne dans aucune des parois.

Les phénomènes de sorption-désorption mis en évidence sont amplifiés par l'augmentation de la température, que celle-ci soit due à une augmentation de la température ambiante ou à la prise en compte de l'ensoleillement.

Les sollicitations thermiques et hygriques en surface extérieure n'atteignent quasiment pas la surface intérieure quelle que soit la paroi considérée. Ainsi, il n'y a pas d'apport pas la paroi opaque en saison estivale.

La sollicitation hygrique en surface intérieure montre l'effet tampon hygrique apporté par les matériaux classés excellents régulateurs hygriques.

L'effet de l'ensemble membrane Intello-OSB est particulièrement visible, avec un blocage du flux de vapeur dans la paroi Isobio.

Au bilan, la bonne inertie thermique et hygrique et l'absence de risque de condensation interne montre la pertinence des parois composées de matériaux bio-sourcés considérées dans les conditions étudiées.

Les résultats numériques sont globalement satisfaisants, particulièrement en thermiques mais avec quelques écarts en hygrique. Toutefois, ils permettent d'évaluer globalement le comportement de la paroi.

Tous ces résultats sont traités sous des conditions climatiques d'été. Ainsi, pour valider pleinement la possibilité d'utiliser ces solutions, une étude complémentaire est nécessaire en conditions hivernales. Le dispositif expérimental ne permettant pas de simuler les climats d'hiver, l'étude serait à réaliser numériquement. Par ailleurs, l'étude in-situ est également une voie pour étudier le comportement hygrothermique des parois sous sollicitations météo et sur différentes saisons. Ce type d'étude fait l'objet du chapitre suivant sur une paroi en béton de chanvre.

Chapitre IV Etude in-situ à l'échelle du bâtiment

Sommaire

IV.1 Présentation de l'étude 128
IV.1.1 Présentation du bâtiment étudié 128
IV.1.2 Métrologie mise en place : mesures de température et d'humidité relative au sein des parois et en ambiance 129
IV.1.3 Climat de HEUDREVILLE (Eure) 132
IV.1.4 Consignes de chauffage 135
IV.2 Fonctionnement de la métrologie et validation des mesures 135
IV.2.1 Validation de la métrologie sur les ambiances extérieures 135
IV.2.2 Homogénéité de l'ambiance intérieure 136
IV.3 Résultats en saison d'été 138
IV.3.1 Réponse thermique du béton de chanvre en saison d'été 138
IV.3.2 Réponse hygrique du béton de chanvre en saison d'été 142
IV.3.3 Ambiance intérieure et confort en saison d'été 146
IV.4 Résultats en saison d'hiver 147
IV.4.1 Réponse thermique du béton de chanvre en saison d'hiver 148
IV.4.2 Réponse hygrique du béton de chanvre en saison d'hiver 149
IV.4.3 Ambiance intérieure et confort en saison d'hiver 151
IV.5 Conclusion 151

L'étude in-situ est réalisée sur un bâtiment à colombage rénové en béton de chanvre. Cette étude comprend un suivi énergétique du bâtiment, l'analyse du comportement hygrothermique de l'enveloppe et le suivi du confort intérieur. Le suivi est réalisé sur 3 ans, incluant une première année de mise en régime hygrique de l'enveloppe puis 2 années une fois le régime établi. Ce chapitre présente les résultats obtenus en régime établi. L'étude du comportement hygrothermique de l'enveloppe est focalisée sur la partie courante du béton de chanvre pour être comparée aux résultats obtenus sur le composite terre-chanvre en ambiance contrôlée. Les résultats sont détaillés pour la saison d'été puis pour la saison d'hiver.

IV.1 Présentation de l'étude

IV.1.1 Présentation du bâtiment étudié

Le bâtiment étudié (Figure IV-1) est une grange en colombage (12x12 cm^2) destinée à un usage d'habitation. Il est composé d'une pièce d'habitation unique de 47 m² surmontée d'un grenier. Ce bâtiment présente sa façade principale au Sud-Sud Est (- 20° par rapport au sud).

La structure bois reposant sur un soubassement pierre et la couverture en ardoise ont fait l'objet d'une restauration en 2016 dans le respect de l'architecture vernaculaire. Les travaux liés à l'exécution de la dalle, des murs et du plafond en béton de chanvre sont réalisés en plusieurs phases : murs : mai-juin 2017, plancher haut : juillet 2017 enduits extérieurs septembre 2017. Les équipements sont finalisés début 2019. Lafarge France a développé des formulations chaux-chanvre à partir de ses chaux Nathural, Tradibat 85 (formulations Tableau IV-1). La dalle inférieure du bâtiment est réalisée en béton de liège (épaisseur 15 cm sur un hérissonage de 20 cm). Elle est composée de chaux LafargeHolcim Tradibat 85 (HL 5) et de particules de liège 4/8 fournies par l'association « La chaine du liège » - récupération de bouchons de liège. La dalle est couverte pour moitié de carreaux de grès et pour moitié de parquet flottant. Pour les murs (épaisseur 30 cm), le béton de chanvre est mis en place dans des banches en bois de 50 cm de hauteur en lits successifs compactés de 20 cm de haut. Le colombage reste apparent en face externe. La formule utilisée est composée de chaux Nathural® (NHL 3,5) blanche et de chènevotte Kanabat – LCDA. Le mélange chaux chanvre utilisé en plancher supérieur est déposé sur un lit de canisse déroulé sur le solivage (espacement 40 cm) sur une épaisseur de 30 cm et arasé sans tassement au niveau supérieur du contre-solivage. La formulation de ce béton de chanvre repose sur l'utilisation de chaux Tradibat 85 (HL 5) et de chènevotte Kanabat – LCDA. L'enduit extérieur traditionnel en chaux Nathural® (NHL 3,5) sable a été appliqué sur les murs en béton de chanvre, entre les colombages (dosage du corps d'enduit : 300 kg de chaux/m^3 de sable, Finition : 200 kg de chaux/m^3 de sable). L'enduit intérieur est composé de chaux Nathural® (NHL 3,5) et de chènevotte fine. Un poêle à bois ainsi que des convecteurs électriques sont installés pour assurer le chauffage et la préservation du bâtiment. Le renouvellement d'air est assuré par un extracteur simple, les apports d'air se faisant sous les portes. Le bâtiment est inoccupé et n'est donc pas soumis aux variations de charge liées aux apports internes de chaleur et d'humidité.

Figure IV-1 : Façade principale (Sud-sud est) du bâtiment avant et après rénovation

Tableau IV-1 : Dosage des mortiers et bétons de chanvre

Dosages pour 1 m³	Dalle	Murs	Plancher haut	Enduits intérieurs
Chaux	230 kg	330 kg	200 kg	700 kg
Chènevotte ou Liège sable	670 L Liège 330 kg Sable	100 kg	100 kg	100 kg
Eau	Env. 250 L	Env. 350 L	270 L	600 L

IV.1.2 Métrologie mise en place : mesures de température et d'humidité relative au sein des parois et en ambiance

L'objectif de la métrologie est d'assurer la mesure des gradients de température et d'humidité relative au sein des différentes parois et dans l'ambiance, afin d'évaluer les amortissements et les déphasages dans les différents états transitoires étudiés au cours des saisons.

Les capteurs de température et d'hygrométrie sélectionnés sont des capteurs de même type que ceux utilisés pour l'étude en ambiance contrôlée (Sensirion SHT 35, protégés par une capsule SF2 et une gaine thermo-rétractable). Ces capteurs ont une précision type annoncée par le fabriquant de 0,1 °C entre 20 et 60°C et de 1,5 % HR en humidité. Après préparation des capteurs, ceux-ci sont vérifiés au moyen de solutions salines, ce qui permet d'identifier les lois d'étalonnage.

L'enveloppe est instrumentée au niveau de différentes zones avec 47 capteurs Sensirion implantés à différents emplacements : en paroi sud, au niveau du soubassement ayant subi une rénovation antérieure (A) et au niveau du soubassement rénové ici (B), en partie courante et au droit du colombage en paroi sud (C et D) et au nord (E et F), au niveau du plancher haut (G) (Figure IV-2).

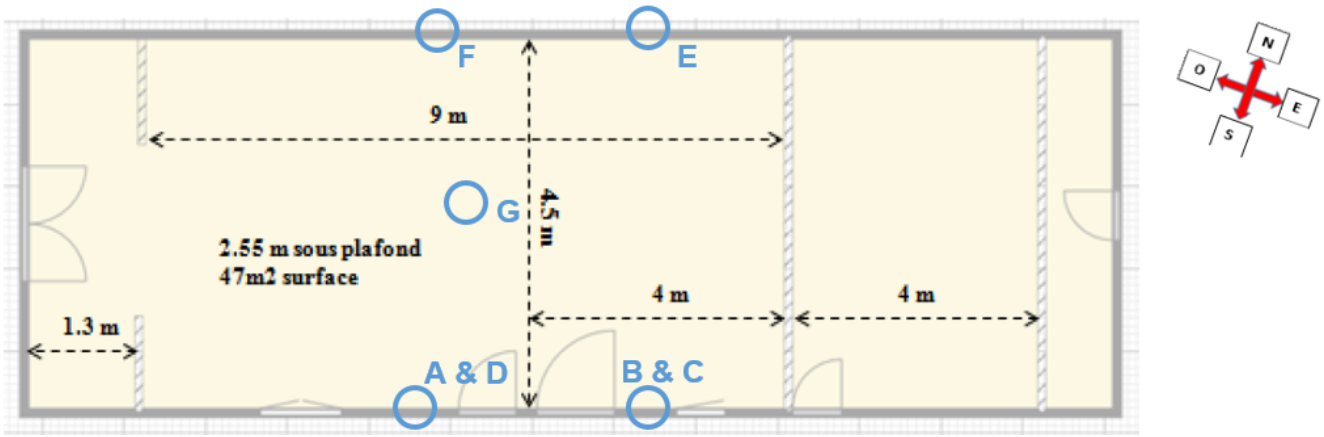


Figure IV-2 : Localisation de l'instrumentation

Au droit de la partie courante en béton de chanvre sur les parois sud et nord (C et E), les capteurs hygrothermiques sont placés au niveau de chaque interface entre les matériaux et répartis sur l'épaisseur, en surface des parois, en ambiance de part et d'autre de la paroi (Figure IV-3, Tableau IV-2). Ils ont été placés durant l'exécution des différentes parties de l'ouvrage. Dans les murs, les capteurs sont portés par des supports en bois de façon à maîtriser leur positionnement. Les capteurs aux interfaces béton de chanvre/enduits sont installés après réalisation du béton de chanvre des murs. Les capteurs de surface sont placés lors de la réalisation des enduits et les capteurs d'ambiance sont ajoutés ensuite. A chaque étape, les câbles alimentant les capteurs sont noyés dans la structure (Figure IV-4 à Figure IV-11).

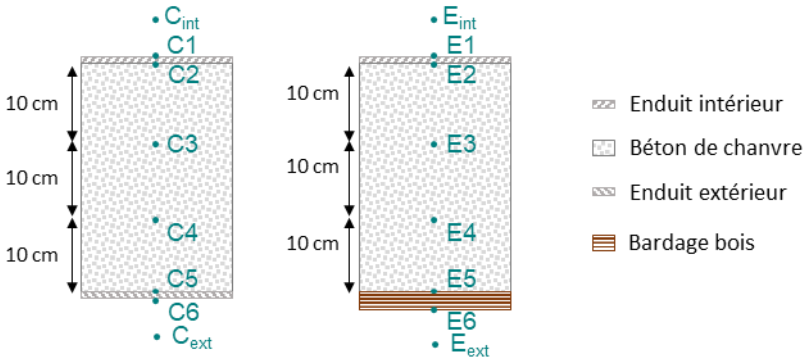


Figure IV-3 : Implantation des capteurs en partie courante du béton de chanvre sur la paroi sud (C) et nord (E)

Figure IV-4 : Implantation des capteurs au sein du béton de chanvre en paroi sud

Figure IV-5 : Implantation des capteurs à l'interface béton de chanvre-enduit intérieur et en surface intérieure (en attente) en paroi sud

Figure IV-6 : Implantation des capteurs à l'interface béton de chanvre - enduit extérieur et en surface extérieure (en attente) en paroi sud

Figure IV-7 : Implantation des capteurs en ambiances extérieure et intérieure en paroi sud

Figure IV-8 : Implantation des capteurs au sein du béton de chanvre en paroi nord

Figure IV-9 : Implantation des capteurs l'interface béton de chanvre-enduit intérieur et en surface intérieure (en attente) en paroi nord

Figure IV-10 : Implantation des capteurs en surface et en ambiance extérieures en paroi nord

Figure IV-11 : Implantation du capteur en ambiance intérieure en paroi nord

Les capteurs hygrothermiques sont connectés à des boitiers d'alimentation Daqbox - StepAt (12 capteurs par boitiers). Ces boitiers, alimentés en 220 V, sont reliés à un hub lié au PC à l'aide de câbles Ethernet de 10 m de long et aux capteurs à l'aide de câbles de 3 m de long. Les 8 boitiers sont généralement placés dans des cavités placées en tête de mur et obtenues par coffrage lors de l'exécution du béton de chanvre. L'acquisition des mesures est assurée par le logiciel IHM Sensirion exploitant l'horloge du PC. L'ensemble des alimentations électrique (boitiers, PC) est connecté à un onduleur jouant le rôle de protection pare foudre et gérant les microcoupures. Le PC est connecté physiquement à la box internet de l'habitation principale située à 50 m du bâtiment étudié. De façon à pouvoir gérer à distance et rapatrier les données enregistrées sur le PC, celui-ci peut être consulté via un protocole FTP, avec le logiciel TEAMVIEWER. En cas de coupure de courant trop prolongée, le PC redémarre automatiquement mais il est nécessaire d'intervenir à distance pour relancer l'acquisition. Parfois, une intervention sur site est nécessaire lorsque la coupure a engendré le figeage des capteurs / boîtiers.

Au regard de la vitesse de variation des sollicitations climatiques, du temps de réponse du bâtiment et de l'optimisation de la taille des fichiers d'acquisition, le pas d'acquisition choisi est d'une heure. Les données enregistrées sur le PC sont collectées régulièrement. Les données sont collectées en format texte et traitées à l'aide d'une macro excel développée spécifiquement afin de trier et pré-traiter les données : calculer les pressions de vapeur, tracer les cinétiques de température, humidité relative et pression de vapeur aux différente positions. A partir de ces cinétiques, des périodes caractéristiques sont identifiées et les profils sont tracés à différents instants au cours d'une journée.

Le comportement de l'enveloppe sera caractérisé par l'amortissement et le déphasage entre les températures ambiantes intérieure et extérieure pour prendre en compte l'ensemble des apports

gratuits, et entre les températures de surface (intérieure / extérieure) pour caractériser l'effet de la paroi. En humidité, les résultats présentent les humidités relatives ainsi que les pressions partielles de vapeur.

Le confort sera évalué à l'aide du polygone de confort ainsi que par rapport à la température intérieure atteinte, au regard de la température extérieure (ASHRAE 2004).

Tableau IV-2: Synthèse des capteurs en partie courante du béton de chanvre (C : paroi sud et E : paroi nord)

Nom et position du capteur	**Profondeur (cm) par rapport à la surface intérieure**
Cint : ambiance intérieure	
C1 : surface intérieure	0 cm
C2 : Interface enduit intérieur-Béton de chanvre	1 cm
C3 : Béton de chanvre	11cm
C4 : Béton de chanvre	21cm
C5 : Interface Béton de chanvre-enduit extérieur	31cm
C6 : surface extérieure	33 cm
Cext : ambiance extérieure	
Eint : ambiance intérieure	
E1 : surface intérieure	0 cm
E2 : Interface enduit intérieur-béton de chanvre	1 cm
E3 : béton de chanvre	11 cm
E4 : béton de chanvre	21 cm
E5 : Interface béton de chanvre-bardage en bois	31 cm
E6 : surface extérieure	33,50 cm
Eext : ambiance extérieure	

IV.1.3 Climat de HEUDREVILLE (Eure)

Les données climatiques de Heudreville sont extraites du site web ('World Weather, Time and Date' 1998) (Figure IV-12, Figure IV-13) et du site météo France pour la station d'Evreux ('Méteo France' 2022) (Figure IV-14,Figure IV-15).

Il s'agit d'un climat océanique tempéré, avec de faibles amplitudes saisonnières. Les hivers sont cléments avec des températures minimales moyennes entre 1°et 3°C et maximales moyennes entre 7 et 12°C. Les étés sont peu étouffants, avec des températures minimales moyennes entre 10°et 14°C et maximales moyennes entre 20 et 24°C. L'humidité relative moyenne mensuelle est importante quelle que soit la saison : elle est comprise entre 86% et 90% en hiver et entre 72% et 77% en été.

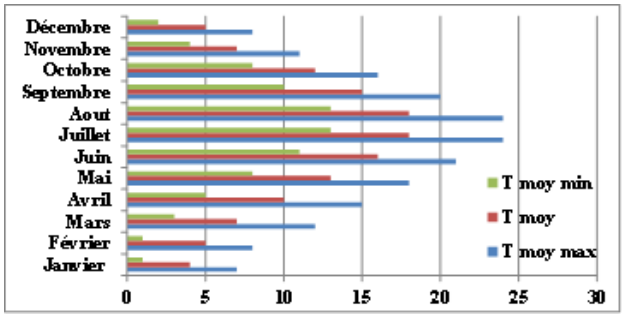


Figure IV-12: Température moyenne des maximums, minimums et moyens annuels type d'Evreux (Eure) ('World Weather, Time and Date' 1998) 1985-2015

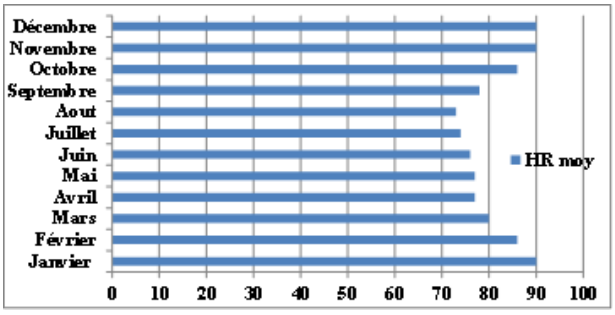


Figure IV-13 : Humidité relative moyenne type station d'Evreux (Eure) ('World Weather, Time and Date' 1998) 1985-2015

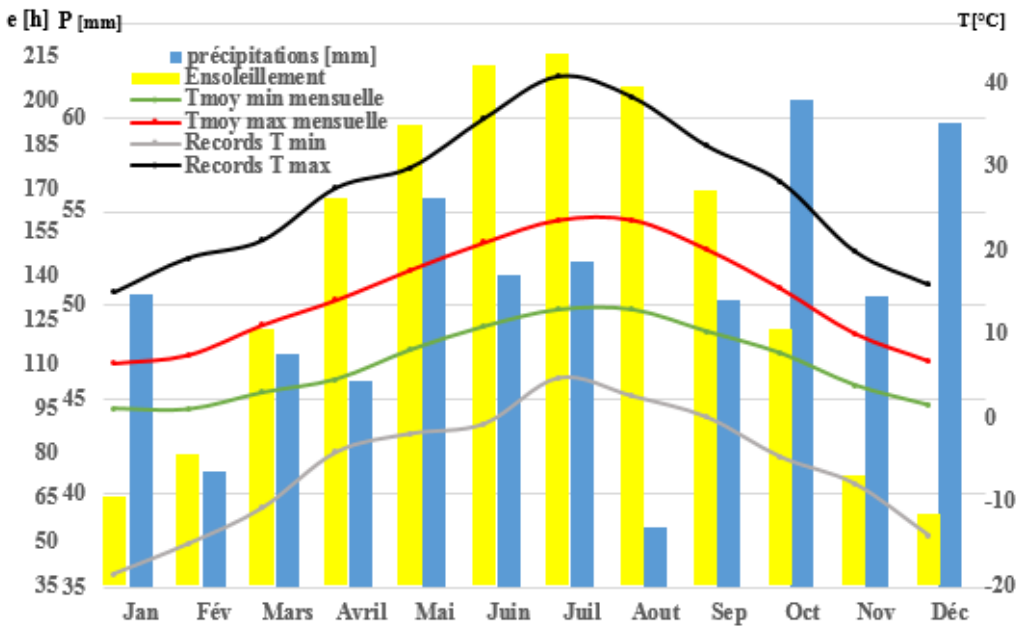


Figure IV-14: les températures moyennes des maximums et des minimums annuels, les records, ensoleillement, et précipitations type d'Evreux (Eure) ('Méteo France' 2022) 1981-2010

Toutefois, on note ponctuellement quelques records de températures. En hiver, la température la plus basse atteinte en 30 ans (1981-2010) est de -18,6°C, en janvier et la plus haute est de 15,1°C. En été, les températures les plus basses atteintes sont de 4,9°C en juillet et 2,7°C en août, les plus hautes sont de 40,9°C en juillet 2003 et 38,4°C en août.

L'ensoleillement est supérieur à 200 heures les trois mois d'été et de l'ordre de 60 à 65 heures en hiver.

Les précipitations, de l'ordre de 50 mm par mois, se produisent toute l'année. Elles sont moindres en août et février (autour de 40 mm) et plus accentuées en octobre, décembre et mai (environ 60 mm).

La Figure IV-15 compare les années 2018, 2019 et 2020 aux normales mensuelles définies sur les années 1981-2010. Ces trois années sont légèrement plus chaudes que les normales, avec, en 2018 et 2019, une température maximale moyenne annuelle supérieure de 1,5°C (16,5 et 16,4 pour 15,0 °C) et une température minimale moyenne annuelle supérieure d'environ 0,8°C (7,5 et 7,3 pour 6,6 °C). Le mois de février a été particulièrement froid en 2018 et particulièrement chaud en 2019 et 2020. Les trois étés ont été plus chauds que la normale, atteignant jusqu'à 4°C de plus en juillet 2018. Et 3 °C de plus en août 2020.

Les précipitations cumulées en 2018 sont supérieures à la normale (654,5 mm pour 604,6 mm), celles de 2019 sont inférieures (547,1 mm). De surcroît, la répartition est différente selon les années avec des précipitations plus marquées en début d'année en 2018 et un déficit sur la fin d'année. En 2019, les précipitations ont plutôt eu lieu en fin d'année. Les mois de février et août 2020 ont également été particulièrement pluvieux alors que mai 2020 présente une pluviométrie bien inférieure.

Pour l'étude du comportement hygrothermique de l'enveloppe, quelques séquences remarquables sont identifiées par comparaison des ambiances extérieures mesurées aux valeurs présentées Figure IV-15 :

- des séquences représentatives des normales saisonnières

- des séquences chaudes où la température extérieure maximale est notablement supérieure aux normales ou avec une augmentation continue des températures maximales et minimales sur plusieurs jours,

- des séquences fraîches où la température extérieure descend régulièrement en dessous des minimales normales saisonnières.

Par exemple, sur la séquence météorologique de juin 2020 (Figure IV-16), on identifie :

- une période représentative des normales saisonnières d'été (minimales de 11 à 13°C et maximale de 21 à 24°C) du 15 au 18 juin 2020, avec des températures minimales de l'ordre de 11 °C et des maximales de l'ordre de 24°C.

- une période chaude (du 22 au 25/06/2020) caractérisée par une augmentation continue des températures où les maximales croissent de 25 à 35 °C et les minimales de 8 à 17°C.

Les analyses pourront être complétées avec les données météo relatives aux précipitations, à la couverture nuageuse et aux conditions de vent.

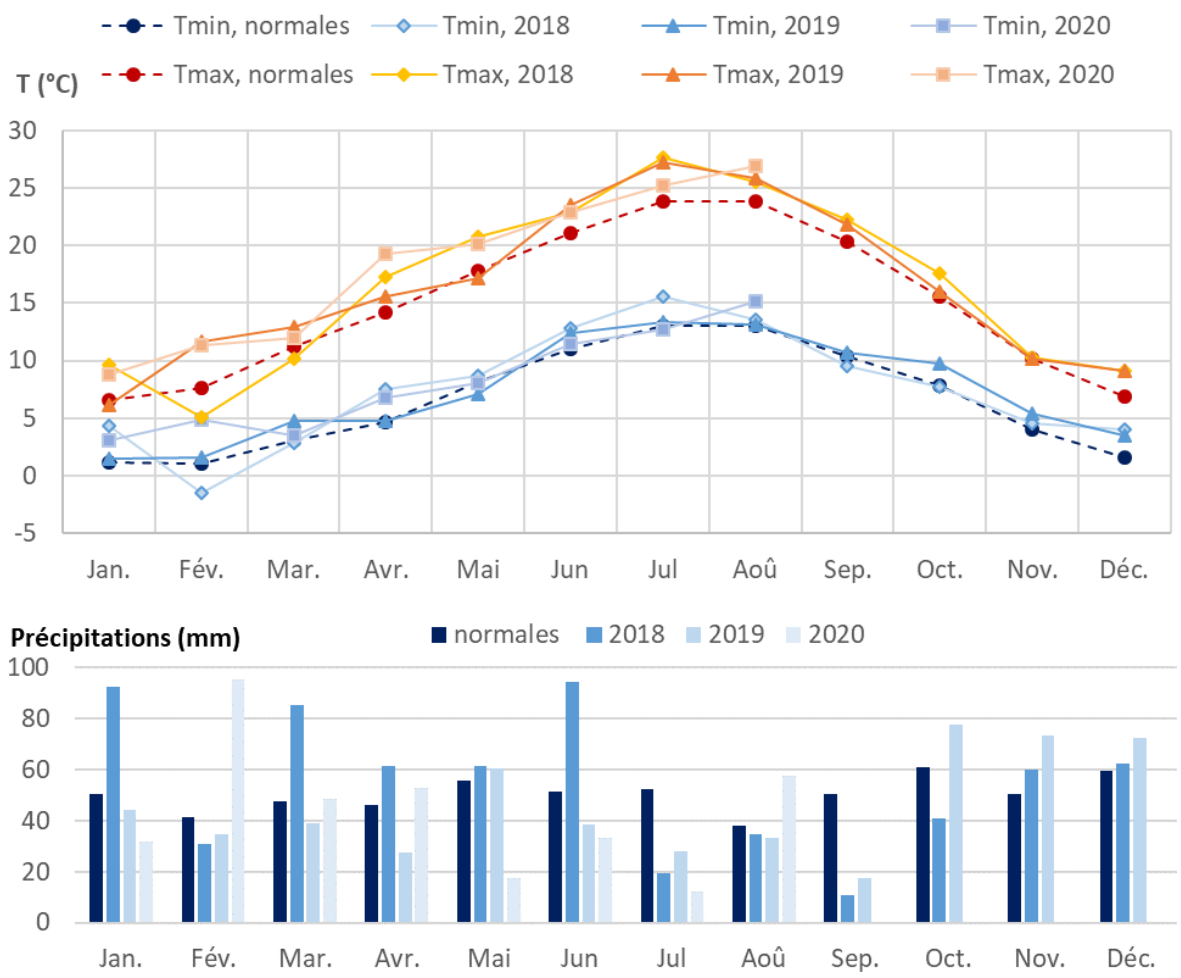


Figure IV-15 : Comparaison des années 2018, 2019 et 2020 aux normales mensuelles (1981-2010) – haut : températures, bas : précipitations

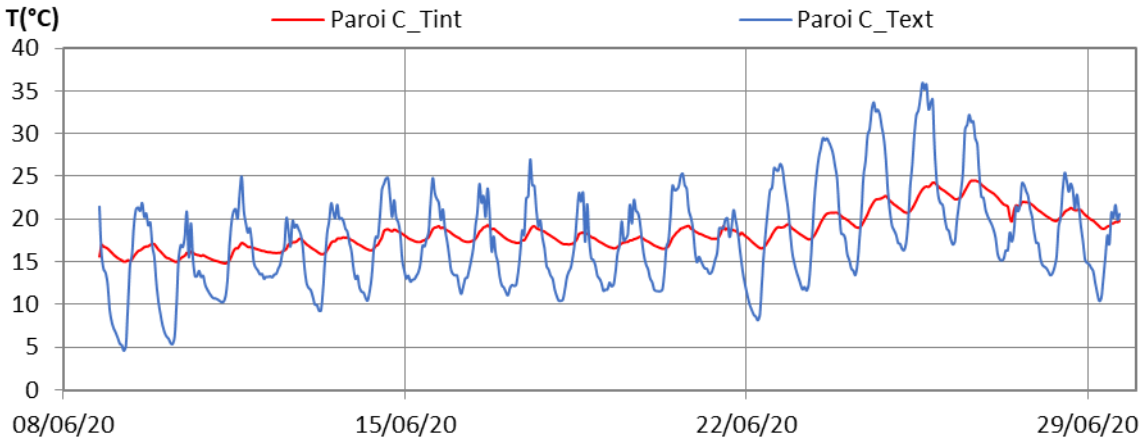


Figure IV-16: Séquence météorologique de juin 2020

IV.1.4 Consignes de chauffage

Les consignes de température de chauffage évoluent au cours du suivi du bâtiment.

En novembre 2019, la consigne est de 17,5°C. En décembre 2019, elle est abaissée à 12,5°C jusqu'au 13 janvier 2020 où elle est montée à 25°C pour 4 jours à l'occasion des visualisations par thermographie infra-rouge. Du 28 janvier 2020 au 16 février 2020, la consigne est de 18°C, elle est ensuite abaissée à 14°C jusqu'à la fin de la saison de chauffage.

IV.2 Fonctionnement de la métrologie et validation des mesures

Au cours du suivi expérimental, certaines données sont manquantes ou erronées : d'une part certaines périodes n'ont pu être enregistrées suite à des problèmes de coupures de courant ayant entraîné l'arrêt des centrales d'acquisition et/ou le figeage des capteurs, et d'autre part certains capteurs exposés à saturation de façon prolongée se sont détériorés.

IV.2.1 Validation de la métrologie sur les ambiances extérieures

Pour août 2019 et février 2020, la Figure IV-17 permet de comparer les relevés réalisés à proximité des parois Sud et Nord aux données disponibles sur les sites météorologiques pour la station la plus proche (Evreux à environ 15 km) ('Méteo France' 2022) et ('Méteo Blue' 2022).

Les températures minimales relevées sont en total accord alors que les températures maximales diffèrent légèrement. En effet, les relevés météo France sont réalisés sous abri. Sur site, les capteurs sont protégés du rayonnement solaire direct mais pour le côté sud, l'air au voisinage de la paroi est échauffé par l'ensoleillement conduisant à des températures plus élevées au sud qu'au nord. Au nord, le capteur est protégé en plus par le préau, ainsi es données coïncident bien avec celles de météofrance l'hiver et sont légèrement plus faibles l'été.

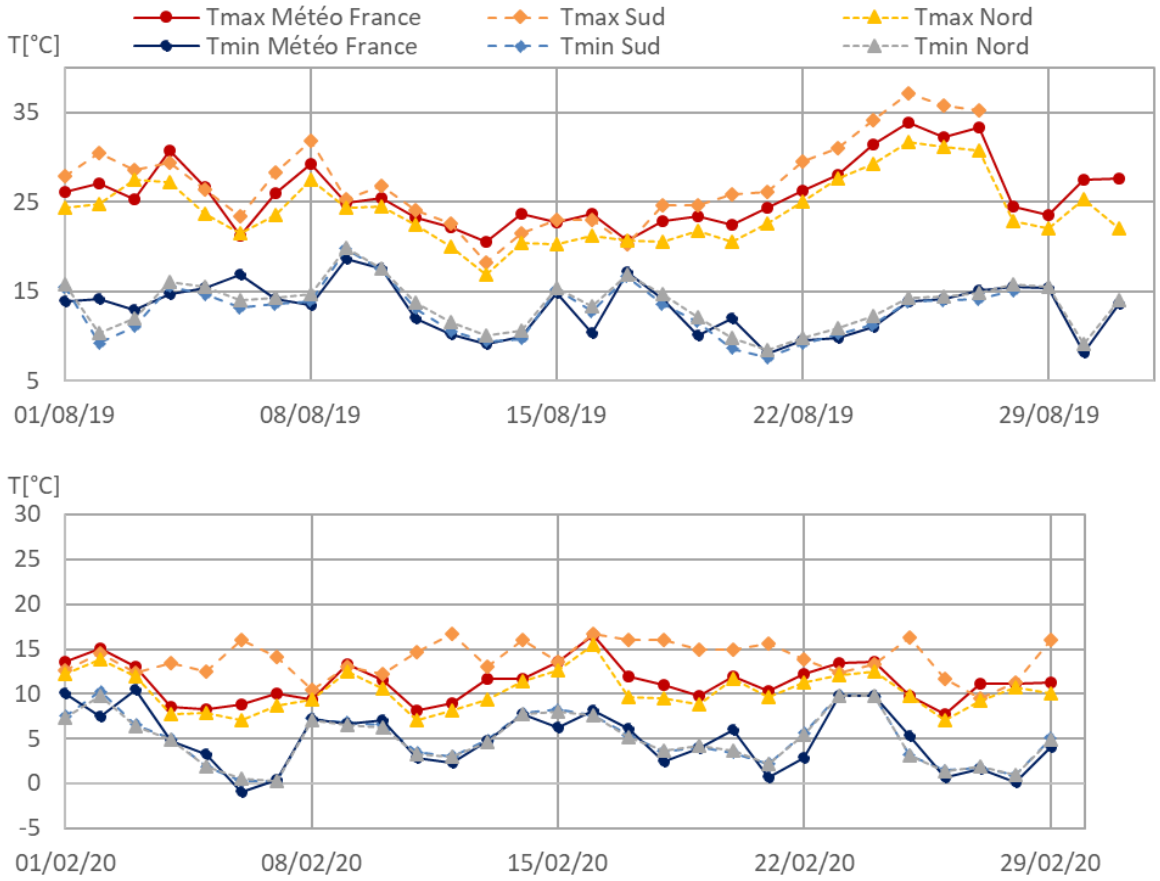


Figure IV-17: Comparaison des mesures d'ambiance extérieure, côté Nord et côté Sud, avec les données météo France - août 2019, février 2020

La Figure IV-18 montre sur 15 jours, les températures et humidités relatives au pas horaires (mesures in-situ côté sud et côté nord et données météoblue), la couverture nuageuse et le niveau des précipitations. Comme pour les données précédentes, les valeurs coïncident très bien. Les légers écarts observés peuvent s'expliquer par la différence de localisation entre la station météorologique d'Evreux et le site du bâtiment à Heudreville en raison des phénomènes locaux (nuages, pluviométrie, effet de la mare jouxtant le bâtiment…).

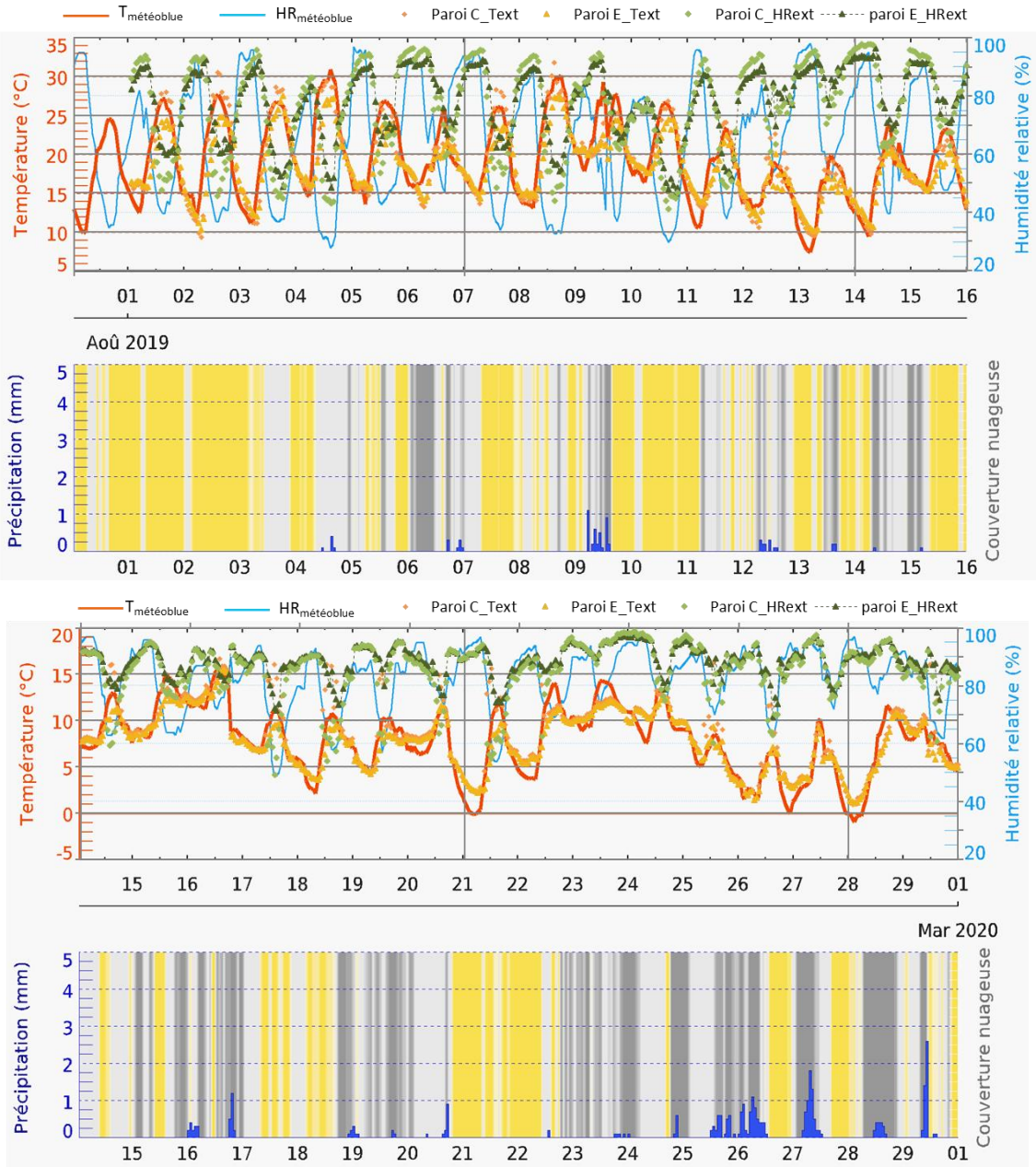


Figure IV-18 : Comparaison des mesures d'ambiance extérieure au pas horaire, côté Nord et côté Sud, avec les données météoblue ; couverture nuageuse et précipitation – haut : 01-16 août 2019, bas : 14-29 février 2020

IV.2.2 Homogénéité de l'ambiance intérieure

Les Figure IV-19 et Figure IV-20 donnent l'évolution de la température et de l'humidité relative ambiantes au voisinage des parois sud et nord (verticales) et du plancher haut au cours du mois d'août 2019 et du mois de février 2020. On observe une bonne homogénéité de l'ambiance intérieure, aussi bien en température qu'en humidité relative. La température à proximité du plancher haut est parfois légèrement supérieure du fait de la stratification. En cas de fonctionnement des radiateurs, en lien avec les mouvements convectifs et le rayonnement perçu par le récepteur, un léger écart peut être observé entre les mesures de température à proximité de la paroi nord et de la paroi sud.

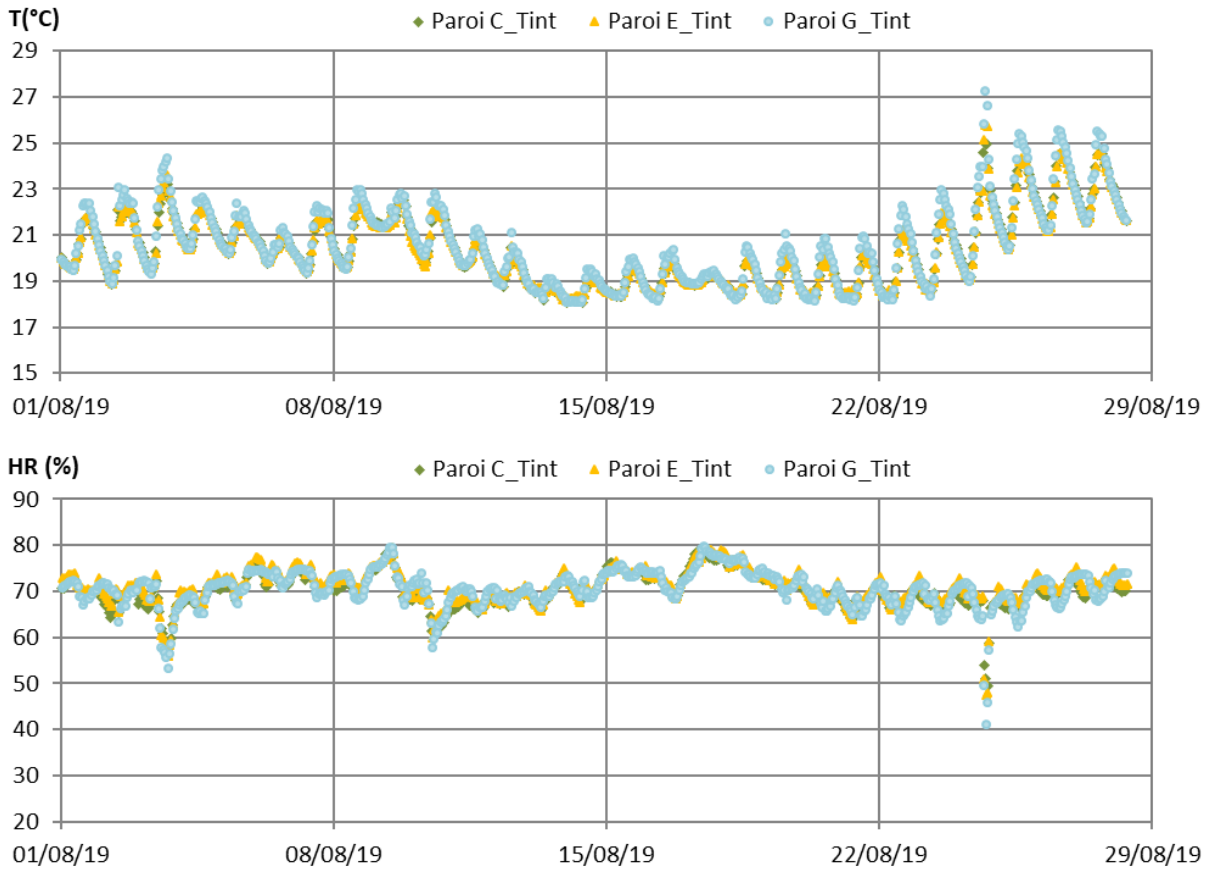


Figure IV-19 : Température i et humidité relative ambiantes intérieures en été au voisinage des parois C : sud, E: nord et G : plancher haut

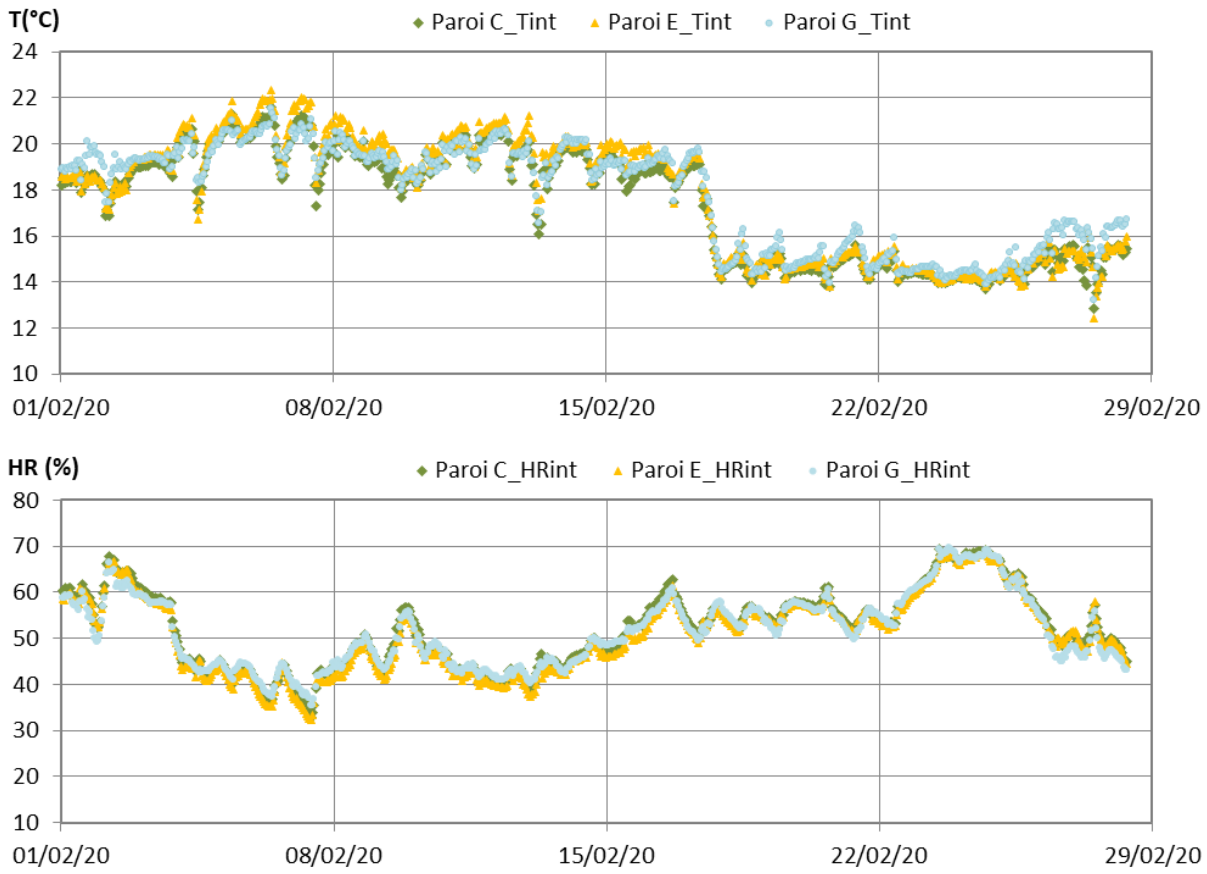


Figure IV-20 : Température et humidité relative ambiantes intérieures en hiver au voisinage des différentes parois (C : sud, E: nord G : plancher haut), bâtiment chauffé

IV.3 Résultats en saison d'été

Le choix des séquences étudiées se fait en fonction des sollicitations climatiques.

Juin 2020 est globalement plus chaud que les normales de ce mois, il présente des amplitudes de température plus élevées et une séquence de montée en température en fin de mois dépassant 30°C plusieurs jours consécutifs, sans refroidissement suffisant la nuit.

Juillet 2020 présente des moyennes minimales conformes aux normales saisonnières et des moyennes maximales légèrement plus élevées. Des séquences présentent des températures journalières minimales et maximales proches des normales saisonnières et d'autres séquences des amplitudes de température réduites et une moyenne journalière légèrement plus faible.

Ainsi, les séquences choisies sont les suivantes :

- deux périodes représentatives des normales saisonnières d'été (minimales de 11 à 13°C et maximale de 21 à 24°C) du 15 au 18 juin 2020 et du 19 au 23 juillet, avec des températures minimales de l'ordre de 10 à 11 °C et des maximales de l'ordre de 24 à 26 °C.

- une période chaude (du 22 au 25/06/2020) caractérisée par une augmentation continue des températures où les maximales croissent de 25 à 35 °C et les minimales de 8 à 17°C.

- une période avec des amplitudes de température journalières limitées et un temps couvert et pluvieux du 14 au 16 juillet 2020.

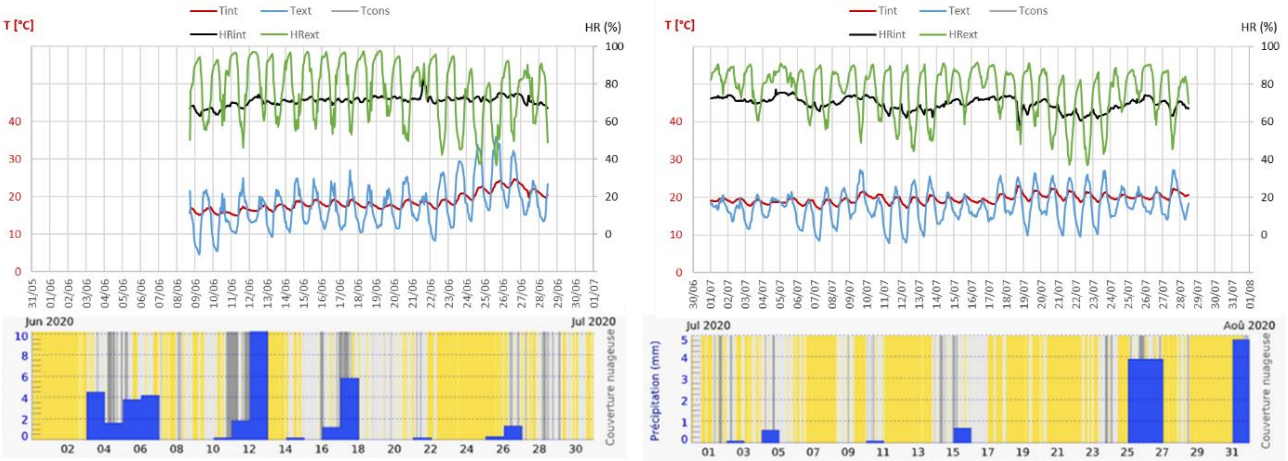


Figure IV-21: Ambiance intérieure et météo en juin et juillet 2020

IV.3.1 Réponse thermique du béton de chanvre en saison d'été

L'analyse du comportement hygrothermique des parois s'intéresse tout d'abord à la réponse thermique. En effet, comme développé par la suite, la température conditionne fortement la réponse hygrique, ce qui sera présentée dans un deuxième temps.

Les Figure IV-22 à Figure IV-24 présentent les cinétiques de température au sein de la partie courante en béton de chanvre des parois sud et nord pour les quatre périodes identifiées précédemment.

Au cours de la saison, les parois s'échauffent tant au nord qu'au sud, avec une augmentation de la température moyenne de l'ordre de 1 °C au cœur de la paroi sud entre juin et juillet (Figure IV-22). Lors de la période chaude (Figure IV-23), l'échauffement des parois conduit à une augmentation de la température moyenne quotidienne au cœur des parois de l'ordre de 8°C lors des quatre jours de montée en température. Le jour suivant, la température extérieure ainsi que celle au cœur de la paroi sont maintenues. Lorsque la température extérieure revient à la normale, la température de la paroi retrouve rapidement ses valeurs saisonnières.

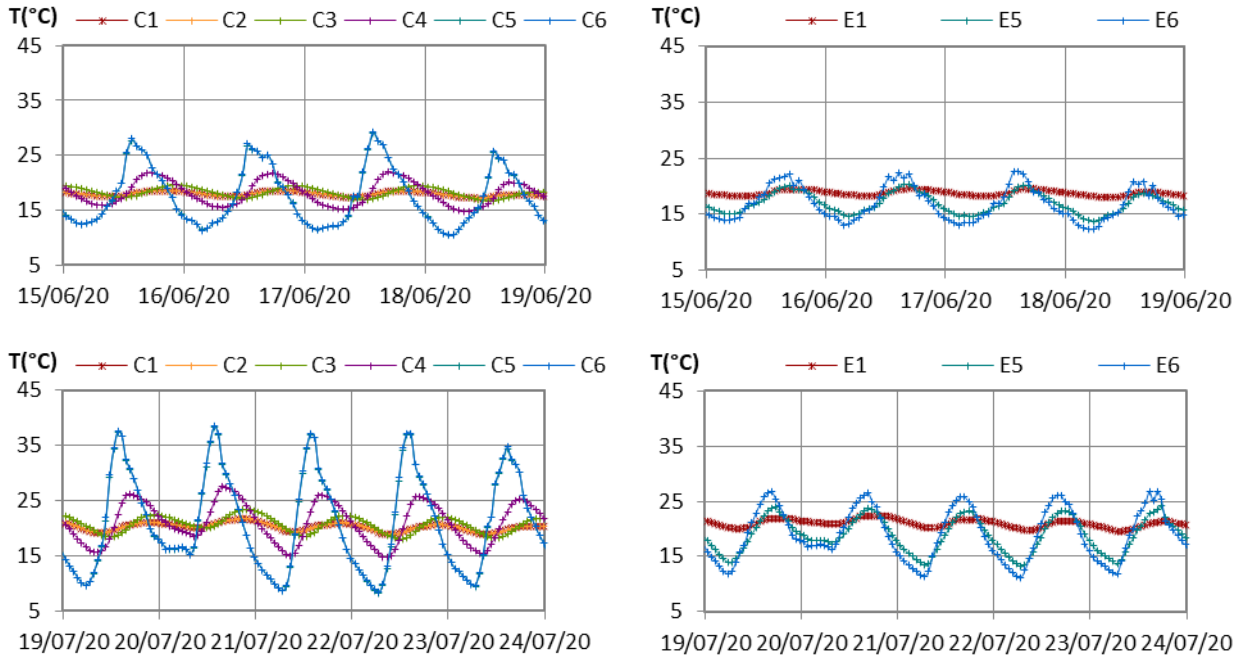


Figure IV-22 : Evolution cinétique des températures au sein des parois en périodes représentatives (juin et juillet 2020), gauche : paroi sud, droite : paroi nord.

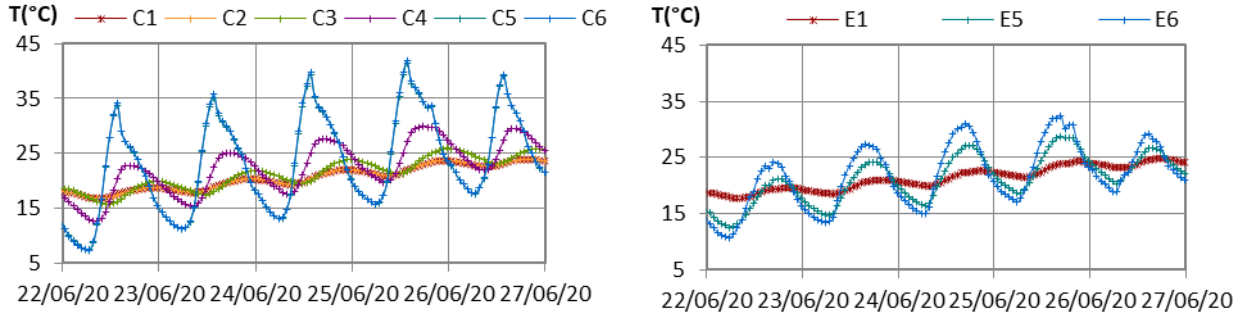


Figure IV-23 : Evolution cinétique des températures au sein des parois en période chaude (juin 2020), gauche : paroi sud, droite : paroi nord.

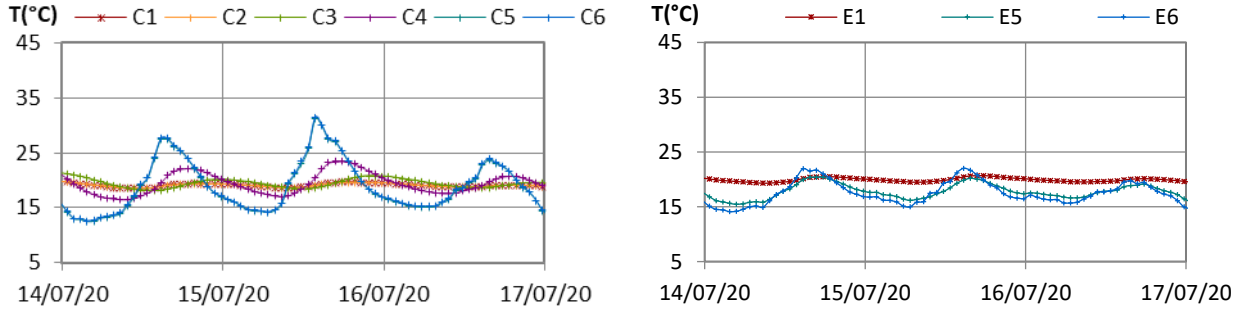


Figure IV-24: Evolution cinétique des températures au sein des parois lors de journées avec de faibles amplitudes de températures avec un temps nuageux et pluvieux (juillet 2020), gauche : paroi sud, droite : paroi nord.

L'étude du déphasage en température et en pression de vapeur ainsi que de leur amplitude relative à l'amplitude en surface extérieure est réalisée sur l'épaisseur de la paroi sud en période représentative, nuageuse et chaude ensoleillée (Figure IV-25 et Figure IV-32). Les valeurs en surface extérieure sont utilisées comme référence. Il existe des écarts entre les déphasages déterminés à partir des valeurs minimales et maximales du fait de la forme du signal extérieur, plus aplati sur les valeurs minimales, ce qui rend plus difficile l'identification du temps de la valeur minimale. De plus, le pas de temps de mesure d'une heure se répercute sur la précision de lecture

des temps. Les déphasages obtenus sur les valeurs minimales sont plus courts que ceux obtenus sur les valeurs maximales.

Pour la température, les déphasages augmentent sur la majeure partie du mur depuis la surface extérieure vers le côté intérieur. Ces déphasages sont de l'ordre de 3 heures à 12 cm de profondeur (x = 21 cm pour une épaisseur totale de 33 cm) et de 8 h à 22 cm de profondeur (x = 11 cm). A proximité de la surface intérieure, les valeurs sont plus faibles car l'allure du signal n'est pas régie que par la propagation sur l'épaisseur du mur, qui devient négligeable, mais également par l'ambiance intérieure. Celles-ci ne sont donc pas uniquement représentatives de la diffusion dans la paroi. L'amplitude relative à l'amplitude en surface extérieure de la température est identique sur l'épaisseur du mur pour les trois journées considérées. Elle diminue de la surface extérieure vers le côté intérieur du mur, traduisant ainsi l'amortissement du signal au cours de la diffusion. Elle est de l'ordre de 0,35 à 12 cm de profondeur dans le mur et de 0,11 à 22 cm.

Les résultats obtenus pour la paroi en béton de chanvre in-situ pour une journée sans soleil sont comparés à ceux obtenus en ambiance contrôlée sur la paroi terre-chanvre. Pour la température, les résultats obtenus en déphasage et en amplitude relative à l'amplitude en surface extérieure sont similaires. En effet, les propriétés thermiques sont proches pour les deux parois.

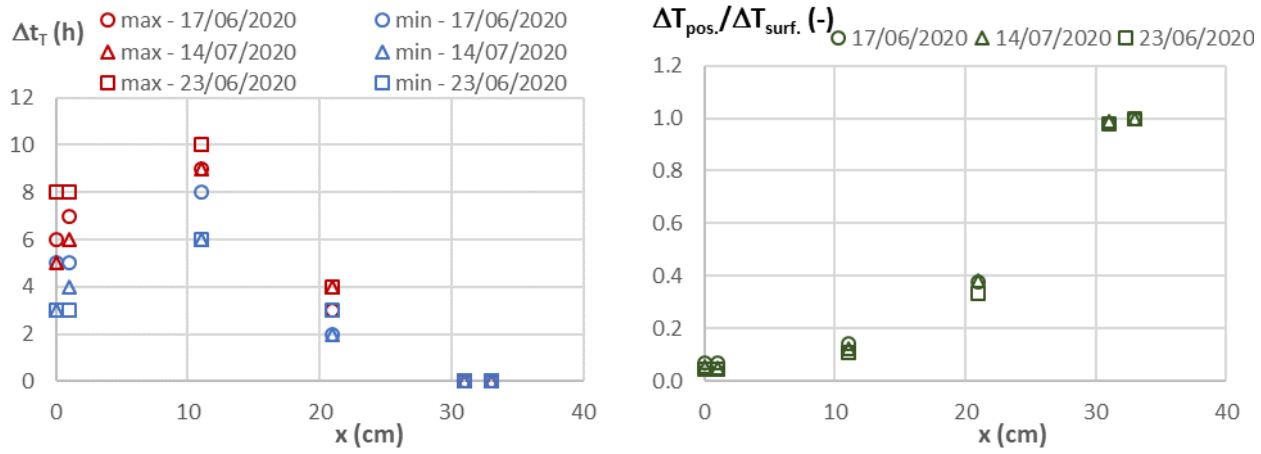


Figure IV-25 : Déphasage et amplitude relative à l'amplitude en surface extérieure de la température sur l'épaisseur de la paroi sud en période représentative (17/06/2020), nuageuse (14/07/2020) et chaude ensoleillée (23/06/2020)

Les Figure IV-26 et Figure IV-27 présentent les profils de température au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud pour des journées représentatives de la période estivale d'une part et pour des journées chaude ou nuageuse et pluvieuse d'autre part.

De façon générale, la sollicitation en surface extérieure conduit à une réponse en température particulièrement marquée sur le tiers extérieur du mur et qui se diffuse sur toute l'épaisseur de la paroi. Plus en détail, sur le tiers extérieur du mur (de 21 à 33 cm), le flux de chaleur pénètre en surface extérieure de 9h à 18h environ, réciproquement le reste du temps le flux s'inverse et le mur se refroidit sur cette partie. La température maximale en surface extérieure est observée vers 14h, la diffusion de chaleur au sein du béton de chanvre conduit à une valeur maximale vers 17h à 21 cm. La température minimale en surface extérieure est observée en fin de nuit (entre 4 et 7 h), conduisant à des températures minimales à 21 cm entre 7 et 10 h. Sur le tiers central de l'épaisseur du mur, des fluctuations de températures plus importantes sont observées à 21 cm qu'à 11 cm, en lien avec les sollicitations beaucoup plus importantes du côté extérieur. Le flux de chaleur s'inverse dans cette partie du mur vers 12h et vers 22h. Il est déperditif vers l'extérieur de 22h à 12h et constitue un apport retardé de 12h à 22h. La température de surface intérieure du mur fluctue peu et d'autant moins lorsque les jours ne sont pas ensoleillés. En outre, à 11 cm, la température la plus basse est atteinte entre 13 et 14h. Ainsi, aux heures les plus chaudes de la journée, le gradient de température dans cette couche de mur permet un stockage de la chaleur ambiante contribuant ainsi à limiter le risque de surchauffe de l'ambiance intérieure. Vers 17h, le flux s'inverse, constituant un apport retardé qui évite une descente en température ambiante la nuit.

Pour la période chaude (profils du 25/06/2020), la durée d'apport en surface extérieure est allongée jusqu'à 21h et la descente en température est moins marquée ne permettant pas un refroidissement suffisant de la paroi. Côté intérieur, le flux constitue majoritairement un apport vers l'ambiance qui reste toutefois limité après quatre jours de chaleur.

Les profils observés le 14/07/2020 sont similaires à ceux observés le 15/06/2020, avec une différence concernant l'heure de la température maximale en surface extérieure. Toutefois, l'interaction avec l'ambiance intérieure reste la même.

Au bilan, les profils observés in-situ présentent des évolutions similaires à ceux observés sur la paroi terre-chanvre en ambiance contrôlée, faisant eux aussi apparaître un tiers extérieur particulièrement actif en réponse aux sollicitations ambiantes extérieures. Toutefois, sur l'épaisseur de l'enduit, les gradients de température sont plus marqués sur la paroi terre-chanvre en ambiance contrôlée du fait de la différence de type d'enduit (chaux sable pour la paroi en béton de chanvre in-situ et chaux-chanvre pour la paroi terre-chanvre en ambiance contrôlée). En outre, l'effet de l'ensoleillement sur le faisceau de température est bien reproduit par la prise en compte d'une température équivalente en ambiance contrôlée.

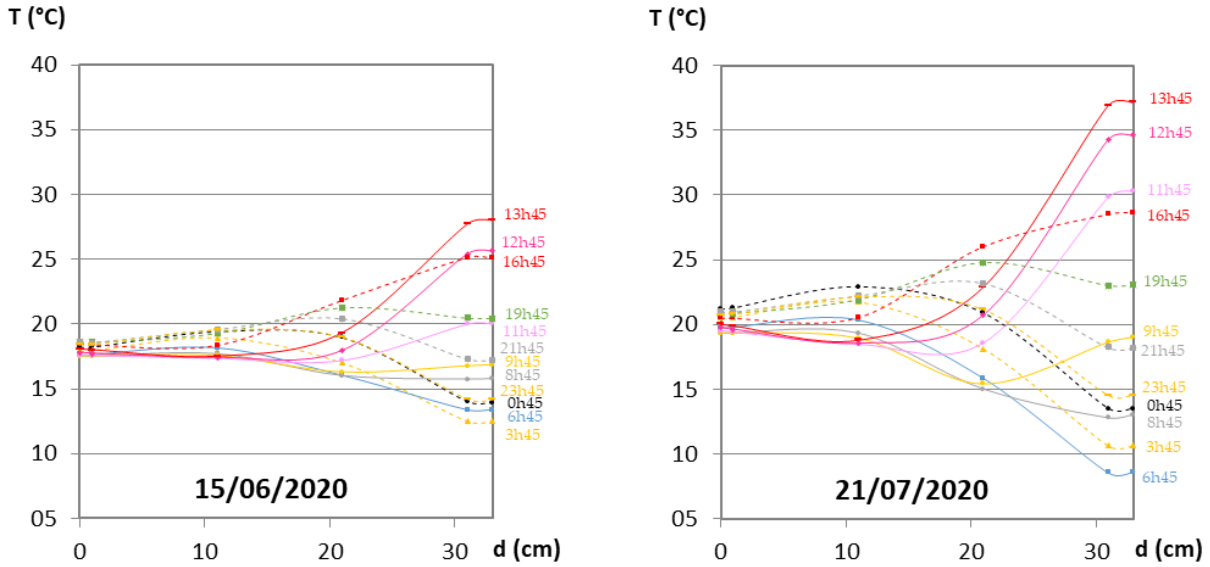


Figure IV-26 : Profils de Températures au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en période représentative (15 juin 2020 nuageuse et 21 juillet 2020 ensoleillée).

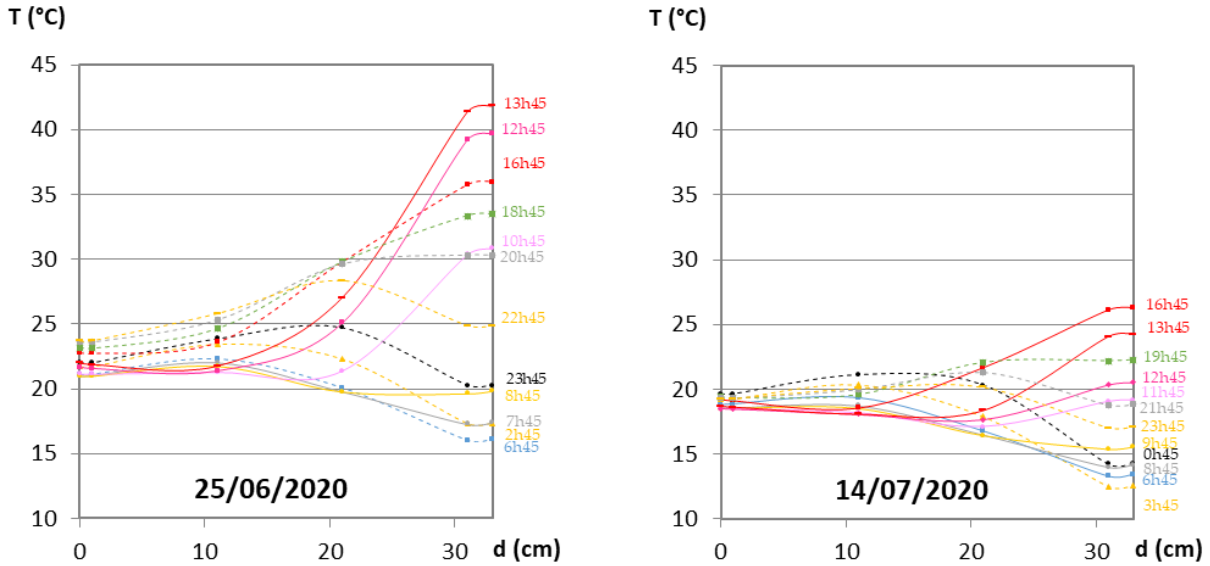


Figure IV-27 Profils de températures au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en périodes chaudes (gauche : 25 juin 2020) et en période de faible variations journalières par temps nuageux (droite : 14 juillet 2020)

IV.3.2 Réponse hygrique du béton de chanvre en saison d'été

L'étude de la réponse hygrique de la paroi porte sur l'humidité relative et la pression de vapeur. En termes de profils, l'humidité relative permettra d'identifier des risques ou l'occurrence de condensation interne alors que la pression de vapeur permettra d'étudier les flux d'humidité.

Pour l'été, les cinétiques d'humidité relative et de pression de vapeur au sein de la partie courante en béton de chanvre sont données Figure IV-28 en période représentative des normales saisonnières et Figure IV-29 en période chaude. Pour toutes ces périodes, la vitesse de variation de l'humidité relative en surface extérieure du mur est beaucoup plus rapide en décroissance d'humidité le jour qu'en croissance (6 à 7 heures / 17 à 18 heures). En surface intérieure, l'humidité relative est relativement constante, en lien avec le fait qu'il n'y a pas de charges internes. Les fluctuations de pressions de vapeur présentent des cycles 8 heures de croissance / 16 heures de décroissance. Ces cycles sont principalement dictés par les variations de température comme le montre la Figure IV-31 où les minimaux et maximaux en pression de vapeur sont simultanés à ceux en température alors que les pics d'humidité relative sont décalés. De plus, la pression de vapeur est également liée aux conditions météo. En effet, l'augmentation de pression de vapeur à partir du 25/06 après-midi est associée à un épisode pluvieux visible sur la Figure IV-30.

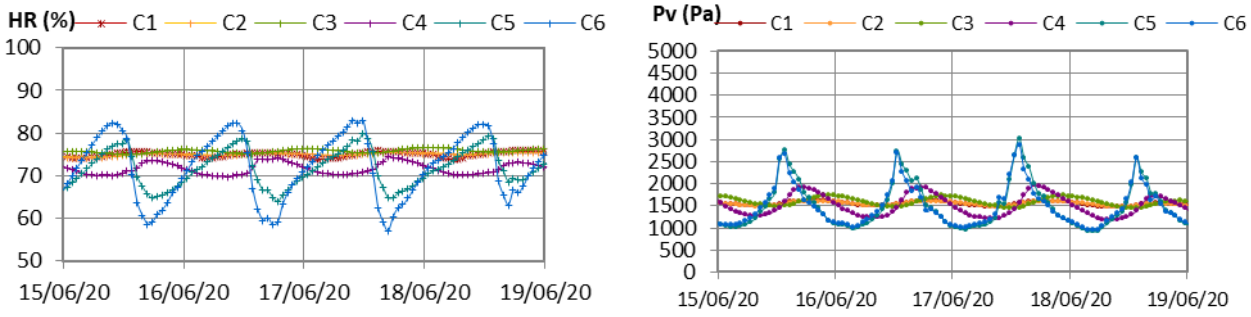


Figure IV-28 : Evolution cinétique au sein de la paroi sud en période représentative (juin 2020), gauche : humidité relative, droite Pv

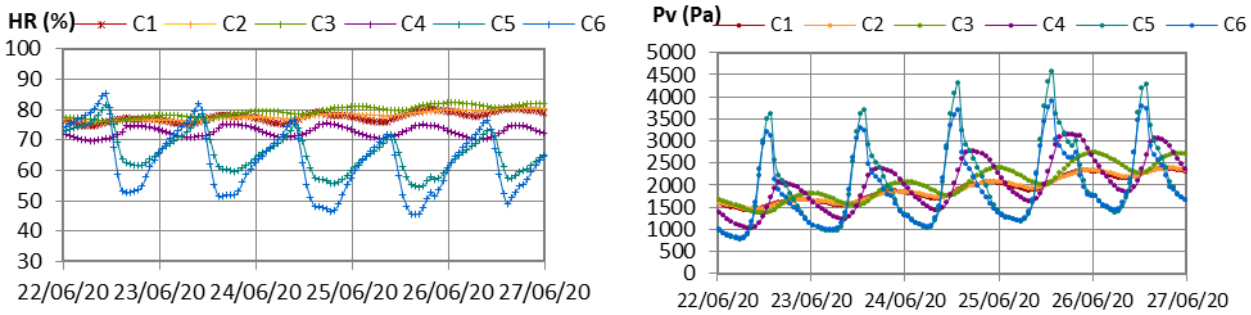


Figure IV-29 : Evolution cinétique d'humidité relative au sein de la paroi sud en périodes chaudes (juin 2020), gauche : humidité relative, droite Pv

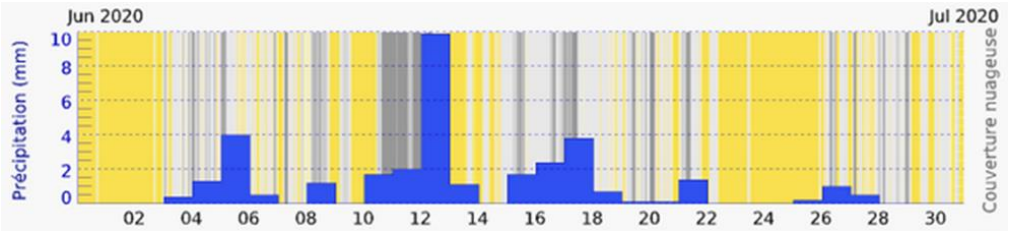


Figure IV-30 : conditions météo à Heudreville en juin 2020 ('Méteo Blue' 2022)

Figure IV-31 : Evolution de la température, de l'humidité relative et de la pression de vapeur en ambiance extérieure sud (Cext), en surface extérieure de la paroi sud (C6) et dans la paroi (C4)

La Figure IV-32Figure IV-26 présente le déphasage et l'amplitude relative à l'amplitude en surface extérieure de la pression de vapeur sur l'épaisseur de la paroi sud en période représentative (17/06/2020), nuageuse (14/07/2020) et chaude ensoleillée (23/06/2020). Les déphasages sont du même ordre de grandeur que ceux en température, mais toutefois augmentés pour la journée ensoleillée. L'amplitude relative à l'amplitude en surface extérieure dépasse 1 derrière l'enduit. Ceci montre un phénomène de désorption. L'amplitude relative ne dépend plus uniquement de la diffusion de la vapeur dans la paroi mais également de phénomènes de stockage-déstockage couplés aux transferts.

Par comparaison aux résultats obtenus en ambiance contrôlée sur la paroi terre-chanvre, les déphasages en pression de vapeur sont plus élevés sur la paroi en béton de chanvre in-situ, les propriétés hydriques retardent la diffusion au sein de la paroi en béton de chanvre par rapport à la paroi terre-chanvre. L'amplitude relative à l'amplitude en surface est beaucoup plus élevée sur la paroi terre-chanvre en ambiance contrôlée. Toutefois, ces écarts semblent plus induits par des sollicitations en surface différentes qu'au comportement intrinsèque du mur.

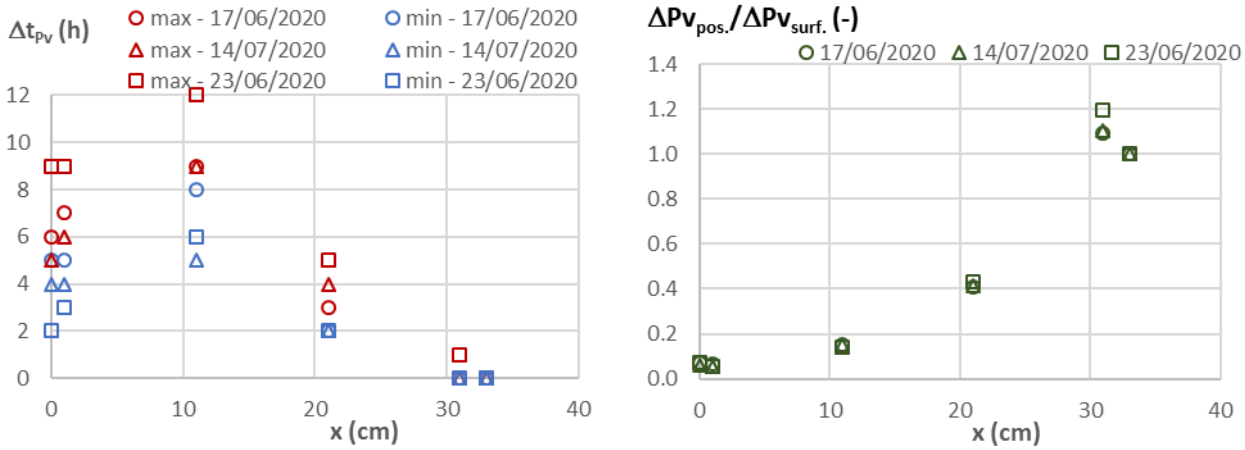


Figure IV-32 : Déphasage et amplitude relative à l'amplitude en surface extérieure de la pression de vapeur sur l'épaisseur de la paroi sud en période représentative (17/06/2020), nuageuse (14/07/2020) et chaude ensoleillée (23/06/2020)

En été, les profils d'humidité relative observés au sein de la partie courante en béton de chanvre atteignent 80 % au maximum, montrant qu'il n'y a pas de risque de condensation interne (Figure IV-33 et Figure IV-34).

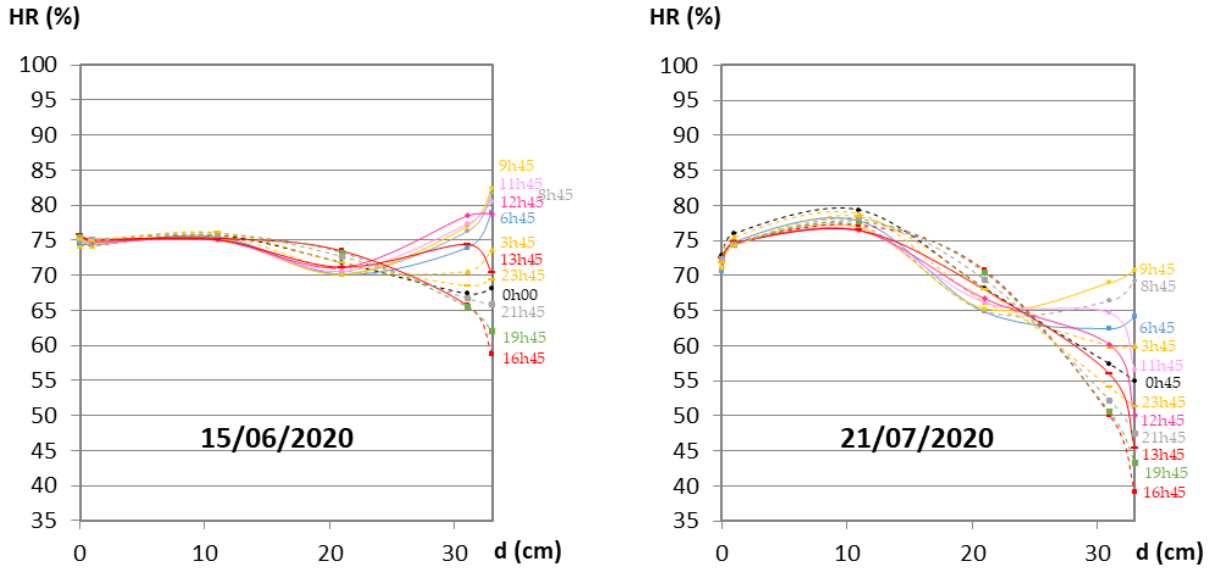


Figure IV-33 : Profils d'humidité relative au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en période représentative (15 juin et 21 juillet 2020).

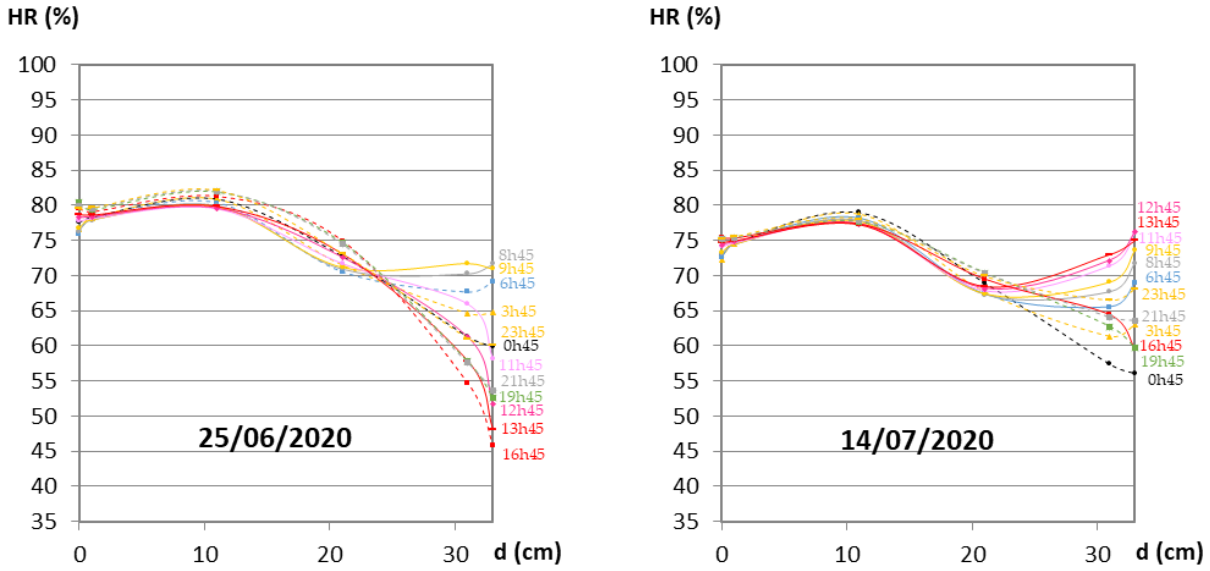


Figure IV-34 Profils d'humidité relative au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en périodes chaudes (gauche : 25 juin 2020) et en période de faible variations journalières par temps nuageux (droite : 14 juillet 2020)

La pression de vapeur à l'intérieur de la paroi résulte des flux d'humidité échangés sous l'effet du gradient de pression de vapeur entre les ambiances et des flux d'humidité engendrés par les phénomènes de sorption-désorption dans la paroi.

La Figure IV-35 présente les profils de pression de vapeur au sein de la partie courante en béton de chanvre pour des journées représentatives de l'été. Sur le tiers intérieur de l'épaisseur du mur, le gradient de pression de vapeur est limité, conduisant globalement à un léger flux du mur vers l'ambiance. Sur les deux tiers extérieurs du mur, la pression de vapeur fluctue en lien avec les fluctuations de température. Les valeurs maximales et minimales ne se situent pas nécessairement en surface du mur, ce qui met en évidence des phénomènes de sorption-désorption, comme par exemple à 31 cm le 15/06/2020 à 13h45 pour la désorption ou à 3h45 pour la sorption. Cela induit des flux d'humidité à la fois vers le cœur et la surface extérieure du mur lorsque la pression de

vapeur est maximale et inversement de l'extérieur ou du cœur du mur vers le point considéré lorsqu'elle est minimale. Pour les jours les plus chauds (Figure IV-36), les phénomènes s'intensifient à la fois sous l'effet de gradient de pression de vapeur intérieur/extérieur plus forts et de phénomènes de sorption-désorption plus importants. Inversement, les jours nuageux, la température sur le tiers extérieur de l'épaisseur du mur s'élève moins et les phénomènes sont plus réduits.

L'évolution des profils de pression de vapeur obtenue in-situ rejoint les résultats obtenus sur la paroi terre-chanvre en ambiance contrôlée : les deux tiers extérieurs du mur sont actifs d'un point de vue hygrique, des phénomènes de sorption-désorption sont identifiés au sein de la paroi. Toutefois, les amplitudes ambiantes extérieures en ambiance contrôlée sont plus faibles et évoluent différemment au cours de la journée (forme du signal simplifiée), ce qui ne reproduit pas exactement le pic de pression de vapeur ambiant autour de 14h et donc son effet sur le profil. Côté intérieur du mur, des différences au niveau des profils sont observées car la pression de vapeur ambiante in-situ est beaucoup plus élevée et fluctue au cours de la journée comparée à celle en ambiance contrôlée imposée à une consigne fixe.

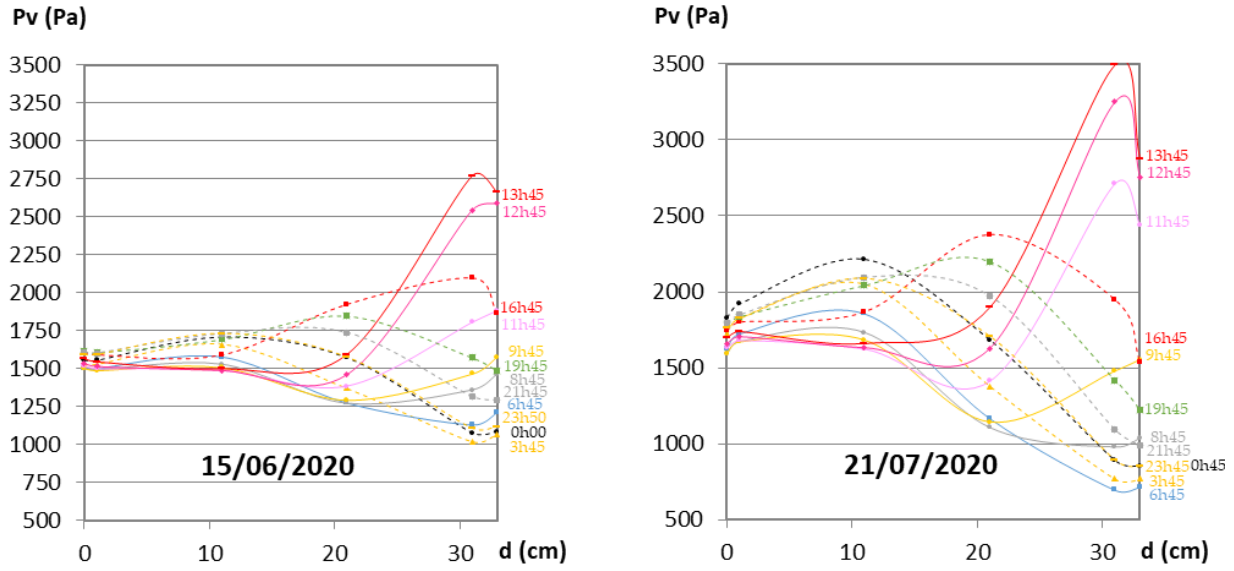


Figure IV-35 : Profils d'humidité relative au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en période représentative (15 juin et 21 juillet 2020).

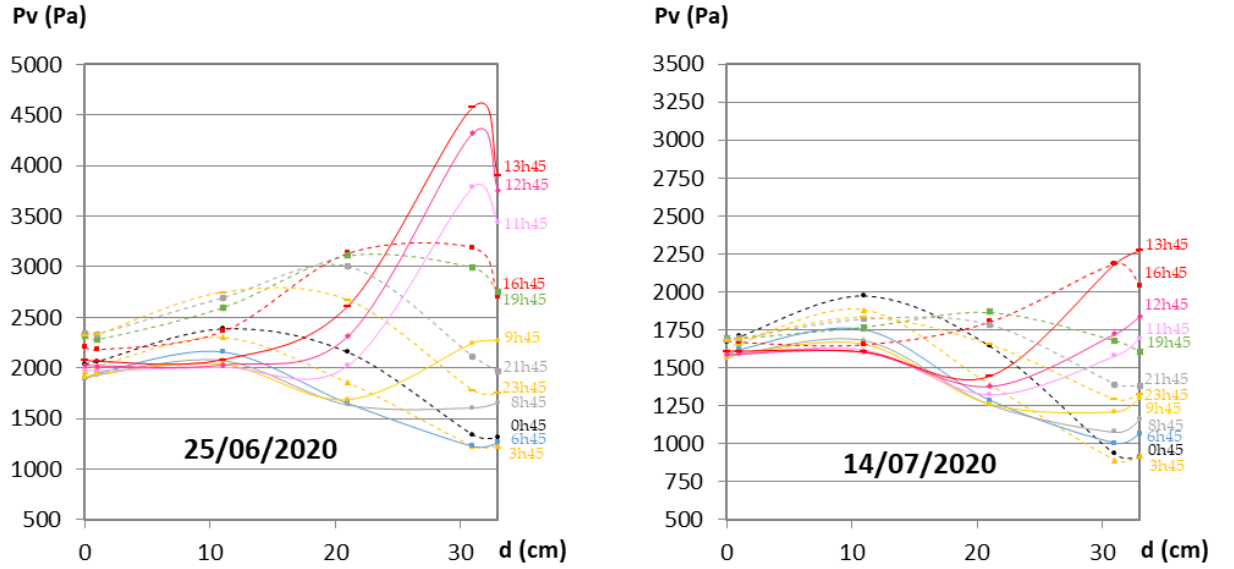


Figure IV-36 Profils d'humidité relative au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud en périodes chaudes (gauche : 25 juin 2020) et en période de faible variations journalières par temps nuageux (droite : 14 juillet 2020)

IV.3.3 Ambiance intérieure et confort en saison d'été

L'ambiance intérieure et le confort en saison d'été sont étudiées à partir de l'évolution de la température intérieure, du polygone de confort et du diagramme de confort adaptatif.

En juin 2020 (Figure IV-16), on identifie (Figure IV-37):

- une période représentative des normales saisonnières d'été (minimales de 11 à 13°C et maximale de 21 à 24°C) du 15 au 18 juin 2020, avec des températures minimales de l'ordre de 11 °C et des maximales de l'ordre de 24°C.

- une période chaude (du 22 au 25/06/2020) caractérisée par une augmentation continue des températures où les maximales croissent de 25 à 35 °C et les minimales de 8 à 17°C.

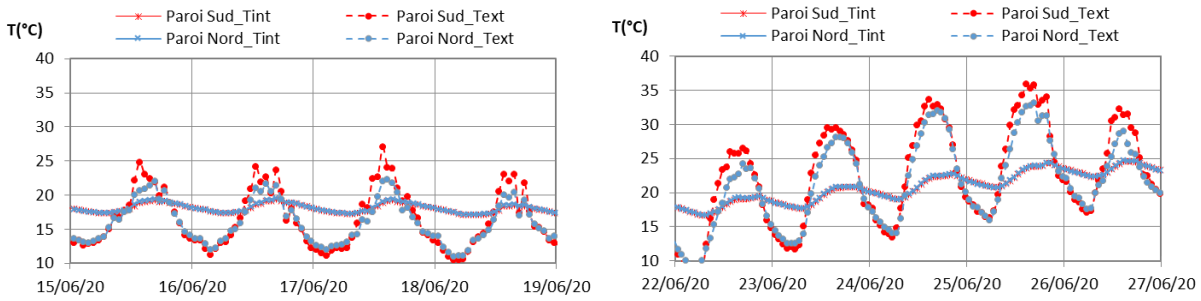


Figure IV-37 : Evolution des Températures d'ambiances intérieures et extérieures des parois sud et nord pour les périodes représentatives des normales saisonnières (haut juin 2018 et 2020), et pour des périodes chaudes (bas août 2019 et juin 2020)

Les températures intérieures observées en période représentative oscillent entre 17 et 20 °C, en période chaude, l'amplitude journalière est de l'ordre de 3°C avec des valeurs minimales/maximales progressant de 17/20°C à 22/25 °C. Aucune surchauffe à l'intérieur du bâtiment n'est observée. L'amortissement entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure est d'environ 11°C à 12 °C pour les périodes représentatives des normales saisonnières et d'environ 18 °C côté sud en période chaude. Le déphasage est d'environ 2 heures pour les deux mois.

Les polygones de confort et diagramme de confort adaptatif pour juin et juillet 2020 sont donnés Figure IV-38, (pour juin 2020, les données débutent le 08/06).

En juin 2020, un nuage de points se situe en dehors du polygone de confort du fait de températures trop faibles. En effet, ces ambiances fraîches sont à relier à des températures extérieures faibles du 8 au 13 (Figure IV-30). L'humidité relative se maintient à 70 %, valeur assez élevée en lien avec l'humidité relative ambiante extérieure qui oscille entre 60 et 90 %. En outre, le mois de juin 2020 est marqué par des précipitations qui influent sur les niveaux d'humidité. Sur le diagramme de confort adaptatif, de façon générale, les températures intérieures conduisent à une acceptabilité inférieure à 80%, du fait de valeurs trop basses, avec des températures extérieures minimales de l'ordre de 6°C, des valeurs maximales assez faibles en 2020, à l'exception de la période chaude en fin de mois et des apports solaires très limités entre le 3 et le 22 juin.

En juillet 2020, les points représentatifs de l'ambiance intérieure s'inscrivent dans le polygone de confort ou en sont proches. Le nuage de points semble se stabiliser et être représentatif de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment en l'absence d'occupation. Au niveau du confort adaptatif, on retrouve un taux d'acceptabilité supérieur à 80% qui semble représentatif de la saison d'été.

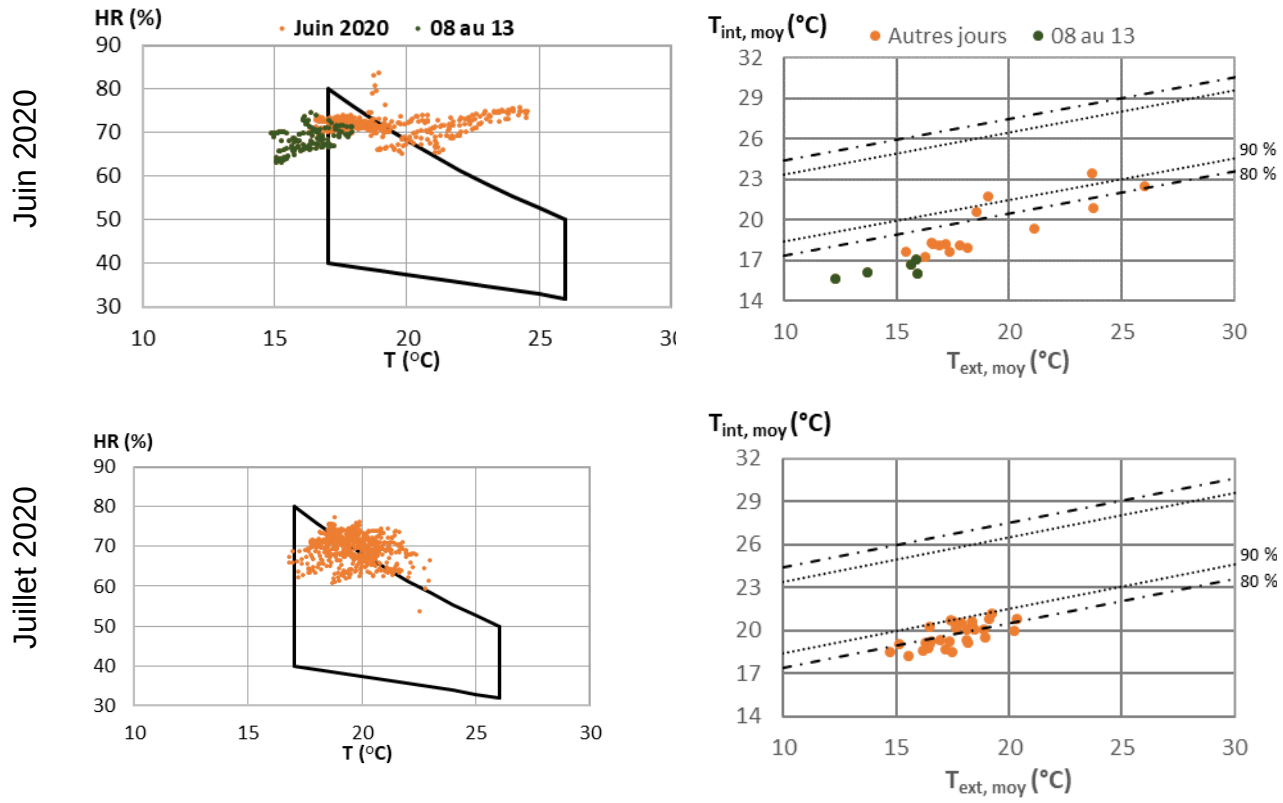


Figure IV-38: Diagrammes de confort pour juin et juillet 2020 : polygone de confort – 1 point toutes les heures (gauche) et diagramme de confort adaptatif – valeurs moyennes sur 24h (droite)

IV.4 Résultats en saison d'hiver

L'étude du comportement hygrothermique des parois et du confort considère les mois de novembre 2019 et de février 2020, avec des consignes représentatives de l'usage du bâtiment jusqu'à mi-février (17,5 et 18°C). La Figure IV-39 présente l'évolution des ambiances intérieures et extérieures (T et HR) et les données météo d'ensoleillement, couverture nuageuse et précipitations. En novembre 2019, les températures extérieures observées sont globalement comparables aux normales saisonnières, à l'exception de la fin de mois où elles sont un peu élevées. Le mois de février 2020 est plus chaud que les normales saisonnières, avec toutefois quelques séquences représentatives en début et fin de mois. Les séquences sélectionnées sont les suivantes :

- Une période représentative du mois de novembre du 16 au 20 novembre 2019,
- Une période représentative de février du 4 au 7 février 2020, incluant un jour sans soleil et un jour ensoleillé avec des températures ambiantes extérieures similaires.

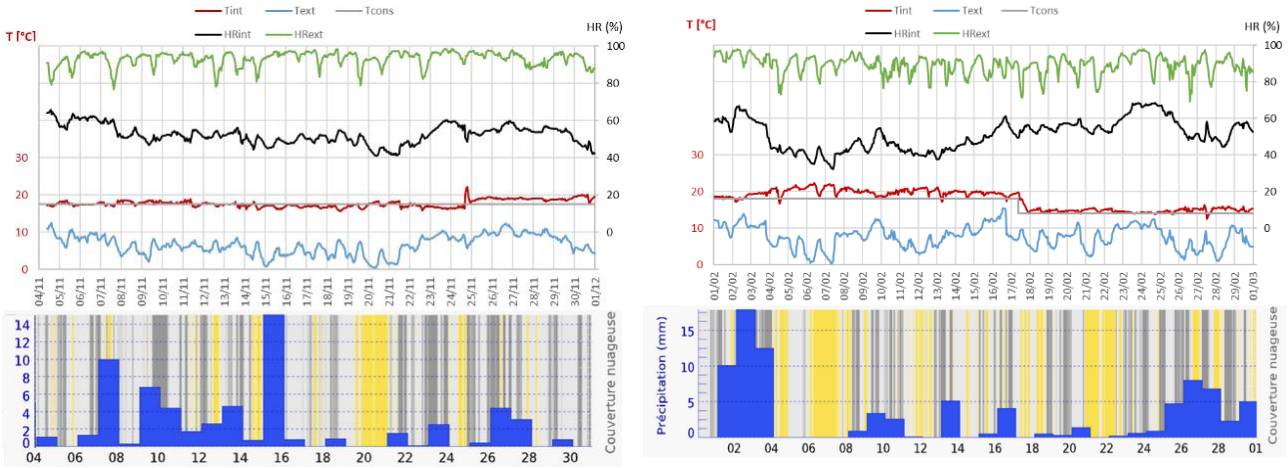


Figure IV-39 : Ambiance intérieure et météo en novembre 2019 (gauche) et février 2020 (droite)

IV.4.1 Réponse thermique du béton de chanvre en saison d'hiver

La Figure IV-40 donne les profils de température en partie courante du béton de chanvre pour des journées représentatives l'hiver, sans (18/11/2019 et 05/02/2020) et avec soleil (19/11/2019 et 06/02/2020). La nuit le profil de température est décroissant sur toute l'épaisseur du mur, en lien avec un flux déperditif traversant. Le jour, en période non ensoleillée, la température extérieure augmente et conduit à un gradient qui se réduit, voire qui s'inverse légèrement, sur le tiers extérieur de l'épaisseur du mur. Cela conduit à limiter les déperditions pendant cette période. Les profils de température restent similaires tout au long de la journée sur les deux tiers de l'épaisseur côté intérieur. Pour les journées ensoleillées, l'absorption du rayonnement solaire conduit à une augmentation de la température de surface extérieure qui peut devenir supérieure à celle de la surface intérieure. Cette augmentation de température en surface par rapport à l'intérieur du mur conduit à une inversion des flux du côté extérieur. Ce flux se propage sur les deux tiers de l'épaisseur conduisant à une augmentation des températures internes du mur et de fait à une limitation des déperditions.

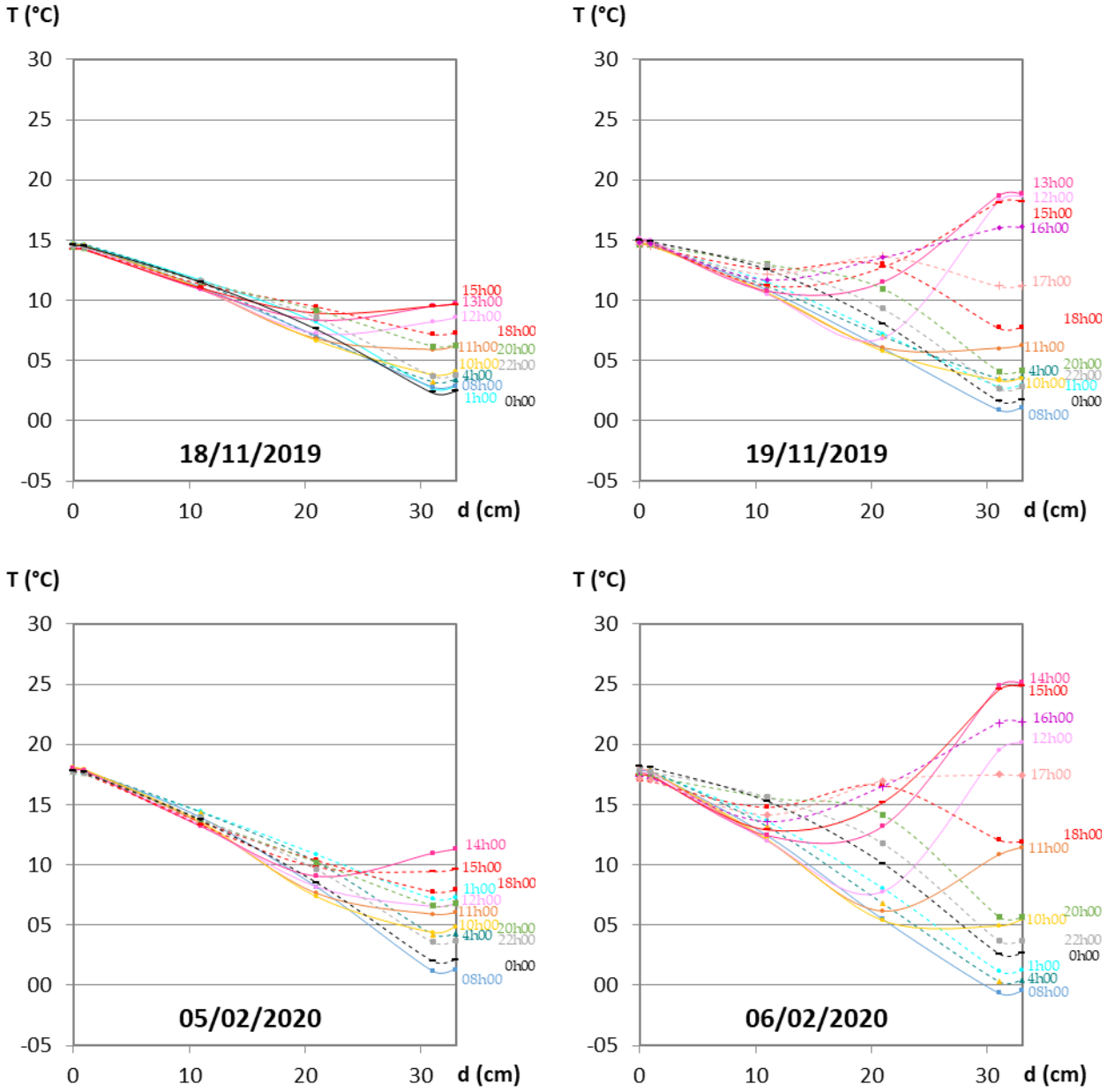


Figure IV-40 : Profils de température températures au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud sur des jours représentatifs de l'hiver sans soleil (gauche : 18/11/2019 et 05/02/2020) et avec soleil (droite : 19/11/2019 et 06/02/2020).

IV.4.2 Réponse hygrique du béton de chanvre en saison d'hiver

L'hiver, les humidités relatives observées en surface intérieure de la paroi sont plus faibles que celles observées l'été en lien avec une humidité absolue extérieure plus faible et un chauffage du bâtiment (Figure IV-41 à Figure IV-42). Les humidités relatives observées en surface extérieure sont plus fortes du fait d'une température extérieure plus faible, conduisant à des profils globalement croissants sur l'épaisseur de la paroi. Comme pour l'été, il n'y a pas de saturation identifiée dans la paroi en partie courante en béton de chanvre.

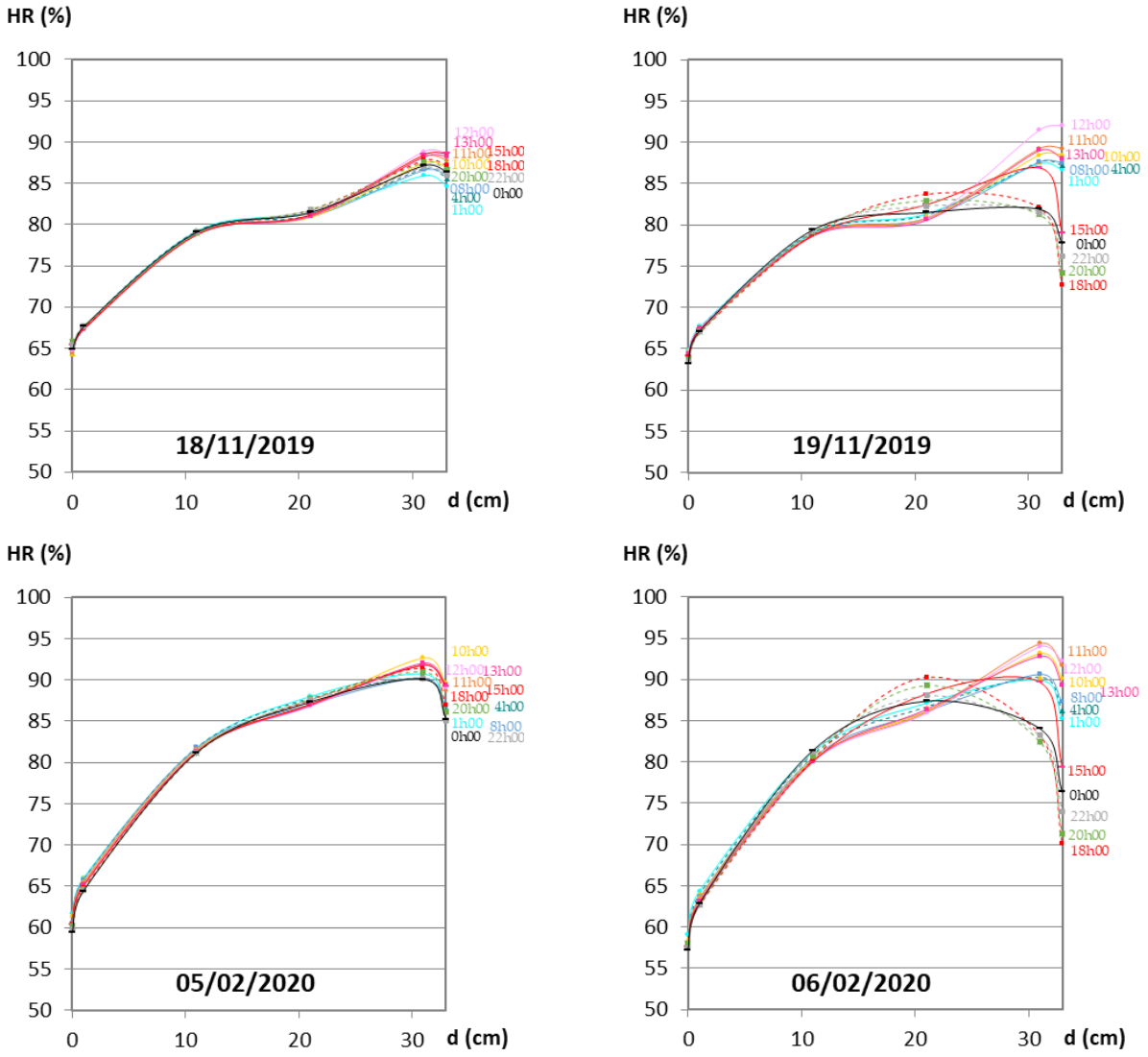


Figure IV-41 : Profils d'humidité relative au sein de la partie courante en béton de chanvre sur des jours représentatifs de l'hiver sans soleil (gauche) et avec soleil (droite).

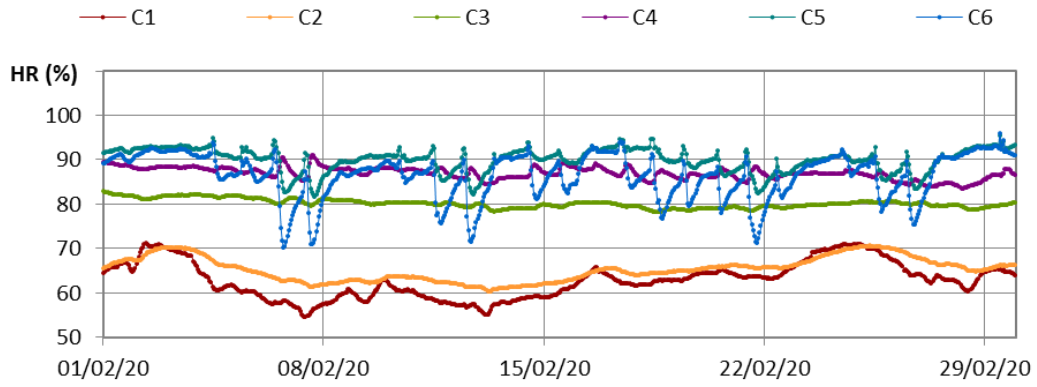


Figure IV-42: Cinétique d'humidité relative au mois de février 2020, en partie courante en béton de chanvre

Les profils de pression de vapeur en partie courante du béton de chanvre sont décroissants de l'intérieur vers l'extérieur pour les jours non ensoleillés et les nuits (Figure IV-43). Le flux de vapeur est donc traversant sur l'épaisseur de la paroi. Ces profils sont caractéristiques des profils rencontrés dans les parois en hiver. Pour les journées ensoleillées, l'élévation de température du béton de chanvre côté extérieur du mur conduit à des phénomènes de désorption qui se traduisent par une élévation de pression de vapeur qui engendre un flux à la fois vers l'extérieur du mur et vers le cœur de la paroi. Ce dernier se propage sur les deux tiers de l'épaisseur du mur de façon générale et n'arrive que très rarement jusqu'à la surface intérieure.

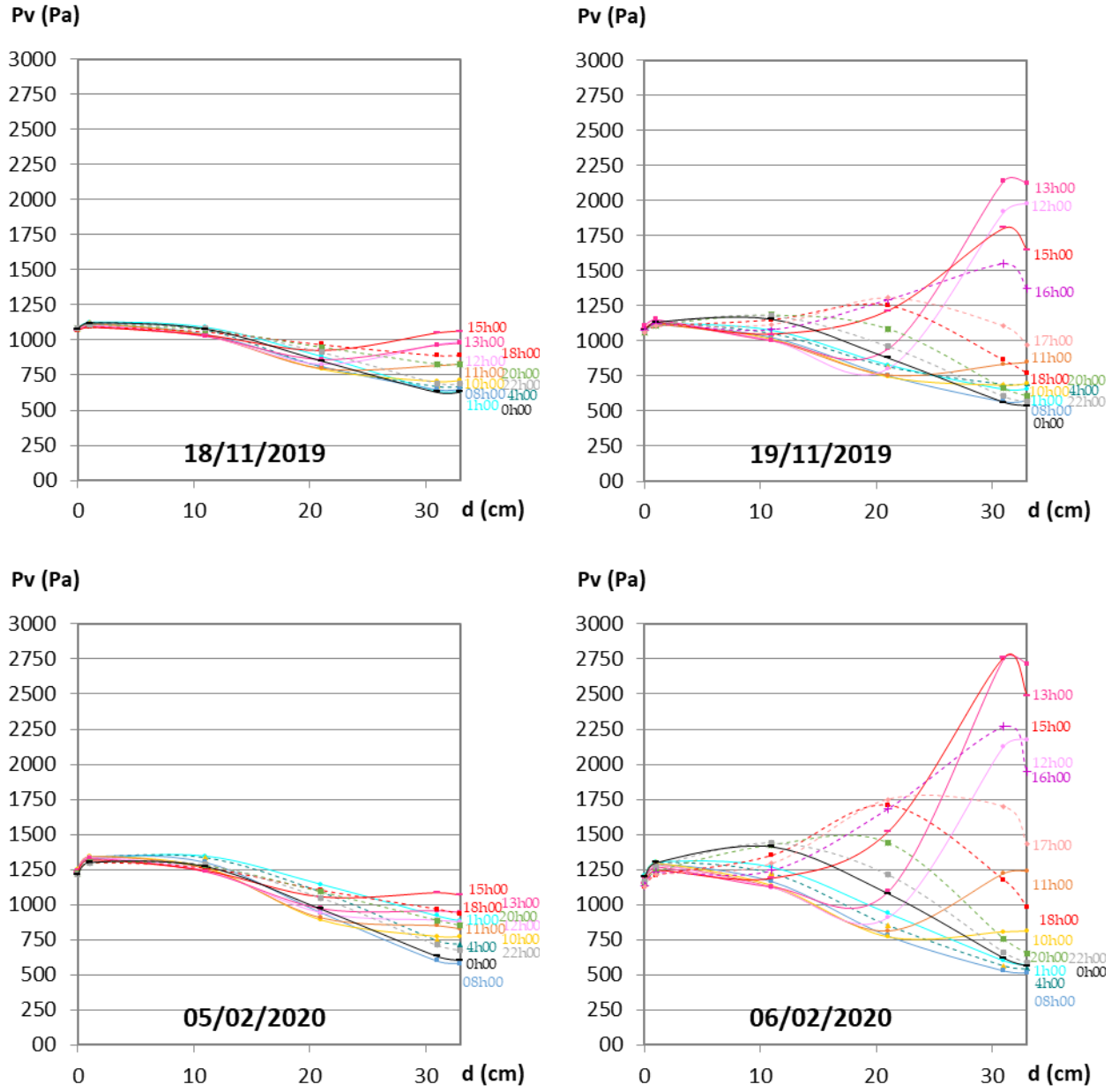


Figure IV-43 : Profils de pression de vapeur au sein de la partie courante en béton de chanvre de la paroi sud sur des jours représentatifs de l'hiver sans soleil (gauche : 18/11/2019 et 05/20/2020) et avec soleil (droite : 19/11/2019 et 06/02/2020).

IV.4.3 Ambiance intérieure et confort en saison d'hiver

Le suivi des températures et humidités relatives ambiantes intérieures (Figure IV-39) montre que la température intérieure est relativement stable, proche de la température de consigne. En février, on observe de légers dépassements de consigne lors des journées ensoleillées et froides (exemple les 6, 7 et 12). L'humidité relative intérieure est majoritairement comprise entre 40 et 60%, quelles que soient les conditions extérieures.

Afin d'évaluer plus précisément les conditions de confort, les ambiances intérieures sont reportées sur le polygone de confort (Figure IV-44). Pour le mois de novembre 2019, la majorité des ambiances relevée est incluse dans le polygone de confort. Néanmoins, la consigne étant à 17,5°C, la température est un peu trop faible pour quelques points. Pour le mois de février 2020, lorsque la consigne est à 18°C, l'ambiance intérieure se situe dans le polygone de confort 100% du temps alors que l'hygrométrie à l'extérieur est très élevée. Lorsque la consigne est à 14°C (fin du mois de février), l'ambiance intérieure se situe hors du polygone de confort du fait d'une température de consigne trop basse.

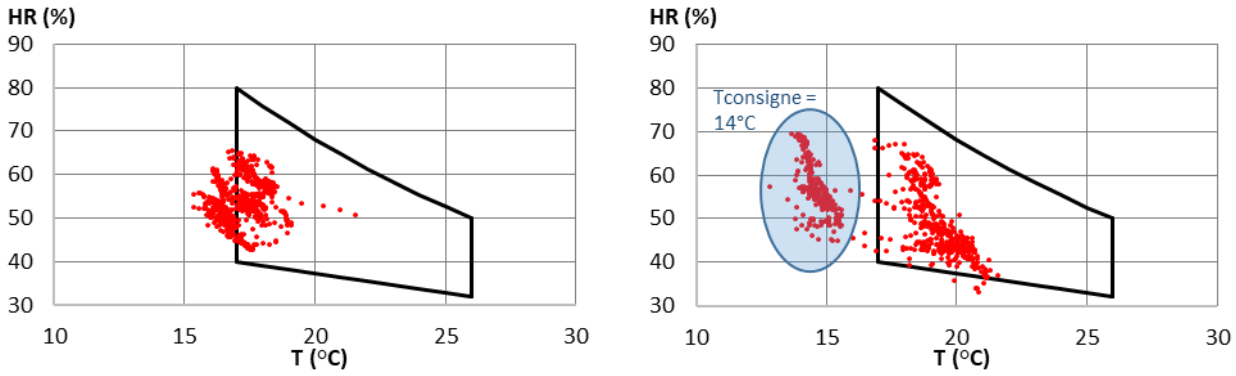


Figure IV-44 : Report des ambiances intérieures sur le polygone de confort en novembre 2019 (gauche) et février 2020 (droite) – 1 point toutes les 5 minutes

IV.5 Conclusion

Le suivi du comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre a été réalisé sur 3 ans, incluant une période de séchage suite à la mise en œuvre puis une période en régime hygrothermique établi. L'étude en phase de régime hygrothermique établi présentée dans ce chapitre, distingue la saison d'été et la saison d'hiver.

En été :

- Les parois en béton de chanvre amortissent et retardent bien les variations journalières de température, permettant de limiter et différer les apports par les parois opaques, et ainsi de limiter les risques de surchauffes.

- Les profils de températures en partie courante montrent que le tiers extérieur du mur est le plus actif, en réponse aux sollicitations extérieures, avec des variations journalières de température importantes, d'autant plus que la journée est ensoleillée. Sur le tiers intérieur, quelles que soient les conditions, la variation de température est faible, en lien avec l'amorti et le déphasage lors de la diffusion de la chaleur. Les gradients de température sont faibles, conduisant à des échanges limités.

- L'humidité relative au sein des parois est toujours inférieure à 100 % ce qui indique qu'il n'y a pas de risque de condensation observé.

- L'analyse des flux d'humidité est basée sur les profils de pression de vapeur. En partie courante du béton de chanvre, de légers flux d'humidité sont identifiés entre le mur et l'ambiance intérieure. Ceux-ci résultent du gradient de pression de vapeur entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment et de phénomènes de sorption-désorption qui apparaissent au sein du mur, dans le tiers

extérieur de la paroi, sous l'effet des variations de température principalement. Ces phénomènes sont d'autant plus marqués que les journées sont ensoleillées du fait de l'absorption du rayonnement solaire par le mur. L'absence de charges internes ne permet pas de montrer les capacités de régulation hygrique du béton de chanvre.

- Durant la période d'étude, aucune situation de surchauffe n'a été rencontrée y compris pendant les périodes chaudes. Le diagramme de confort adaptatif montre un taux d'acceptabilité supérieur à 80 % la plupart du temps. L'humidité relative est un peu élevée, en lien avec les conditions météo locales.

- Les comportements hygrothermiques au sein du béton de chanvre relevés in-situ sur la période d'été sont analogues à ceux observés sur la paroi terre-chanvre en ambiances contrôlées, compte tenu des différences de propriétés et de sollicitations.

En saison d'hiver :

- Les jours non ensoleillés, les profils de températures sont décroissants sur toute l'épaisseur du mur et conduisent à un comportement déperditif tout au long de la journée. Les jours ensoleillés, l'absorption du rayonnement solaire en façade conduit à une élévation de température sur les deux tiers extérieurs du mur ce qui limite les déperditions.

- Les profils d'humidités relative montrent qu'il n'y a pas de risque de condensation interne au sein des différentes parois.

- Les jours non ensoleillés, les profils de pression de vapeur conduisent à des flux d'humidité de l'ambiance intérieure vers l'ambiance extérieure. Les jours ensoleillés, les élévations de température dans le mur conduisent à des phénomènes de désorption qui induisent des inversions de flux dans le mur qui n'atteignent que très rarement la surface intérieure.

- L'ambiance intérieure se situe dans le polygone de confort dans la mesure où la température de consigne de chauffage est suffisante (18°C).

Au bilan, l'étude in-situ permet de montrer que le comportement de la paroi en béton de chanvre est aussi bien adapté à la saison d'été qu'à la saison d'hiver, en limitant les flux traversants et en contribuant au confort intérieur.

Conclusion générale

Cette thèse porte sur l'étude du comportement hygrothermique de matériaux bio-sourcés à l'échelle de la paroi en ambiance contrôlée et à l'échelle du bâtiment in-situ.

L'étude à l'échelle de la paroi s'est appuyée sur les travaux antérieurs du laboratoire pour la sélection des matériaux constitutifs des parois étudiées. Ces parois sont montées en mur séparatif d'une enceinte bi-climatique et constituent chacune un quart du mur. Elles sont instrumentées en température, en humidité relative et en flux de chaleur. La paroi terre-chanvre a été particulièrement étudiée sous différents climats, avec différents types de sollicitations et a été modélisée dans Wufi.

Six climats d'été et de mi-saison atteignables avec le dispositif expérimental sont retenus : trois climats français et trois climats tunisiens.

Dans la première phase d'un essai, la paroi est stabilisée sous gradient constant de température et de pression de vapeur, correspondant aux moyennes des conditions nuit. Cette phase, d'une durée d'environ deux semaines, a permis d'identifier le coefficient de transmission surfacique de la paroi, avec des valeurs expérimentales et numériques cohérentes entre elles et avec la valeur théorique issue des propriétés du matériau. Bien que le critère de stabilisation soit atteint, les résistances hygriques ne peuvent pas être déterminées et nécessitent la prolongation de la simulation jusqu'au régime permanent.

Après la stabilisation, trois types d'étude dynamique sont réalisés. Dans les deux premiers, l'ambiance intérieure est maintenue constante. Un cycle est établi à partir d'une journée représentative sans soleil pour chaque site météo pour illustrer le comportement dans diverses situations comme une exposition nord, des jours nuageux ou une présence de masque. Un autre cycle considère des températures et humidités relatives équivalentes extérieures pour prendre en compte l'effet de l'ensoleillement sur la paroi. Le troisième type simule une charge en humidité côté intérieur alors que la paroi est sollicitée avec un cycle jour-nuit sans soleil côté extérieur.

Les humidités relatives obtenues dans les différentes conditions montrent qu'il n'y a pas de condensation interne pour aucun site météo. Les phénomènes de sorption-désorption mis en évidence sont amplifiés par l'augmentation de la température, que celle-ci soit due à une augmentation de la température ambiante ou à la prise en compte de l'ensoleillement. D'un point de vue thermique, les amortis et déphasages obtenus montrent la bonne inertie de la paroi qui permet de s'affranchir des apports par les parois opaques en saison estivale. De la même façon, les sollicitations hygriques en surface extérieure n'atteignent quasiment pas la surface intérieure. La sollicitation hygrique en surface intérieure conduit à une profondeur de pénétration de 8 centimètres selon la simulation. Le défaut du capteur ne permet pas de le comparer expérimentalement.

Pour le climat de Rennes, les résultats obtenus pour la paroi terre-chanvre sont comparés à ceux obtenus sur trois autres parois comprenant toutes 15 à 20 centimètres d'isolant Biofib Trio ®. La paroi Isobio correspond à la solution technique définie pour les bâtiments neufs dans le cadre du projet européen Isobio. La paroi Maïs comprend des panneaux de PVA-Chanvre et un parement intérieur en résidu de rafles de maïs enduit choisi pour ses qualités de régulateur hygrique élevées. La paroi Colza comprend des panneaux de colza dont la production est réalisée sans liant additif et qui présentent à la fois de bonnes performances thermiques et hygriques.

Comme pour la paroi terre-chanvre, à l'issue de la stabilisation, la résistance thermique de conduction obtenue à partir des résultats expérimentaux et numériques conduit à des valeurs comparables à la valeur théorique. La résistance thermique des parois Isobio, Maïs et Colza sont de l'ordre de 6 $m^2.K.W^{-1}$, plus importante que celle de la paroi terre-chanvre (2,5 $m^2.K.W^{-1}$), en partie due à la présence d'isolant Biofib Trio ®.

Lors des sollicitations cycliques, les faisceaux de profils de températures tracés sur 24 heures sont proches pour les quatre parois. Par contre, les faisceaux de pression de vapeur présentent toutes un pic de désorption côté extérieur mais ont une évolution assez différente au sein de la paroi.

L'effet de l'ensemble membrane Intello-OSB est particulièrement visible, avec un blocage du flux de vapeur dans la paroi Isobio. Comme pour la paroi terre, les phénomènes de sorption-désorption sont amplifiés par l'augmentation de la température. La sollicitation hygrique en surface intérieure montre l'effet tampon hygrique apporté par les matériaux classés excellents régulateurs hygriques.

Les humidités relatives obtenues dans les différentes conditions montrent qu'il n'y a pas de condensation interne dans aucune des parois.

Au bilan, la bonne inertie thermique et hygrique et l'absence de risque de condensation interne montre la pertinence des parois composées de matériaux bio-sourcés considérées dans les conditions étudiées.

Les résultats numériques sont globalement satisfaisants, particulièrement en thermiques mais avec quelques écarts en hygrique. Toutefois, ils permettent d'évaluer globalement le comportement de la paroi.

L'étude à l'échelle du bâtiment porte sur un bâtiment rénové en béton de chanvre situé en Normandie. Le suivi expérimental réalisé sur deux ans permet de sélectionner plusieurs séquences d'été et d'hiver. Les résultats reportent les mesures de température et d'humidité relative mesurées en partie courante du béton de chanvre.

Tout comme lors de l'étude en ambiances contrôlées sur la paroi terre-chanvre, les profils de températures en partie courante montrent que le tiers extérieur du mur est le plus actif, en réponse aux sollicitations extérieures, avec des variations journalières de température importantes, d'autant plus que la journée est ensoleillée. Sur le tiers intérieur, quelles que soient les conditions, la variation de température est faible, en lien avec l'amorti et le déphasage lors de la diffusion de la chaleur. En été, les gradients de température sont faibles, conduisant à des échanges limités. En hiver, l'étude in-situ montre que les jours non ensoleillés, les profils de températures sont décroissants sur toute l'épaisseur du mur et conduisent à un comportement déperditif tout au long de la journée. Les jours ensoleillés, l'absorption du rayonnement solaire en façade conduit à une élévation de température sur les deux tiers extérieurs du mur ce qui limite les déperditions.

Toute l'année, l'humidité relative au sein des parois est toujours inférieure à 100 % ce qui indique qu'il n'y a pas de risque de condensation observé. Des phénomènes de sorption-désorption apparaissent dans le tiers extérieur de la paroi et sont amplifiés les journées ensoleillées. En été, un léger flux de vapeur est transmis de la paroi à l'ambiance intérieure, en hiver ce flux est généralement de l'intérieur vers l'extérieur, mais il peut s'inverser sous l'effet des phénomènes de sorption-désorption. L'absence de charges internes ne permet pas de montrer les capacités de régulation hygrique du béton de chanvre.

Durant la période d'étude, aucune situation de surchauffe n'a été rencontrée y compris pendant les périodes chaudes. Le diagramme de confort adaptatif montre un taux d'acceptabilité supérieur à 80 % la plupart du temps. L'humidité relative est un peu élevée, en lien avec les conditions météo locales. En hiver, 'ambiance intérieure se situe dans le polygone de confort dans la mesure où la température de consigne de chauffage est suffisante (18°C).

Au bilan, les études menées en ambiance contrôlée et in-situ montrent la pertinence des solutions techniques considérées. Toutefois, ces études pourraient être complétées. L'étude numérique faite sur l'été pourrait être complétée au cas d'hiver d'une part et pourrait être réalisée en considérant des fichiers météo d'autre part. Par ailleurs, l'étude numérique pourrait également être étendue aux autres parois. In-situ l'étude réalisée sur un bâtiment réel non occupé, pourrait être complétée par une simulation à l'échelle du bâtiment comprenant des charges internes.

Références

Abbas Mohamed Said. 2021. ‘Caractérisations Multi-Physiques Des Mortiers Biosourcés Isolants et Modélisation de Leurs Impacts Sur Les Transferts’. France: Université de Lyon.

Agence Nationale Pour La Maitrise de l’énergie’. 2013. 2013. http://www.anme.tn/q=en/content/construction.

Ahmad Muhammad Riaz, and Bing Chen. 2020. ‘Influence of Type of Binder and Size of Plant Aggregate on the Hygrothermal Properties of Bio-Concrete’. Construction and Building Materials 251 (August): 118981. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118981.

Amziane Sofiane, and Laurent Arnaud. 2013. Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes. Wiley-ISTE. France.

Anderson Robert B. 1946. ‘Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller Equation 1’. Journal of the American Chemical Society 68 (4): 686–91. https://doi.org/10.1021/ja01208a049.

Anderson Robert B., and W. Keith Hall. 1948. ‘Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller Equation II 1’. Journal of the American Chemical Society 70 (5): 1727–34. https://doi.org/10.1021/ja01185a017.

Ashrae 2004, Confort d'été : Déphasage thermique et amortissement, Diffusivité et effusivité ASHRAE STANDARDS COMMITTEE 2003-2004.

Atlas Jeune Afrique. 2020. Une sratégie sur la diversité biologique a l’horizon 2020. Tunisie.

Bejat Timea, Amandine Piot, Arnaud Jay, and Laetita Bessette. 2015. ‘Study of Two Hemp Concrete Walls in Real Weather Conditions’. Energy Procedia 78 (November): 1605–10. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.221.

Benfratello S., C. Capitano, G. Peri, G. Rizzo, G. Scaccianoce, and G. Sorrentino. 2013. ‘Thermal and Structural Properties of a Hemp–Lime Biocomposite’. Construction and Building Materials 48 (November): 745–54. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096.

Bettaieb Hanene. 2018. ‘Rationalisation de La Consommation d’énergie et Qualité de Développement Durable: Étude de La Relation Consommation d’énergie - Croissance Économique (Cas de La Tunisie)’. France: University saclay Paris.

Brachelet Franck, Mounir Asli, Emmanuel Antczak, Flore Brue, Didier Defer, and Alain Lucas. 2020. ‘Hygrothermal Behaviour of Flax Shives Used as Insulation Material in an Attic of a Traditional House’. Edited by M. El Ganaoui, B. Liu, R. Bennacer, S. Morsli, and M. Darcherif. MATEC Web of Conferences 307: 01017. https://doi.org/10.1051/matecconf/202030701017.

Brouard Eloïse. 2018. ‘Effet de l’adaptation des pratiques culturales de la vigne en réponse au changement climatique (manipulation de la canopée, utilisation d’acide abscissique) sur le potentiel qualitatif de la baie de raisin : Approches agronomique, analytique et transcriptomique.’ France: Université de Bordeaux.

Bruijn Paulien de, and Peter Johansson. 2013. ‘Moisture Fixation and Thermal Properties of Lime–Hemp Concrete’. Construction and Building Materials 47 (October): 1235–42. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.006.

Brunauer Stephen, Lola S. Deming, W. Edwards Deming, and Edward Teller. 1940. ‘On a Theory of the van Der Waals Adsorption of Gases’. Journal of the American Chemical Society 62 (7): 1723–32. https://doi.org/10.1021/ja01864a025.

Busbridge Ruth, and Ranyl Rhydwen. 2010. ‘AN INVESTIGATION OF THE THERMAL PROPERTIES OF HEMP AND CLAY MONOLITHIC WALLS’, 9.

Cérézo Véronique. 2005. ‘Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d’un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique’. France: Institut natioanle des sciences appliquées de Lyon.

Chabannes Morgan, Jean-Charles Bénézet, Laurent Clerc, and Eric Garcia-Diaz. 2014. ‘Use of Raw Rice Husk as Natural Aggregate in a Lightweight Insulating Concrete: An Innovative Application’. Construction and Building Materials 70 (November): 428–38. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.025.

Chamoin Julien. 2013. ‘Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation’. France: INSA de Rennes.

Chennouf Nawal, Boudjemaa Agoudjil, Tarek Alioua, Abderrahim Boudenne, and Karim Benzarti. 2019. ‘Experimental Investigation on Hygrothermal Performance of a Bio-Based Wall Made of Cement Mortar Filled with Date Palm Fibers’. Energy and Buildings 202 (November): 109413. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109413.

Claude Sophie 2018. ‘Etude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain’. France: Université de Toulouse.

Collet F, S Pretot, B Mazhoud, L Bessette, C Lanos, and Rue Aristide Bergès. 2015. ‘COMPARING HEMP COMPOSITES MADE WITH MINERAL OR ORGANIC BINDER ON THERMAL, HYGRIC AND MECHANICAL POINT OF VIEW.’ 33 (2):

Collet Florence. 2004. ‘CARACTERISATION HYDRIQUE ET THERMIQUE DE MATERIAUX DE GENIE CIVIL A FAIBLES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX’. France: INSA de Rennes.

Collet Florence, Julien Chamoin, Sylvie Pretot, and Christophe Lanos. 2013. ‘Comparison of the Hygric Behaviour of Three Hemp Concretes’. Energy and Buildings 62 (July): 294–303. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010.

Collet Florence and Sylvie Pretot. 2014. ‘Thermal Conductivity of Hemp Concretes: Variation with Formulation, Density and Water Content’. Construction and Building Materials 65 (August): 612–19. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.

Collet Florence and Sylvie Pretot. 2014a. ‘Thermal Conductivity of Hemp Concretes: Variation with Formulation, Density and Water Content’. *Construction and Building Materials* 65 (August): 612–19. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.

Daouas, Naouel, Zaineb Hassen, and Habib Ben Aissia. 2010. ‘Analytical Periodic Solution for the Study of Thermal Performance and Optimum Insulation Thickness of Building Walls in Tunisia’. Applied Thermal Engineering 30 (4): 319–26. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.009.

Dartois Sophie, Sophanarith Mom, Hélène Dumontet, and Abdelwahed Ben Hamida. 2017. ‘An Iterative Micromechanical Modeling to Estimate the Thermal and Mechanical Properties of Polydisperse Composites with Platy Particles: Application to Anisotropic Hemp and Lime Concretes’. Construction and Building Materials 152 (October): 661–71. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.181.

Dhakal Ujwal, Umberto Berardi, Mark Gorgolewski, and Russell Richman. 2017. ‘Hygrothermal Performance of Hempcrete for Ontario (Canada) Buildings’. Journal of Cleaner Production 142 (January): 3655–64. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102.

Diagramme Solaire Intéractif. 2022. 2022. http://diagsol.herokuapp.com/.

Dinh T M, C Magniont, M Coutand, and G Escadeillas. 2015. ‘HEMP CONCRETE USING INNOVATIVE POZZOLANIC BINDER’ 33 (2): 6.

Données et Études Statistiques. 2022. 2022. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/.

Douzane Omar, Geoffrey Promis, Jean-Marc Roucoult, Anh-Dung Tran Le, and Thierry Langlet. 2016. ‘Hygrothermal Performance of a Straw Bale Building: In Situ and Laboratory Investigations’. Journal of Building Engineering 8 (December): 91–98. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.10.002.

Dubois Samuel, Arnaud Evrard, and Frédéric Lebeau. 2012. 'Hygrothermal Modelling of Lime-Hemp Concrete Used as Building Material and Indoor Climate Buffering Characterization', 7.

Evrard Arnaud. 2006. 'Sorption Behaviour of Lime-Hemp Concrete and Its Relation to Indoor Comfort and Energy Demand', 5.

Evrard Arnaud. 2008. 'Transient Hygrothermal Behaviour of Lime-Hemp Materials'. France: Ecole Polytechnique de Louvain.

Ferroukhi Mohammed Yacine. 2015. 'Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments: évaluation des désordres causés par l'humidité'. France: Université de La Rochelle.

Ficco Giorgio, Fabio Iannetta, Elvira Ianniello, Francesca Romana d'Ambrosio Alfano, and Marco Dell'Isola. 2015. 'U-Value in Situ Measurement for Energy Diagnosis of Existing Buildings'. Energy and Buildings 104 (October): 108–21. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.071.

Guggenheim EA. 1966. Application of Statistical Mechanics. Clarendon press. Oxford.

Haik R., A. Peled, and I.A. Meir. 2020. 'The Thermal Performance of Lime Hemp Concrete (LHC) with Alternative Binders'. Energy and Buildings 210 (March): 109740. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109740.

Hall Matthew, and David Allinson. 2009. 'Assessing the Effects of Soil Grading on the Moisture Content-Dependent Thermal Conductivity of Stabilised Rammed Earth Materials'. Applied Thermal Engineering 29 (4): 740–47. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.03.051.

IEA Buildings: Tracking Clean Energy Progress. 2018. 2018. www.iea.org/tcep/buildings/.

Isobio Project. 2015. Isobio Project. 2015. http://isobioproject.com/wp-content/uploads/2017/11/5.-ISOBIO_BCB.pdf.

Joly Daniel, Thierry Brossard, Hervé Cardot, Jean Cavailhes, Mohamed Hilal, and Pierre Wavresky. 2010. 'Les types de climats en France, une construction spatiale'. Cybergeo, June. https://doi.org/10.4000/cybergeo.23155

Knarud Jon Ivar, and Stig Geving. 2017. 'Comparative Study of Hygrothermal Simulations of a Masonry Wall'. Energy Procedia 132 (October): 771–76. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.027.

Künzel Hartwig M. 1995. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-Dimensional Calculation Using Simple Parameters. Stuttgart: IRB Verlag.

Lagouin Meryl. 2021. 'Caractérisation et optimisation multiphysiques d'une paroi bicouche bio et géosourcée'. France: Université de Toulouse.

Lagouin Méryl, Camille Magniont, Pascale Sénéchal, Peter Moonen, Jean-Emmanuel Aubert, and Aurélie Laborel-préneron. 2019. 'Influence of Types of Binder and Plant Aggregates on Hygrothermal and Mechanical Properties of Vegetal Concretes'. Construction and Building Materials 222 (October): 852–71. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004.

Latif E., R.M.H. Lawrence, A.D. Shea, and P. Walker. 2018. 'An Experimental Investigation into the Comparative Hygrothermal Performance of Wall Panels Incorporating Wood Fibre, Mineral Wool and Hemp-Lime'. Energy and Buildings 165 (April): 76–91. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.028.

Latif Eshrar, Mike Lawrence, Andy Shea, and Pete Walker. 2016. 'In Situ Assessment of the Fabric and Energy Performance of Five Conventional and Non-Conventional Wall Systems Using Comparative Coheating Tests'. Building and Environment 109 (November): 68–81. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.017.

Le A.T., A. Gacoin, A. Li, T.H. Mai, M. Rebay, and Y. Delmas. 2014. 'Experimental Investigation on the Mechanical Performance of Starch–Hemp Composite Materials'. Construction and Building Materials 61 (June): 106–13. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.084.

Lelievre D., T. Colinart, and P. Glouannec. 2014. 'Hygrothermal Behavior of Bio-Based Building Materials Including Hysteresis Effects: Experimental and Numerical Analyses'. Energy and Buildings 84 (December): 617–27. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.013.

Luikov A.V. 1975. 'Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies (Review)'. International Journal of Heat and Mass Transfer 18 (1): 1–14. https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90002-2.

Maalouf C., A.D. Tran Le, S.B. Umurigirwa, M. Lachi, and O. Douzane. 2014. 'Study of Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope under Summer Conditions in France'. Energy and Buildings 77 (July): 48–57. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.040.

Magniont Camille, Gilles Escadeillas, Marie Coutand, and Claire Oms-Multon. 2012. 'Use of Plant Aggregates in Building Ecomaterials'. European Journal of Environmental and Civil Engineering 16 (sup1): s17–33. https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682452.

Mazhoud Brahim. 2017. 'Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés'. France: INSA de Rennes.

Mazhoud Brahim, Florence Collet, Sylvie Pretot, and Julien Chamoin. 2016. 'Hygric and Thermal Properties of Hemp-Lime Plasters'. Building and Environment 96 (February): 206–16. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.013.

Mazhoud Brahim, Florence Collet, Sylvie Pretot, and Christophe Lanos. 2018. 'Development and Hygric and Thermal Characterization of Hemp-Clay Composite'. European Journal of Environmental and Civil Engineering 22 (12): 1511–21. https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1327894.

Mazhoud Brahim, Florence Collet, Sylvie Prétot, and Christophe Lanos. 2021. 'Effect of Hemp Content and Clay Stabilization on Hygric and Thermal Properties of Hemp-Clay Composites'. Construction and Building Materials 300 (September): 123878. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123878.

Medjelekh Dalel 2017. 'Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygroscopiques'. France: Université de Limoges.

Medjelekh Dalel, Laurent Ulmet, Saliha Abdou, and Frédéric Dubois. 2016. 'A Field Study of Thermal and Hygric Inertia and Its Effects on Indoor Thermal Comfort: Characterization of Travertine Stone Envelope'. Building and Environment 106 (September): 57–77. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.010.

Medjelekh Dalel, Laurent Ulmet, and Frédéric Dubois. 2017. 'Characterization of Hygrothermal Transfers in the Unfired Earth'. Energy Procedia 139 (December): 487–92. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.242.

Méteo Blue. 2022. 2022. https://www.meteoblue.com/

Méteo France. 2022. 2022. https://meteofrance.com/.

Méteo Tunisie. 2022. 2022. https://meteo-tunisie.net/

Nguyen S.T., A.D. Tran-Le, M.N. Vu, Q.D. To, O. Douzane, and T. Langlet. 2016. 'Modeling Thermal Conductivity of Hemp Insulation Material: A Multi-Scale Homogenization Approach'. Building and Environment 107 (October): 127–34. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.026.

Nguyen Tai Thu. 2010. 'Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre'. France: Université de Bretagne Sud.

Oumeziane Yacine Ait. 2012. 'Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre'. France: INSA de Rennes.

Ozolins A, A Jakovics, and A Ratnieks. 2013. 'Moisture Risks in Multi-Layered Walls - Comparison of COMSOL Multiphysics® and WUFI®PLUS Models with Experimental Results', 6.

Palomar I., G. Barluenga, R.J. Ball, and M. Lawrence. 2019. 'Laboratory Characterization of Brick Walls Rendered with a Pervious Lime-Cement Mortar'. Journal of Building Engineering 23 (May): 241–49. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.001.

Palumbo Mariana. 2015. ‘Contribution to the Development of New Bio-Based Thermal Insulation Materials Made from Vegetal Pith and Natural Binders: Hygrothermal Performance, Fire Reaction and Mould Growth Resistance’. Spain: Universitat Politècnica de Catalunya.

Philip J. R., and D. A. De Vries. 1957. ‘Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients’. Transactions, American Geophysical Union 38 (2): 222. https://doi.org/10.1029/TR038i002p00222.

Piot A, T Béjat, L Bessette, and A Jay. 2015. ‘HYGROTHERMAL BEHAVIOR OF A HEMP CONCRETE WALL: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF COATING’, 8.

Piot Amandine, Monika Woloszyn, Jean Brau, and Charlotte Abele. 2011. ‘Experimental Wooden Frame House for the Validation of Whole Building Heat and Moisture Transfer Numerical Models’. Energy and Buildings 43 (6): 1322–28. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.01.008.

Rahim M., O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre, and T. Langlet. 2015. ‘Characterization of Flax Lime and Hemp Lime Concretes: Hygric Properties and Moisture Buffer Capacity’. Energy and Buildings 88 (February): 91–99. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.043.

Rahim M., O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, and T. Langlet. 2017. ‘Experimental Investigation of Hygrothermal Behavior of Two Bio-Based Building Envelopes’. Energy and Buildings 139 (March): 608–15. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.058.

Rasooli Arash, and Laure Itard. 2018. ‘In-Situ Characterization of Walls’ Thermal Resistance: An Extension to the ISO 9869 Standard Method’. Energy and Buildings 179 (November): 374–83. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.004.

Reuge N., F. Collet, S. Pretot, S. Moisette, M. Bart, O. Style, A. Shea, and C. Lanos. 2020. ‘Hygrothermal Effects and Moisture Kinetics in a Bio-Based Multi-Layered Wall: Experimental and Numerical Studies’. Construction and Building Materials 240 (April): 117928. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117928.

Rode Carsten, Ruut Hannele Peuhkur, Lone Hedegaard Mortensen, Kurt Kielsgaard Hansen, Berit Time, and Arild Gustavsen. 2005. Moisture Buffering of Building Materials. Denmark.

Sanders Chris, Paul Baker, and Carsten Hermann. 2014. ‘Hygrothermal Assessment of Wind-Driven Rain as a Risk for Internal Insulation Retrofit of Traditional Buildings’, 8.

Seng Billy, Camille Magniont, Sandra Gallego, and Sylvie Lorente. 2021. ‘Behavior of a Hemp-Based Concrete Wall under Dynamic Thermal and Hygric Solicitations’. Energy and Buildings 232 (February): 110669. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110669.

Shea Andy, Mike Lawrence, and Pete Walker. 2012. ‘Hygrothermal Performance of an Experimental Hemp–Lime Building’. Construction and Building Materials 36 (November): 270–75. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123.

Sing K S W, J Haber, M Kerker, E Wolfram, J H Block, N V Churaev, D H Everett, et al. 1984. ‘Prepared for Publication by the Subcommittee on Reporting Gas Adsorption Data Consisting of K. S. W. SING (UK, Chairman); D. H. EVERETT (UK); R. A. W. HAUL (FRG); L. MOSCOU (Netherlands); R. A. PIEROTTI (USA); J. ROUQUEROL (France); T. SIEMIENIEWSKA (Poland)’, 17.

Sotehi Nassima. 2010. ‘Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L’isolation’. Algérie: UNIVERSITE MENTOURI - CONSTANTINE.

Tang Xiaozhi, Sajid Alavi, and Thomas J. Herald. 2008. ‘Effects of Plasticizers on the Structure and Properties of Starch–Clay Nanocomposite Films’. Carbohydrate Polymers 74 (3): 552–58. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.04.022.

Taoukil Driss, Abdelmajid El bouardi, Friedrich Sick, Abdelaziz Mimet, Hassan Ezbakhe, and Taib Ajzoul. 2013. ‘Moisture Content Influence on the Thermal Conductivity and Diffusivity of Wood–Concrete Composite’. Construction and Building Materials 48 (November): 104–15. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.067.

Technique de l'ingénieur. 2012. 'Éco-matériaux et isolation'. Construction et travaux publics | Techniques du bâtiment : le second oeuvre et les lots techniques.

Tran Le A.D., C. Maalouf, T.H. Mai, E. Wurtz, and F. Collet. 2010. 'Transient Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope'. Energy and Buildings 42 (10): 1797–1806. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.016.

Tran Le Anh D., Driss Samri, Omar Douzane, Geoffrey Promis, Anh T. Nguyen, and Thierry Langlet. 2020. 'Effect of Temperature Dependence of Sorption on Hygrothermal Performance of a Hemp Concrete Building Envelope'. In Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, 68–77. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10597-1.

Umurigirwa Vasseur Benitha Sandrine. 2014. 'Elaboration et caractérisation d'un agromatériau chanvre- amidon pour le Bâtiment'. France: Université de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE.

Valle-Zermeño R. del, J.E. Aubert, A. Laborel-Préneron, J. Formosa, and J.M. Chimenos. 2016. 'Preliminary Study of the Mechanical and Hygrothermal Properties of Hemp-Magnesium Phosphate Cements'. Construction and Building Materials 105 (February): 62–68. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.081.

Viel Marie. 2018. 'Développement de composites bio-sourcés destinés A l'isolation des bâtiments'. France: Université de Rennes.

Vu T L, S Spagnol, and C Magniont. 2015. 'EXPERIMENTAL STUDY OF THE HYGROTHERMAL BEHAVIOUR OF HEMP SHIVES-BASED PRECAST BLOCKS AT MATERIAL AND WALL SCALES' 33 (2): 8.

Walker R., S. Pavia, and R. Mitchell. 2014. 'Mechanical Properties and Durability of Hemp-Lime Concretes'. Construction and Building Materials 61 (June): 340–48. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065.

Wei Yongquan, Chunyu Song, Bing Chen, and Muhammad Riaz Ahmad. 2019. 'Experimental Investigation on Two New Corn Stalk Biocomposites Based on Magnesium Phosphate Cement and Ordinary Portland Cement'. Construction and Building Materials 224 (November): 700–710. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.100.

Wihan Jakub. 2007. 'Humidity in Straw Bale Walls and Its Effect on the Decomposition of Straw'. London: University of East London School of Computing and Technology,.

Wijesuriya Sajith, Paulo Cesar Tabares-Velasco, Kaushik Biswas, and Dariusz Heim. 2020. 'Empirical Validation and Comparison of PCM Modeling Algorithms Commonly Used in Building Energy and Hygrothermal Software'. Building and Environment 173 (April): 106750. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106750.

World Weather, Time and Date. 1998. 1998. https://www.timeanddate.com/.

Wu Dongxia, Mourad Rahim, Mohammed El Ganaoui, Rabah Djedjig, Rachid Bennacer, and Bin Liu. 2021. 'Experimental Investigation on the Hygrothermal Behavior of a New Multilayer Building Envelope Integrating PCM with Bio-Based Material'. Building and Environment 201 (August): 107995. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107995.

Wu Tingting, Emmanuel Antczak, Didier Defer, and Thierry Chartier. 2010. 'Thermal Characteristics in Situ Monitoring of Detached House Wall Constituted by Raw Clay'. European Journal of Environmental and Civil Engineering 14 (5): 653–67. https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693252.

WUFI. 1997. 1997. https://wufi.de/en/

Annexe I : Généralités sur les climats

Sommaire

I.1 Climats en France ..... A I-2
I.1.1 Généralités sur les climats ..... A I-2
I.1.2 Choix des villes étudiées ..... A I-3
I.1.3 Choix des températures et des humidités tests ..... A I-4
I.2 Climats en Tunisie ..... A I-13
I.2.1 Généralités sur les climats ..... A I-13
I.2.2 Choix des villes Tunisiennes ..... A I-14
I.2.3 Choix des températures et des humidités tests ..... A I-15

I.1 Climats en France

I.1.1 Généralités sur les climats

La France présente un climat très varié selon les régions du fait de sa position géographique. Elle est située sur la partie occidentale de l'Europe. Elle est bordée au Nord par la mer du Nord, au nord-ouest par la Manche, à l'ouest par l'océan Atlantique et au sud-est par la mer Méditerranée

Son climat est tempéré selon ces trois grandes influences avec des dégradés entre chaque aire. L'ouest subit l'influence océanique, ce qui donne d'importantes précipitations et une faible amplitude thermique (été frais, hiver doux). En s'éloignant vers l'est c'est-à-dire vers l'intérieur des terres, plus l'influence océanique s'affaiblit et plus l'influence continentale augmente : les précipitations diminuent; l'amplitude thermique augmente (les étés sont chauds et les hivers froids). En effet, dans ce côté, les montagnes françaises sont soumises à un climat dicté par l'altitude : les précipitations augmentent et les températures baissent selon le degré d'exposition aux vents. Au sud, le climat méditerranéen prend le dessus : il se caractérise par des températures douces en hiver et un été très chaud. Les précipitations peuvent être très fortes en automne, mais sont quasiment inexistantes en été.

Ces trois tendances climatiques principales se subdivisent en 8 types selon la température et les précipitations Figure A I- 1

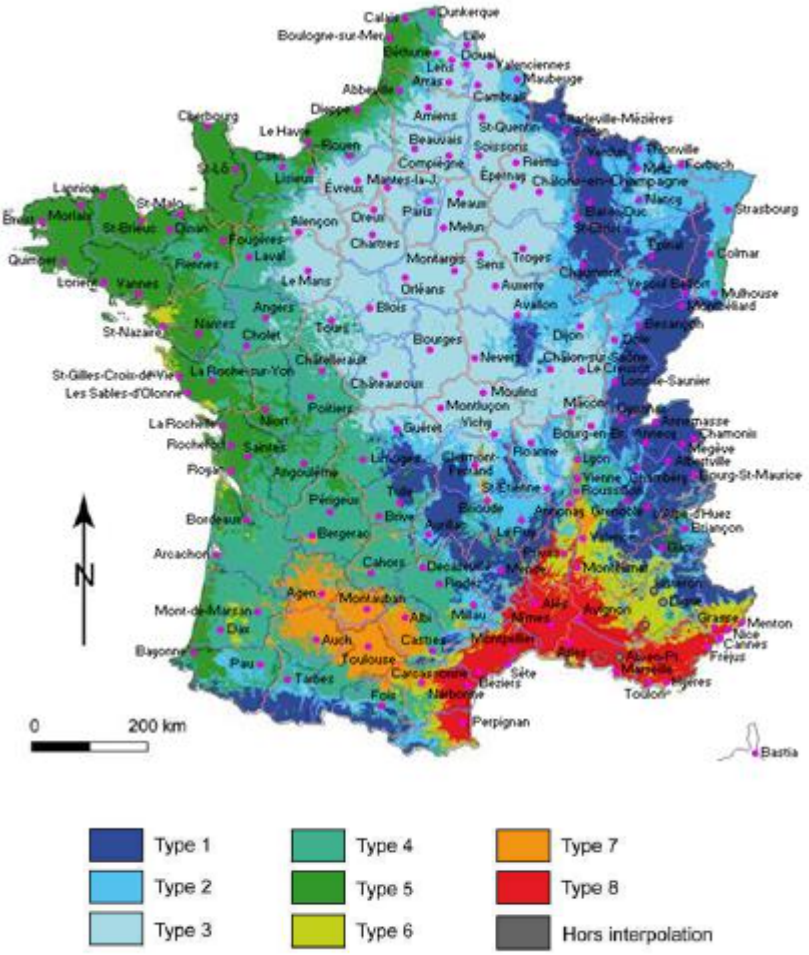


Figure A I- 1 : Types de climats en France (Joly et al. 2010)

Type 1 : Le climat montagnard

Le climat montagnard (moyennes et hautes montagnes) est plus rigoureux et plus humide, et se caractérise par des précipitations neigeuses abondantes. En été, les températures accusent de

forts contrastes diurnes et un rafraîchissement nocturne. Ce type du climat sera représenté par la ville de Pontarlier.

Type 2 : Le climat semi-continental

Ce type de climat peut être un climat de transition, il est plus ensoleillé, avec des hivers plus doux et des étés plus chauds et moins humides. Il est soumis à une double influence océanique et méditerranéenne, avec des précipitations parfois très soutenues en été et surtout en automne. Pour ce type la ville type choisie est Strasbourg.

Type 3 : Le climat océanique dégradé

C'est le climat du centre, l'influence océanique est encore perceptible, mais du a l'éloignement de la cote, il est un peu dégradé. Les pluies sont plus faibles et les températures sont intermédiaires par rapport au climat précédent. La ville choisie pour ce climat est Paris.

Type 4 : Le climat océanique altéré

Ce type de climat est considéré comme un climat de transition entre le climat océanique et celui dégradé (type 3). Il est nommé aussi climat océanique atlantique ou breton. Ce climat est brumeux, doux et humide en toute l'année en raison des effets modérateurs de l'océan. Ce type est représenté par la ville de Rennes.

Type 5 : Le climat océanique franc

La douceur océanique se conjugue à une forte humidité. L'été est frais par contre l'hiver est doux. Le temps d'ensoleillement est faible. La ville type choisie pour ce climat est Brest.

Type 6 : Le climat méditerranéen altéré

Ce type existe principalement au sud-est de la France, il est caractérisé par un été chaud et un automne ainsi que l'hiver, humide et très variable d'une année à l'autre. La ville choisie pour ce type est Digne.

Type 7 : Le climat du Bassin du Sud-Ouest

Ce type de climat est un peu chaud, l'amplitude de la température est élevée, les précipitations sont peu abondantes en cumul annuel. La ville choisie pour ce type est Toulouse.

Type 8 : Le climat méditerranéen franc

Le climat méditerranéen caractérise le sud-est de la France et la Corse, il alterne donc des étés conjuguant chaleur, ensoleillement et sécheresse. Ce climat est représenté par deux villes types qui sont Montpellier et Ajaccio (situé sur une île : la Corse).

I.1.2 Choix des villes étudiées

Pour limiter le nombre de villes représentatives à étudier, les températures et humidités relatives moyennes des minimums respectivement celles des maximums sont présentés pendant la période de 1981-2010 ('Méteo France' 2022) Figure A I- 2 et Figure A I- 3

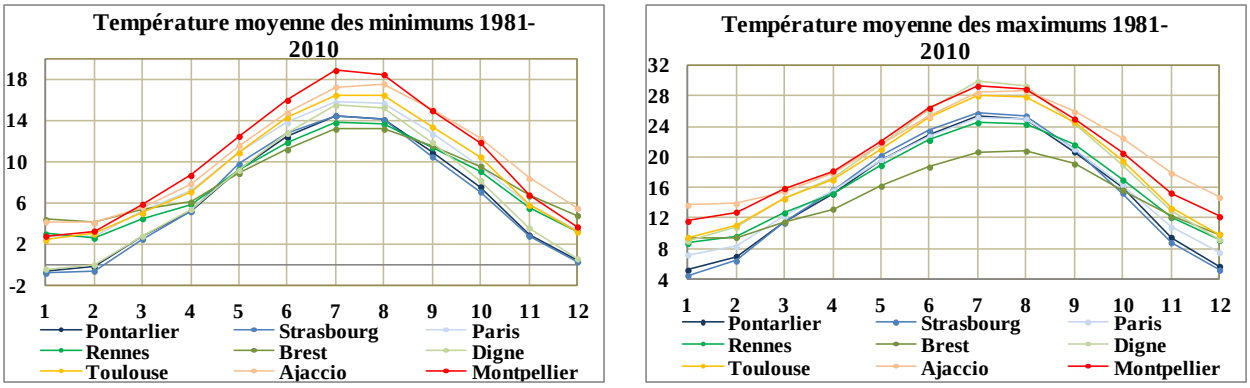


Figure A I- 2 : températures moyennes des min (gauche) et des max (droite) ('Méteo France' 2022) France 1981-2010

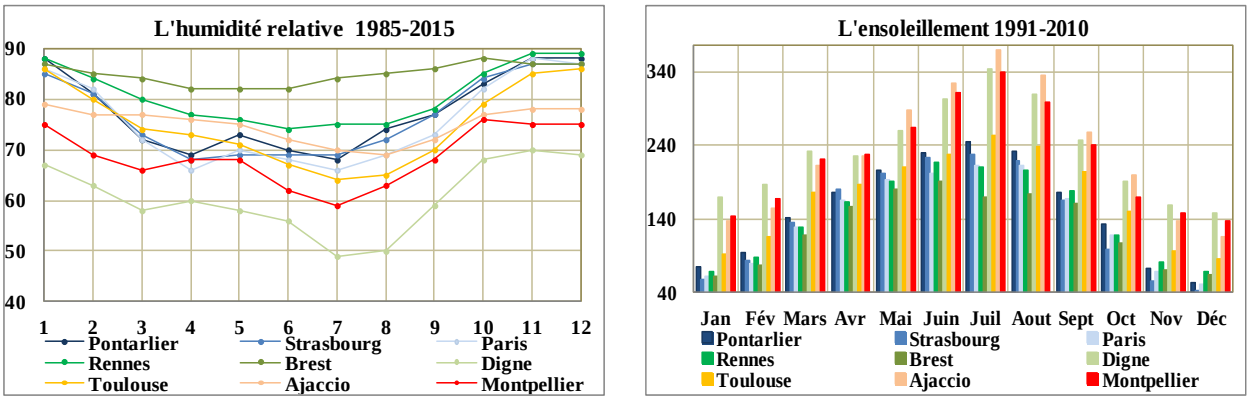


Figure A I- 3 : l'humidité relative moyenne pendant 1985-2015, source timeanddate (gauche) la durée d'ensoleillement pendant 1991-2010, ('Méteo France' 2022)

En hiver, on distingue trois tendances marquées sur les températures minimales :

- Les températures les plus froides pour Pontarlier, Strasbourg et Digne, les humidités relatives de Pontarlier et Strasbourg sont également comparables, et une valeur nettement plus faible pour Digne
- Les températures intermédiaires Rennes, Montpellier, Toulouse et Paris, avec des humidités relatives plus faibles à Montpellier,
- Les températures les moins froides pour Brest et Ajaccio, Brest ayant une humidité relative plus élevée.

En été, les températures minimales moyennes sont graduées alors que les maximales présentent trois groupes :

- Les températures les moins élevées sont observées à Brest,
- Les températures intermédiaires sont observées à Rennes, Paris, Strasbourg et Pontarlier, avec une humidité relative plus élevée à Rennes et similaire pour les trois autres villes,
- Les températures les plus élevées sont observées à Toulouse, Ajaccio, Digne et Montpellier, avec des humidités relatives différentes : par ordre croissant Digne, Montpellier, Toulouse puis Ajaccio.

Figure A I- 3 droite montre la durée d'ensoleillement moyenne enregistrée pendant la période de 1991-2010 pour chaque mois. Les résultats affichent que Digne présente la durée d'ensoleillement la plus élevée en hiver et Ajaccio en été. Par contre Brest montre la durée d'ensoleillement la plus basse en été et Strasbourg en hiver.

Au bilan, quatre villes sont retenues pour représenter les différentes tendances du climat français : Brest, Rennes, Strasbourg et Toulouse.

I.1.3 Choix des températures et des humidités tests

Après la sélection des villes, un mois type est sélectionné par saison à partir de la Figure A I-2**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** : janvier pour l'hiver, août pour l'été et mai pour les mi-saisons.

Pour déterminer des cycles journaliers représentatifs, des journées types sont recherchées pour chaque ville et pour chaque saison en se basant sur les températures minimales et maximales moyennes enregistrées sur la période de 1981-2010 ('Méteo France' 2022) Ces cycles journaliers sont recherchés prioritairement dans les années proches des moyennes décennales, Figure A I- 5. Ces cycles nous donnent accès aux hygrométries associées. Par exemple, à Rennes, au mois d'août les températures moyennes sont 13,7°C en minimale et 24,3 °C en maximale. Ainsi, sur la période présentées Figure A I- 4 le 16 août est sélectionné, le 14 n'est pas retenu car présente de trop forts gradients, le 17 n'est pas retenu pour gradient trop faible.

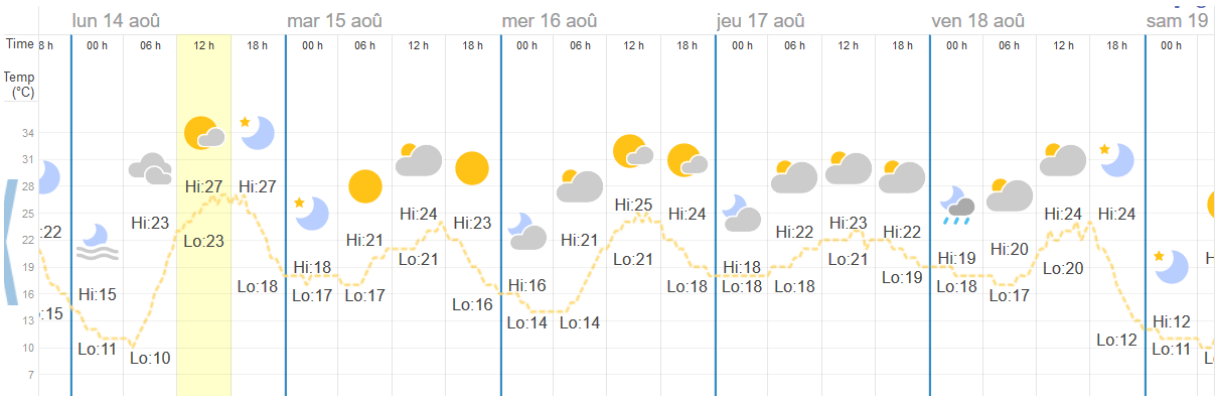


Figure A I- 4 : Evolution des températures à Rennes en août 2017

Saison d'hiver

La Figure A I- 5 présente la température moyenne minimale (gauche) et maximale (droite) du mois de Janvier de 2011 à 2020.

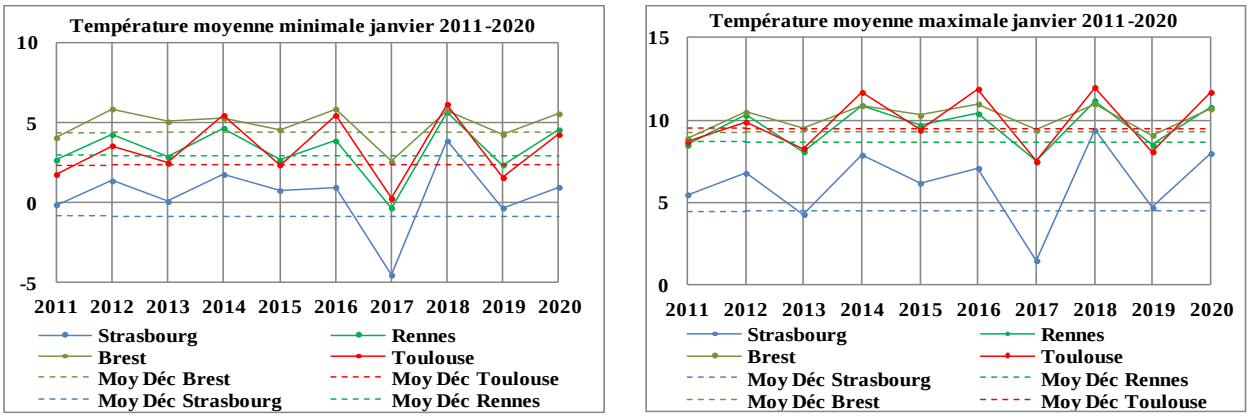


Figure A I- 5 : la température moyenne des minimums (gauche) et des maximums (droite) pour janvier pendant 2011-2020, ('Météo France' 2022)

Strasbourg

En janvier, la température moyenne de Strasbourg fluctue entre une moyenne des minimums de -0,8°C et une moyenne des maximums de 4,5°C. Des cycles représentatifs de ces fluctuations sont observés les 04, 18 et 31/01/2019 Figure A I- 6. Le scenario retenu est alors nuit T=-1°C et HR= 85% et jour T= 5°C et HR= 75%.

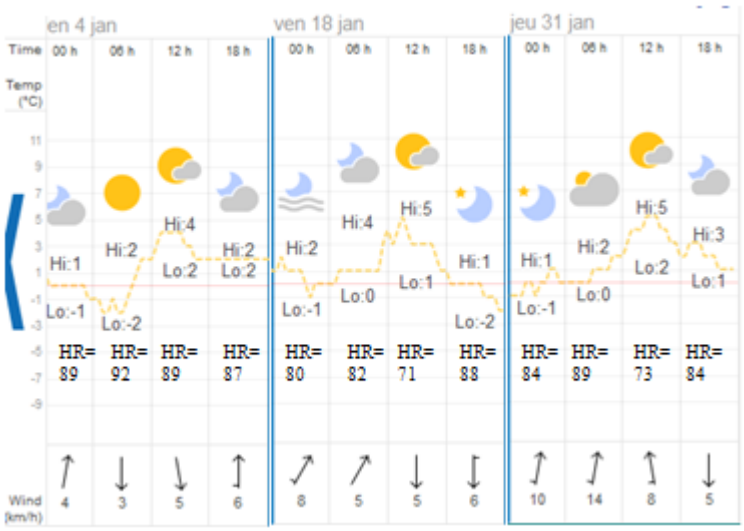


Figure A I- 6 : les jours cycle type janvier 2019 pour Strasbourg ('World Weather, Time and Date' 1998)

Pendant ce mois, un cycle plateau est fréquemment observé (Figure A I- 7). Un scénario de type palier T=3°C et HR= 95% est également envisagé.

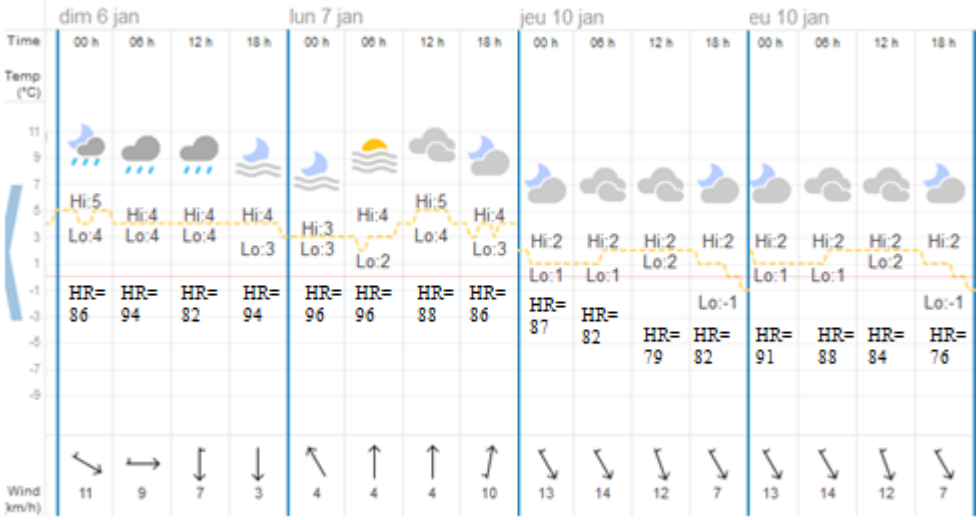


Figure A I- 7 : les jours cycle type plateau janvier 2019 pour Strasbourg ('World Weather, Time and Date' 1998)

Brest

En janvier, la température moyenne de Brest fluctue entre une moyenne des minimums de 4,4°C et une moyenne des maximums de 9,3°C. Des cycles représentatifs de ces fluctuations sont observés les 11, 17, 18 et 30/01/2019 (Figure A I- 8). Le scenario retenu est alors nuit T=4°C et HR= 75% et jour T= 9°C et HR= 75%.

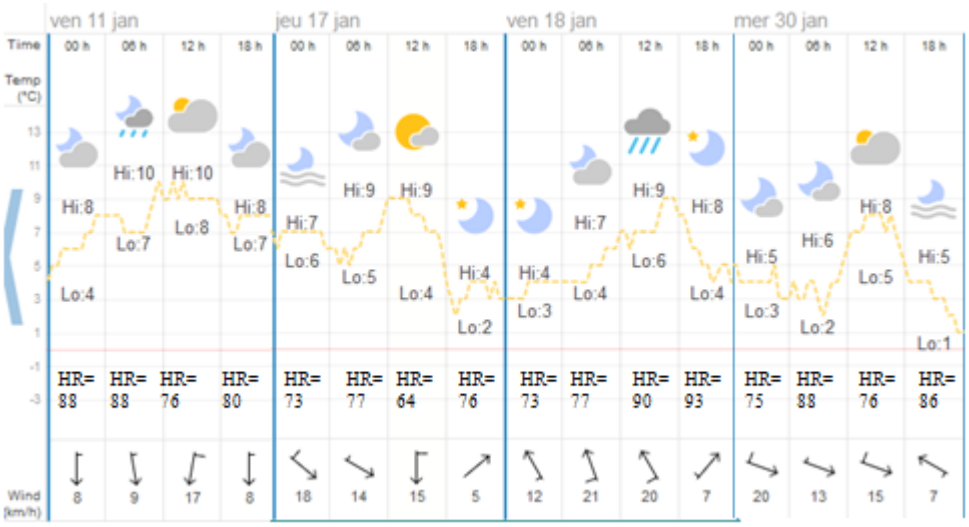


Figure A I- 8 : les jours cycle type janvier 2019 pour Brest ('World Weather, Time and Date' 1998)

Rennes

En janvier, la température moyenne de Rennes fluctue entre une moyenne des minimums de 3°C et une moyenne des maximums de 8,7°C. Des cycles représentatifs de ces fluctuations sont observés les 09, 17, 22 et le 28/01/2019 (Figure A I- 9). Le scenario retenu est alors nuit T=3°C et HR= 90% et jour T= 9°C et HR= 75%.

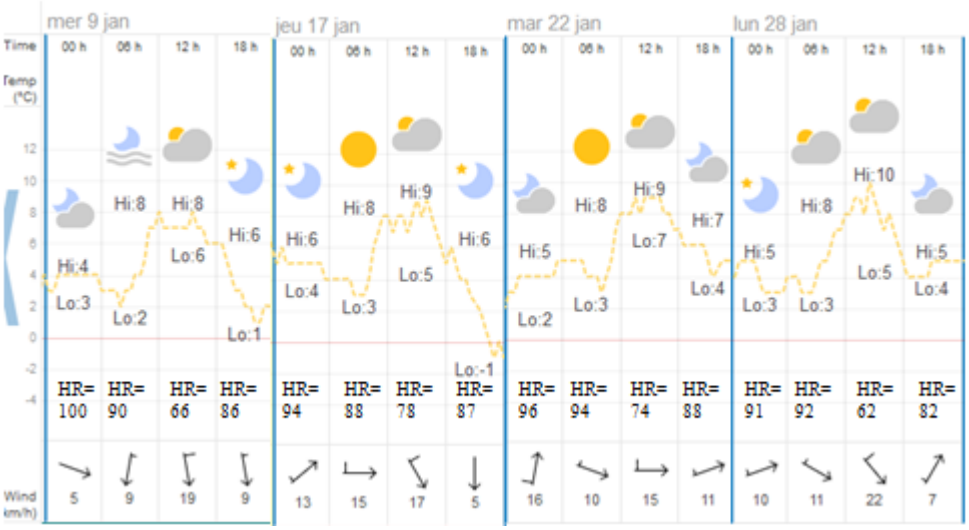


Figure A I- 9 : les jours cycle type janvier 2019 pour Rennes ('World Weather, Time and Date' 1998)

Toulouse

En janvier, la température moyenne de Toulouse fluctue entre une moyenne des minimums de 2,4°C et une moyenne des maximums de 9,5°C. Des cycles représentatifs de ces fluctuations sont observés les 08, 12, 15 et le 28/01/2019 (Figure A I- 10). Le scenario retenu est alors nuit T=3°C et HR= 88% et jour T= 8°C et HR= 80%.

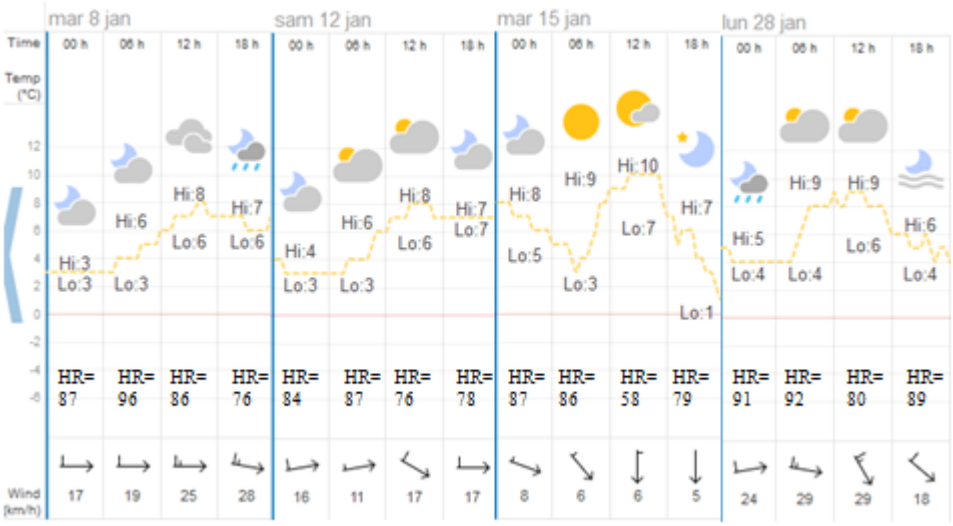


Figure A I- 10 : les jours cycle type janvier 2019 pour Toulouse ('World Weather, Time and Date' 1998)

Mi saison

La Figure A I- 11 présente la température moyenne minimale (gauche) et maximale (droite) du mois de Mai de 2011 à 2019.

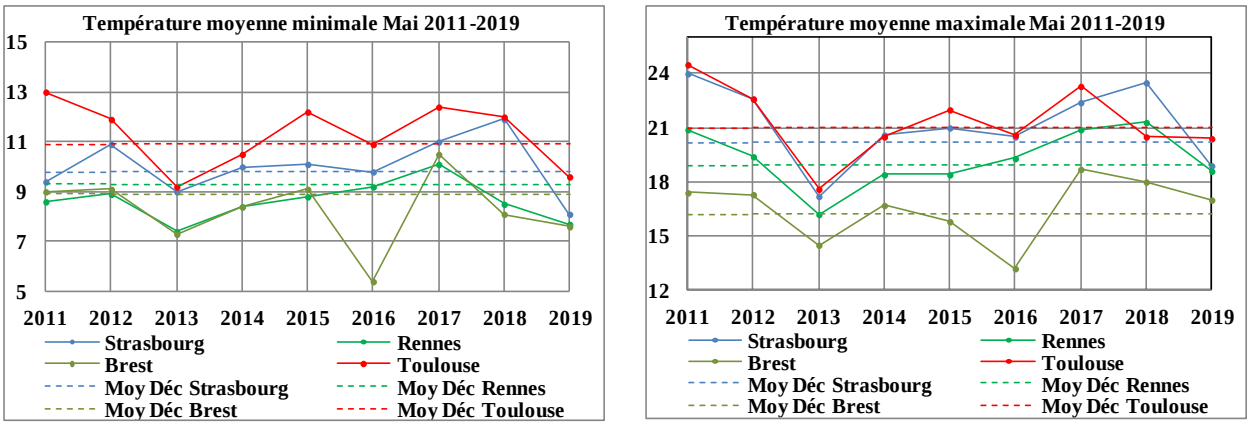


Figure A I- 11 : la température moyenne des minimums (gauche) et des maximums (droite) pour mai pendant 2011-2019, ('Météo France' 2022)

Strasbourg

En Mai, la température moyenne de Strasbourg se balance entre une moyenne des minimums de 9,8°C et une moyenne des maximums de 20,2°C.ces valeurs sont proches des moyennes présentées par l'année 2016.

Des cycles représentatifs pour ces oscillations s'affichent en 18, 19, 25 et 26/05/2016 (Figure A I- 12). Le scenario retenu est alors; nuit T=10°C et HR= 90% et jour T= 21°C et HR= 50%.

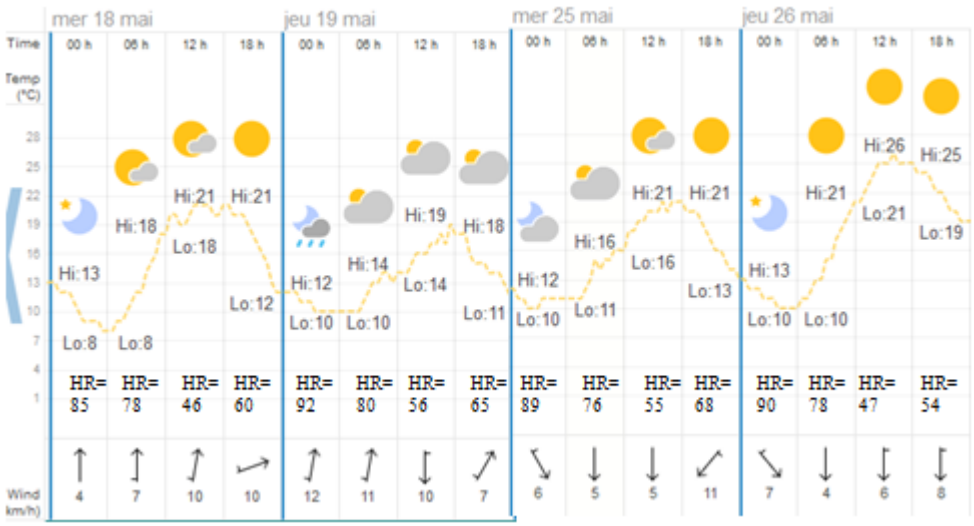


Figure A I- 12 : les jours cycle type mai 2016 pour Strasbourg ('World Weather, Time and Date' 1998)

Brest

La température moyenne de Brest en mai est entre une moyenne des minimums de 8,9°C et une moyenne des maximums de 16,2°C l'année de 2014 est la plus proche de ces moyennes.

Des cycles représentatifs pour ces fluctuations se répètent en 09, 20, 25 et 29/05/2015 (Figure A I- 13). Le scenario retenu est alors; nuit T=9°C et HR= 90% et jour T= 16.5°C et HR= 65%.

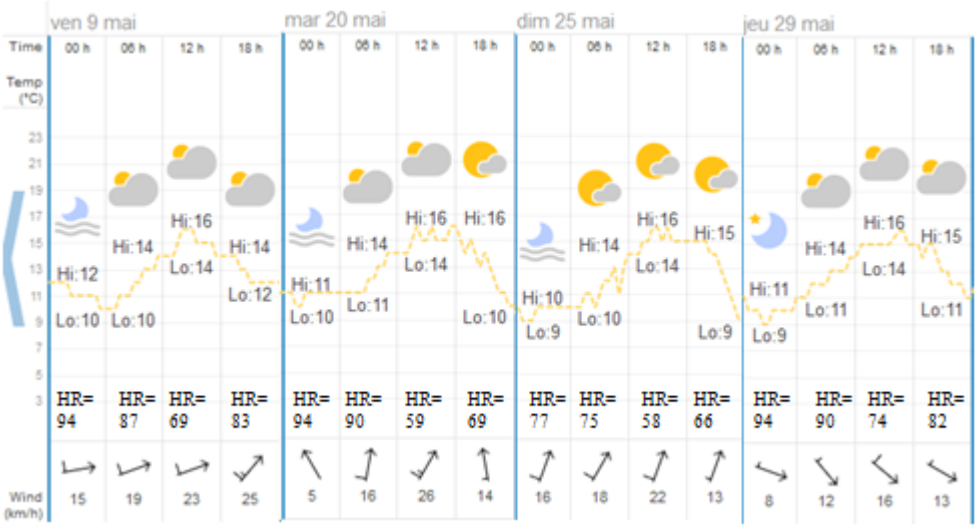


Figure A I- 13 : les jours cycle type mai 2015 pour Brest ('World Weather, Time and Date' 1998)

Rennes

La température moyenne de Rennes en mai est entre une moyenne des minimums de 9,3°C et une moyenne des maximums de 18,9°C. Pour cette ville deux années peuvent être justifiantes et proches de ces valeurs moyennes qui sont 2016 et en 2017.

Des cycles représentatifs s'affichent en 16, le 25, 27/05/2016 et aussi en 05, le 07, le 09 et 13/05/2017 (Figure A I- 14). Le scenario retenu est alors; nuit T=9°C et HR= 85% et jour T= 19°C et HR= 60%.

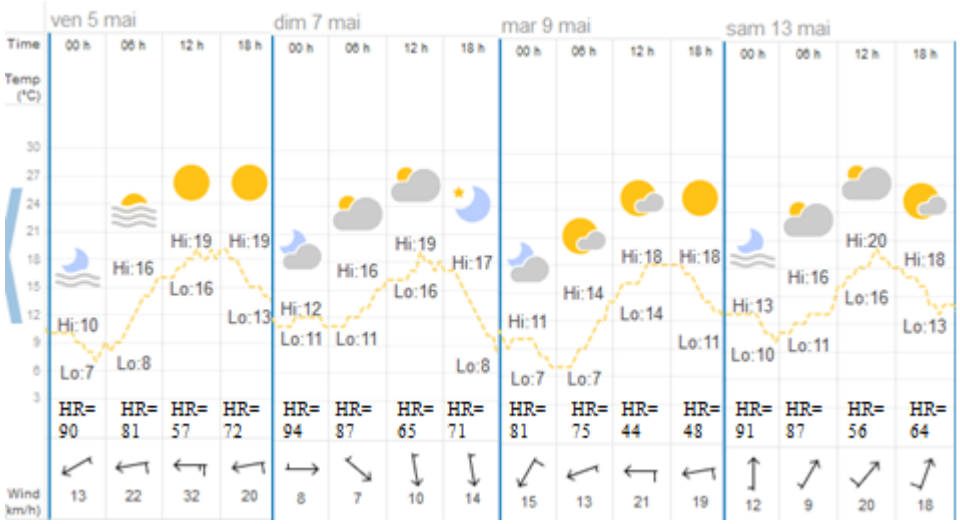


Figure A I- 14 : les jours cycle type mai 2017 pour Rennes ('World Weather, Time and Date' 1998)

Toulouse

En mai, la température moyenne de Toulouse fluctue entre une moyenne des minimums de 10,9°C et une moyenne des maximums de 21°C Ces valeurs sont proches des moyennes présentées par 2016.

Des cycles représentatifs s'affichent en 10, 17, 20, et 30/05/2016 (Figure A I- 15). Le scenario retenu est alors; nuit T=11°C et HR= 85% et jour T= 21°C et HR= 60%.

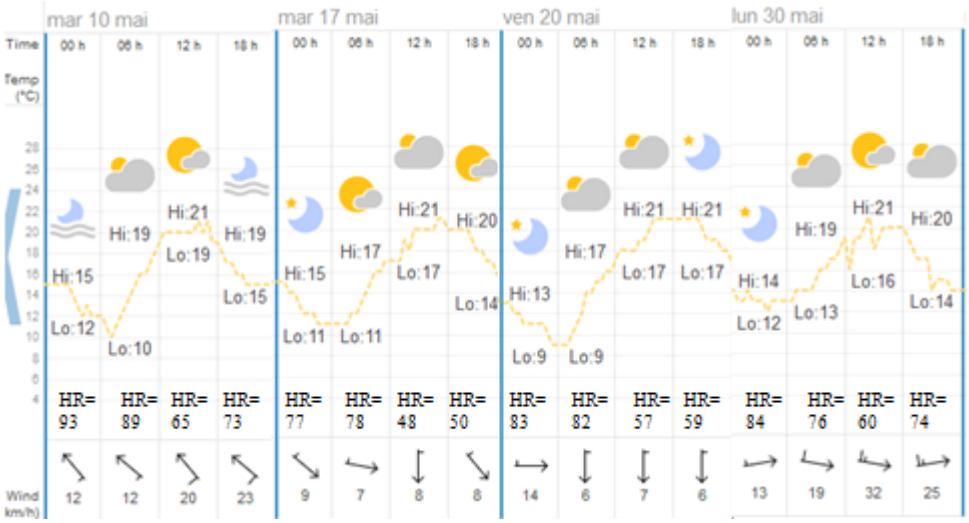


Figure A I- 15 : les jours cycle type mai 2016 pour Toulouse ('World Weather, Time and Date' 1998)

Saison d'été

La Figure A I- 16 présente la température moyenne minimale (gauche) et maximale (droite) du mois de Mai de 2011 à -2019.

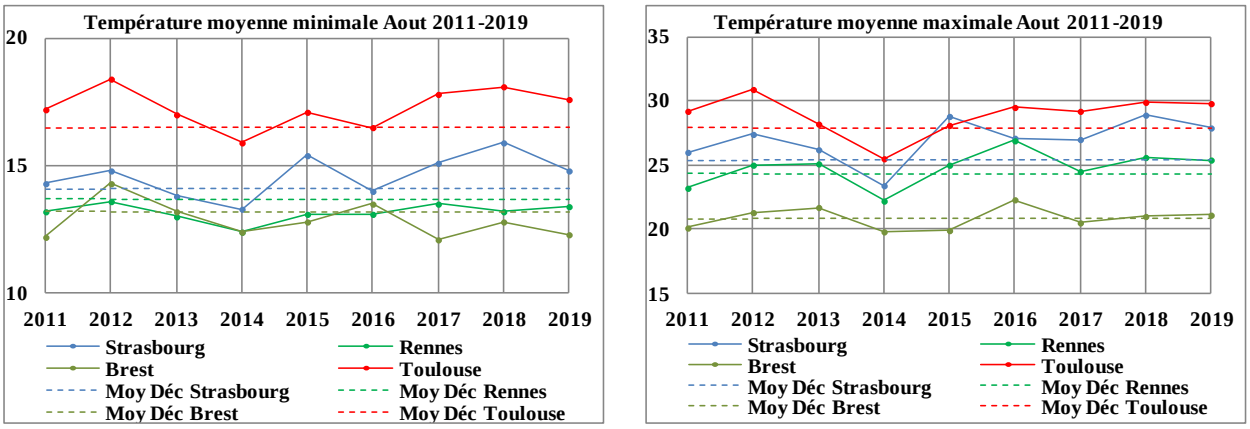


Figure A I- 16 : la température moyenne des minimums (gauche) et des maximums (droite) pour Aout pendant 2011-2019, ('Météo France' 2022)

Strasbourg

En Aout, la température moyenne de Strasbourg est entre une moyenne des minimums de 14,1°C et une moyenne des maximums de 25,4°C Ces valeurs sont proches des moyennes présentées par l'année 2016.

Des cycles représentatifs s'affichent en 06, 08, 12et 17/08/2016 (Figure A I- 17). Le scenario retenu est alors; nuit T=14°C et HR= 82% et jour T= 25°C et HR= 55%.

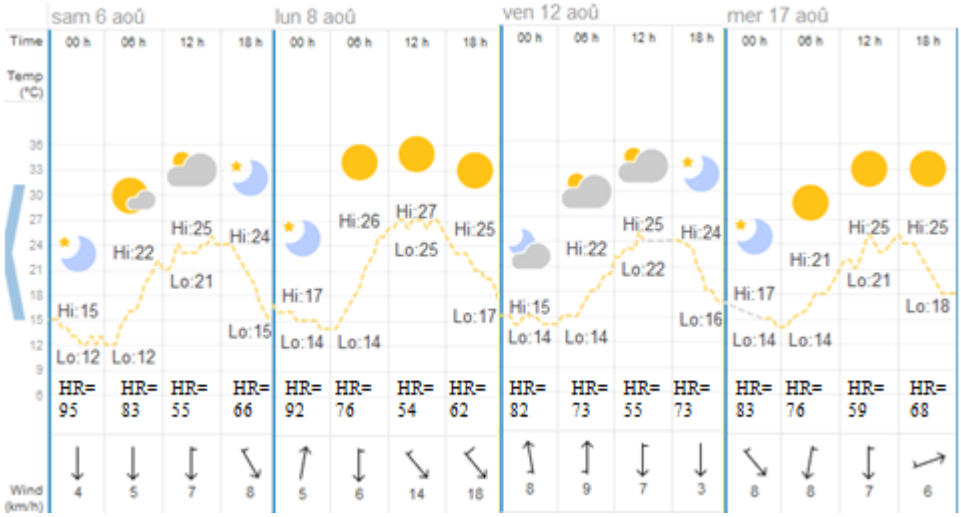


Figure A I- 17 : les jours cycle type aout 2016 pour Strasbourg ('World Weather, Time and Date' 1998)

Brest

La température moyenne de Brest en aout est entre une moyenne des minimums de 13,2°C et une moyenne des maximums de 20,8°C. L'année de 2013 est la plus proche de ces moyennes.

Des cycles représentatifs se répètent en 07, 10, 19, et 26/08/2013 (Figure A I- 18). Le scenario retenu est alors; nuit T=13°C et HR= 80% et jour T= 21°C et HR= 65%.

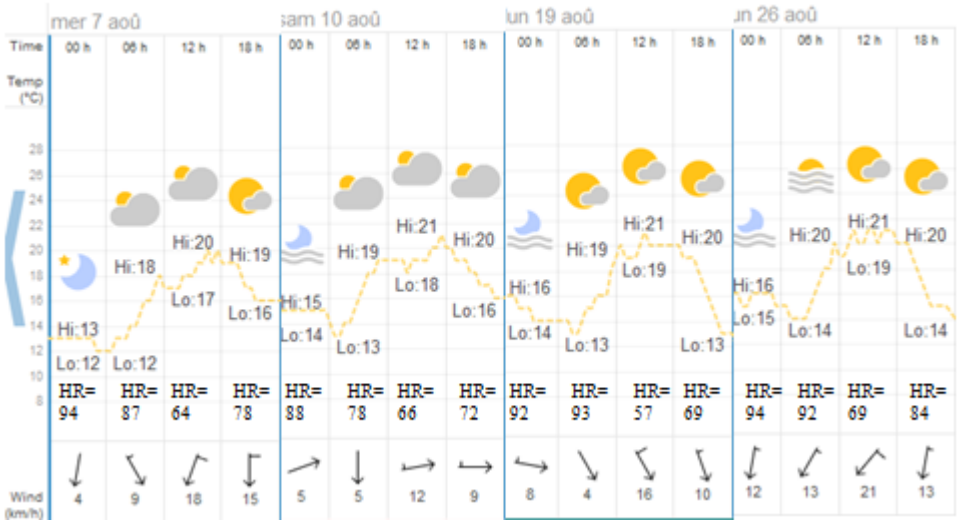


Figure A I- 18 : les jours cycle type aout 2013 pour Brest ('World Weather, Time and Date' 1998)

Rennes

La température moyenne de Rennes en aout est entre une moyenne des minimums de 13,7°C et une moyenne des maximums de 24,3°C. Pour cette ville l'année justifiante la plus proches de ces valeurs moyennes est 2017.

Des cycles représentatifs s'affichent en 02, 13, 14 et 24/08/2017 (Figure A I- 19). Le scenario retenu est alors; nuit T=14°C et HR= 85% et jour T= 24,5°C et HR= 50%.

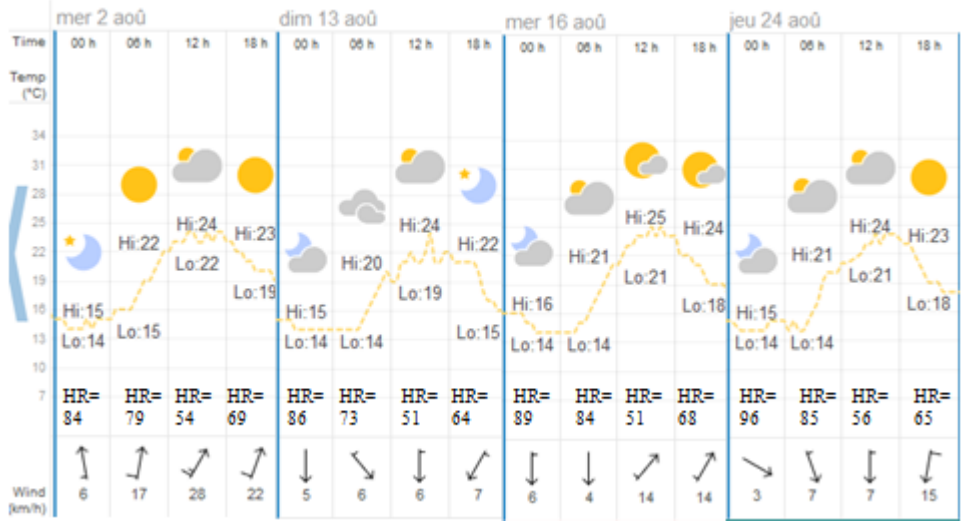


Figure A I- 19 : les jours cycle type aout 2017 pour Rennes ('World Weather, Time and Date' 1998)

Toulouse

En aout, la température moyenne de Toulouse est entre une moyenne des minimums de 16,5°C et une moyenne des maximums de 27,9°C, ces valeurs sont proches des moyennes présentées par 2016.

Des cycles représentatifs s'affichent en 02, 06, 30, et 31/08/2016 (Figure A I- 20). Le scenario retenu est alors; nuit T=16°C et HR= 75% et jour T= 28°C et HR= 40%.

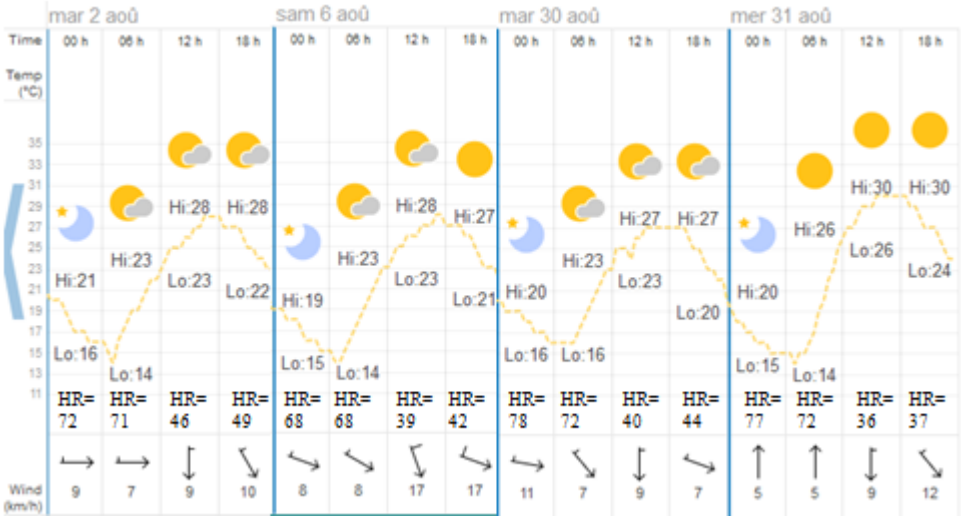


Figure A I- 20 : les jours cycle type aout 2016 pour Toulouse ('World Weather, Time and Date' 1998)

I.2 Climats en Tunisie

I.2.1 Généralités sur les climats

La Tunisie est située sur la partie nord de l'Afrique. Elle est bordée au Nord et à l'est par la mer Méditerranée. Sur la côte nord, le climat est de type méditerranéen, avec des étés très chauds. En descendant le long de la côte est, les températures augmentent un peu avec des pluies moins fréquentes et un ensoleillement plus fréquent, ainsi au sud du pays, le climat est très aride puisqu'il s'agit des villes désertiques.

La Figure A I- 21 présente les 7 types de climat existants en Tunisie.

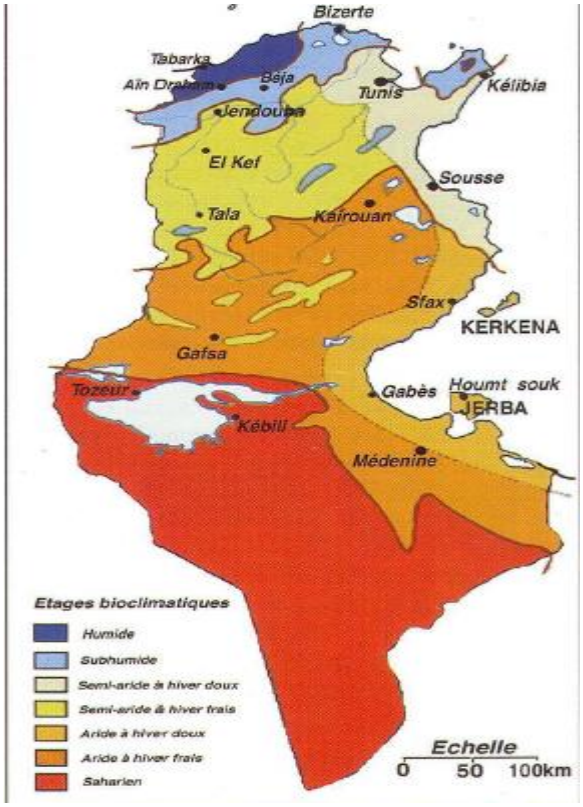


Figure A I- 21 : la carte des climats de la Tunisie (Atlas Jeune Afrique 2020)

Type 1 : Le climat humide

Ce climat est rencontré dans les montagnes caractérisant le relief de la partie Nord-Ouest du pays. Il se caractérise par un hiver très froid avec des précipitations très abondantes et parfois des tempêtes de neige et un été frais. La ville choisie pour ce climat est Tabarka.

Type 2 : Le climat subhumide

Ce type est une transition entre le climat tempéré et le climat humide. Il est caractérisé par une saison d'hiver fraîche et pluvieuse et une saison d'été chaude et sèche. La ville type choisie pour ce climat est Bizerte.

Type 3 : Le climat semi-aride à hiver doux

Ce type de climat, appartenant à la famille du climat tempéré, se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Il s'explique par la présence de la mer Méditerranée. La ville choisie pour ce climat est Tunis.

Type 4 : Le climat semi-aride à hiver frais

Ce climat a tendance à avoir étés chauds, et les hivers tempérés, avec quelques précipitations à un minimum. Ce climat est le plus souvent autour des franges des déserts subtropicaux. La ville choisie pour ce type est Elkef.

Type 5 : Le climat aride à hiver doux

Ce climat est classiquement trouvé en zone tempérée, presque toujours dans l'ombre pluviométrique créé par les montagnes. Il peut avoir des étés chauds et secs, Contrairement des hivers froids et secs. Pour ce climat les villes de Sfax et l'ile de Djerba ont été choisies.

Type 6 : Le climat aride à hiver frais

Ce climat est opposé au type 5, il présente un été marqué par des chaleurs excessives. Il est également caractérisé par l'absence de période hivernale marquée, l'hiver est donc tempéré chaud. Ce climat est représenté par la ville de Kairouan.

Type 7 : Le climat désertique (saharien)

Le climat saharien est caractérisé par la rareté et la grande irrégularité des précipitations, les très hautes températures de l'air (dépassant parfois 35°C à l'ombre) et du sol et une sécheresse extrême. Pour ce climat la ville choisie est Tozeur.

I.2.2 Choix des villes Tunisiennes

En se basant sur les données de l'institut national de la météorologie INM, la Figure A I- 22 droite et gauche montre les températures moyennes des minimums et des maximums par mois pendant la période allant de 1961-1990.

Tozeur présente un climat désertique, c'est la ville la plus froide en hiver et la plus chaude en été. La température moyenne des minimums est égale à 6,3°C et celle des maximums est de l'ordre de 16,7°C en hiver par contre elle dépasse une moyenne des maximums de 39,1°C en été.

Tabarka qui est caractérisée par un climat humide, présente un été frais.

Djerba et Sfax, malgré leur appartenance au même climat, ont des températures minimales sont totalement différentes. L'île de Djerba est plus chaude en hiver et en été.

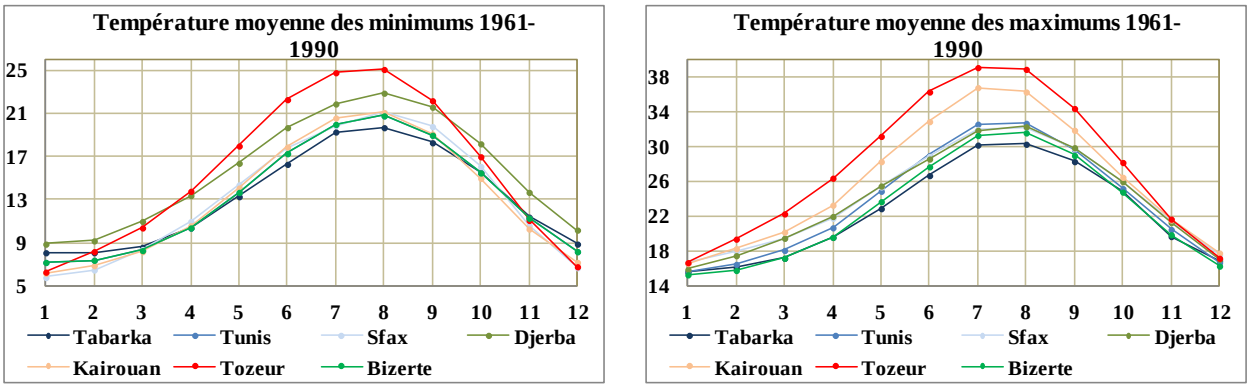


Figure A I- 22 : les températures moyennes des min (gauche) et des max (droite) INM 1961-1990 ('Météo Tunisie' 2022)

La Figure A I- 23 droite montre que la durée d'ensoleillement est la plus élevée en Djerba et Sfax tout le long de l'année. Par contre, elle est la plus basse pour Tabarka.

Pour l'humidité relative moyenne, la Figure A I- 23 gauche montre, que Bizerte est la plus humide tout le long de l'année. Par contre Tozeur est la plus sèche tout le long de l'année

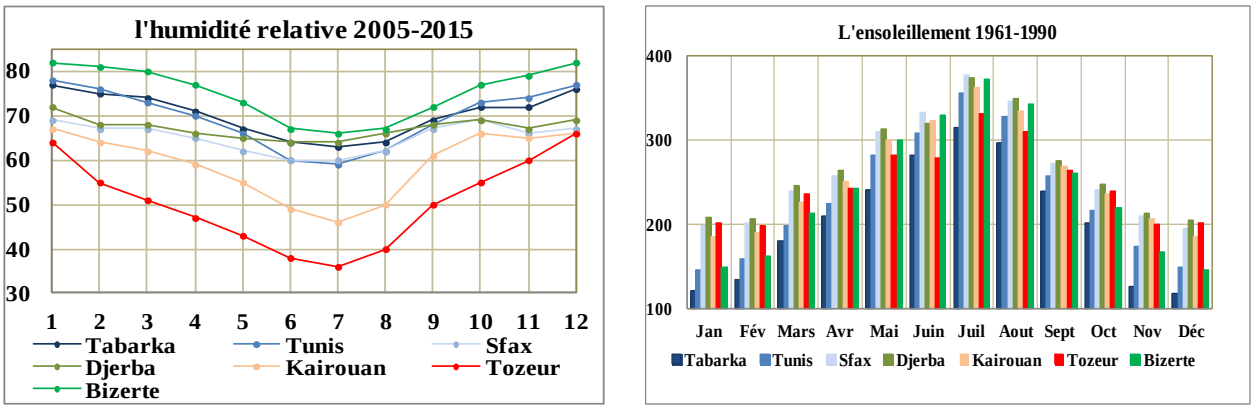


Figure A I- 23 : l'humidité relative moyenne pendant 2005-2015 (gauche) ('World Weather, Time and Date' 1998) la durée d'ensoleillement pendant 1961-1990 (droite) ('Météo Tunisie' 2022)

I.2.3 Choix des températures et des humidités tests

La méthode utilisée est la même que pour la France.

Saison d'hiver

Pour cette saison, la Figure A I- 24 présente les températures moyennes minimales (gauche) et maximales (droite) pour toutes les villes en Janvier pendant la période allant de 2015-2019.

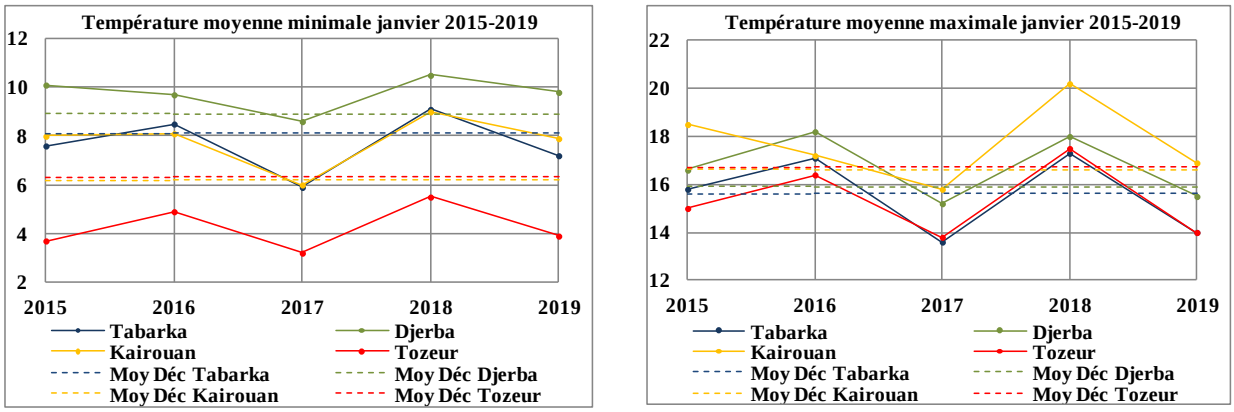


Figure A I- 24 :les températures moyennes minimales (gauche) et maximales (droite) des villes Tunisiennes en Janvier pendant 2015-2019, ('Météo Tunisie' 2022).

Tabarka

La température moyenne de Tabarka oscille entre une moyenne des minimums de 8,1°C et une moyenne des maximums de 15,6°C

Des cycles représentatifs se répètent en 20, 21, 22 et 28/01/2016 (Figure A I- 25). Le scenario retenu est alors; nuit T=8°C et HR= 90% et jour T= 16°C et HR= 70%.

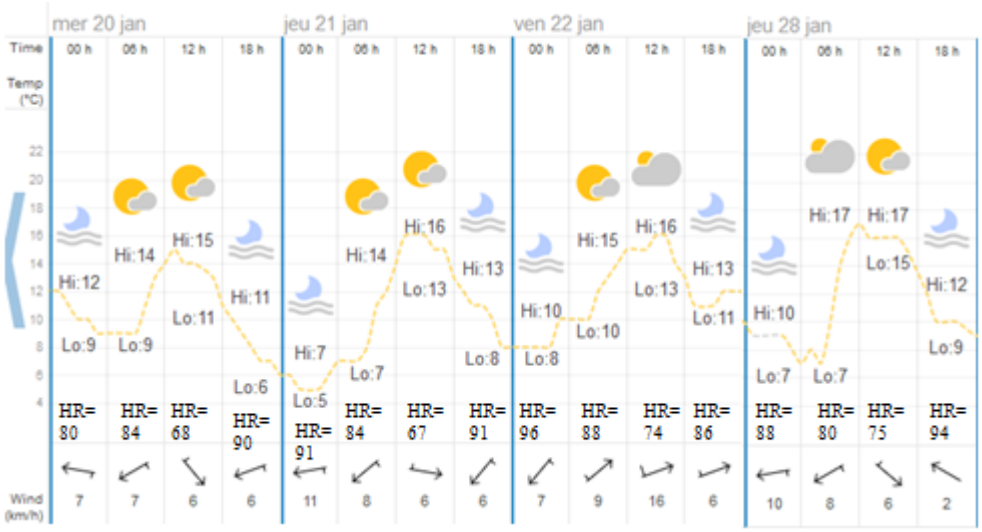


Figure A I- 25 : les jours cycle type janvier 2016 pour Tabarka ('World Weather, Time and Date' 1998)

Djerba

En janvier, la température moyenne de Djerba est entre une moyenne des minimums de 8,9°C et une moyenne des maximums de 15,9°C. Ces valeurs sont présentées par l'année 2017.

Des cycles représentatifs sont montrés en 08, 13, 21 et 26/01/2017 (Figure A I- 26). Le scenario retenu est alors; nuit T=9°C et HR= 75% et jour T= 16°C et HR= 45%.

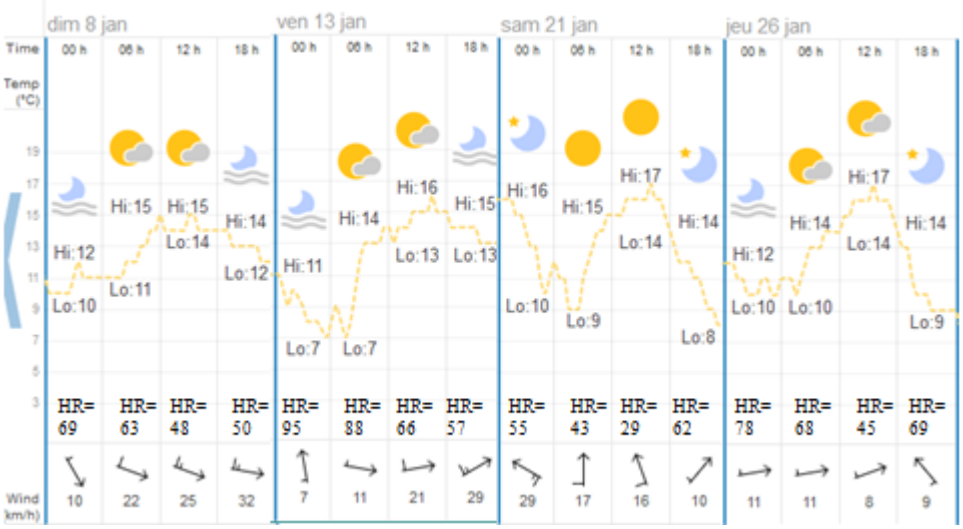


Figure A I- 26 : les jours cycle type janvier 2017 pour Djerba ('World Weather, Time and Date' 1998)

Kairouan

En janvier, la température moyenne de Kairouan fluctue entre une moyenne des minimums de 6,2°C et une moyenne des maximums de 16,6°C. Ces valeurs sont présentées par l'année 2017.

Des cycles représentatifs pour ces fluctuations sont justifiés en 08, 12, 24, et 25/01/2017 (Figure A I- 27). Le scenario retenu est alors; nuit T=6°C et HR= 75% et jour T= 16°C et HR= 50%.

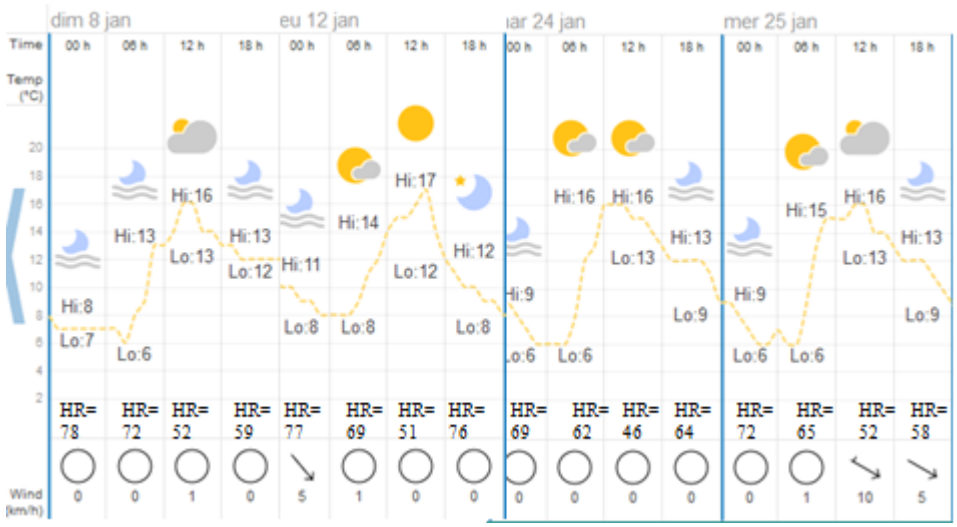


Figure A I- 27 : les jours cycle type janvier 2017 pour Kairouan ('World Weather, Time and Date' 1998)

Tozeur

En janvier, la température moyenne de Tozeur fluctue entre une moyenne des minimums de 6,3°C et une moyenne des maximums de 16,7°C. Ces moyennes sont plus proches à celles de l'année 2018.

Des cycles représentatifs pour ces fluctuations sont en 15, 18, 19et 21/01/2018 (Figure A I-28). Le scenario retenu est alors; nuit T=6°C et HR= 60% et jour T= 17°C et HR= 40%.

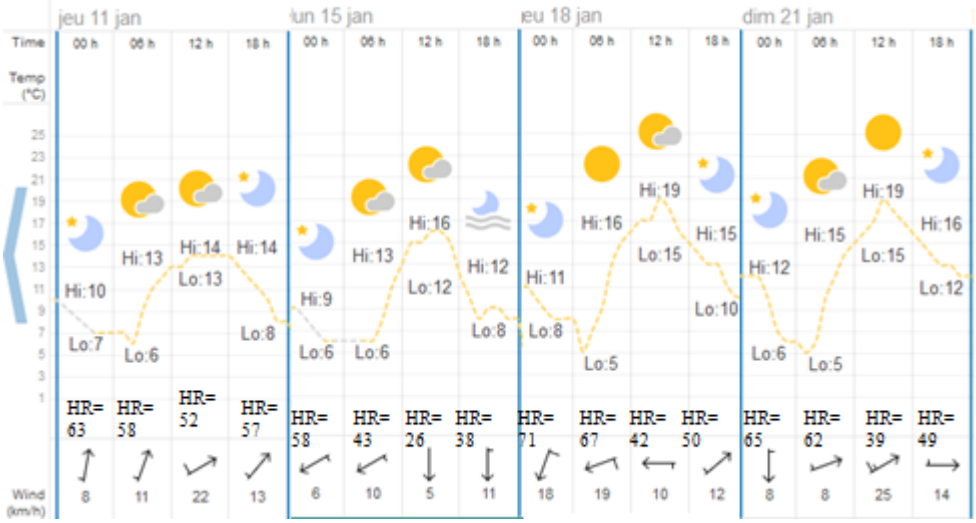


Figure A I- 28 : les jours cycle type janvier 2018 pour Tozeur ('World Weather, Time and Date' 1998)

Mi saison

La Figure A I- 29 montre les températures moyennes minimales (gauche) et maximales (droite) du mois de mai pour toutes les villes pendant la période allant de 2015-2019. Un mois représentatif est sélectionné pour chaque ville. Pour Tabarka, Mai 2018, pour Djerba, Mai 2019, pour Kairouan Mai 2019 et finalement pour Tozeur mai 2017.

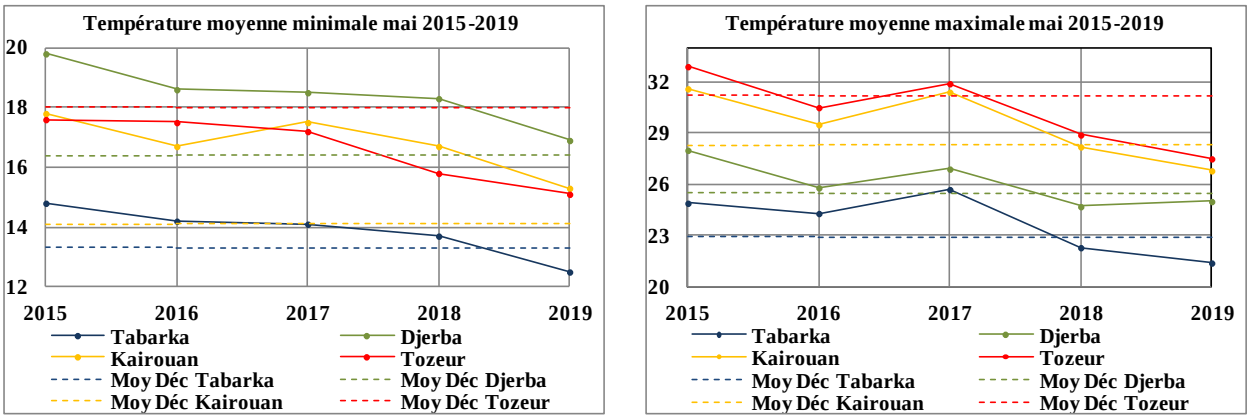


Figure A I- 29 : les températures moyennes minimales (gauche) et maximales (droite) des villes Tunisiennes en mai pendant 2015-2019, ('Méteo Tunisie' 2022).

Tabarka

Tabarka en Mai, présente la température moyenne entre une moyenne des minimums de 13,3°C et une moyenne des maximums de 22,9°C

Des cycles représentatifs pour ces fluctuations se répètent en 05, 11, 12 et 19/05/2018 (Figure A I- 30). Le scenario retenu est alors; nuit T=13,5°C et HR= 80% et jour T= 23°C et HR= 55%.

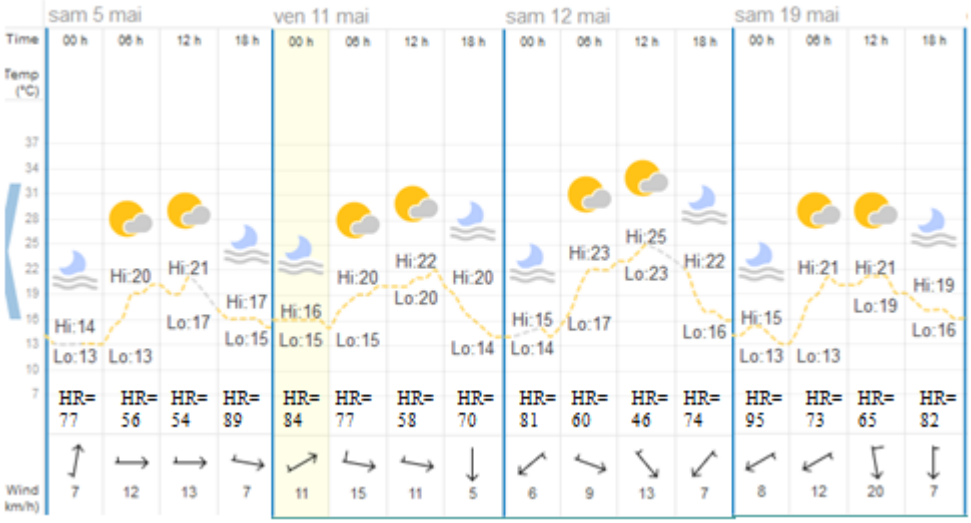


Figure A I- 30 : les jours cycle type mai 2018 pour Tabarka ('World Weather, Time and Date' 1998)

Djerba

La température moyenne de Djerba en Mai fluctue entre une moyenne des minimums de 16,4°C et une moyenne des maximums de 25,5°C.

Des cycles représentatifs pour ces oscillations s'affichent en 08, 15, 21 et 23/05/2019 (Figure A I- 31). Le scenario retenu est alors; nuit T=16°C et HR= 70% et jour T= 25°C et HR= 35%.

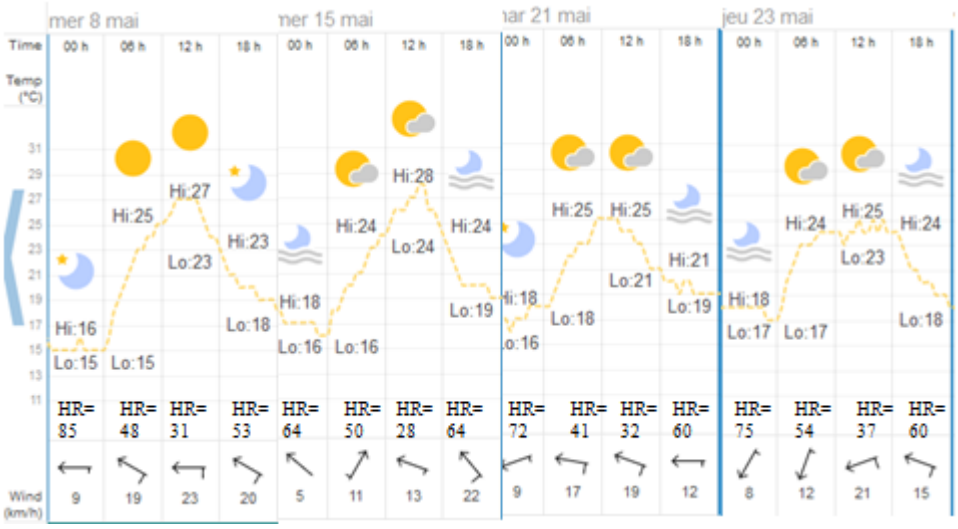


Figure A I- 31 : les jours cycle type mai 2019 pour Djerba ('World Weather, Time and Date' 1998)

Kairouan

En Mai, la température moyenne de Kairouan oscille entre une moyenne des minimums de 14,1°C et une moyenne des maximums de 28,3°C.

Des cycles représentatifs pour ces fluctuations sont en 02, 15, 20 et 21/05/2019 (Figure A I- 32). Le scenario retenu est alors; nuit T=14°C et HR= 70% et jour T= 28°C et HR= 35%.

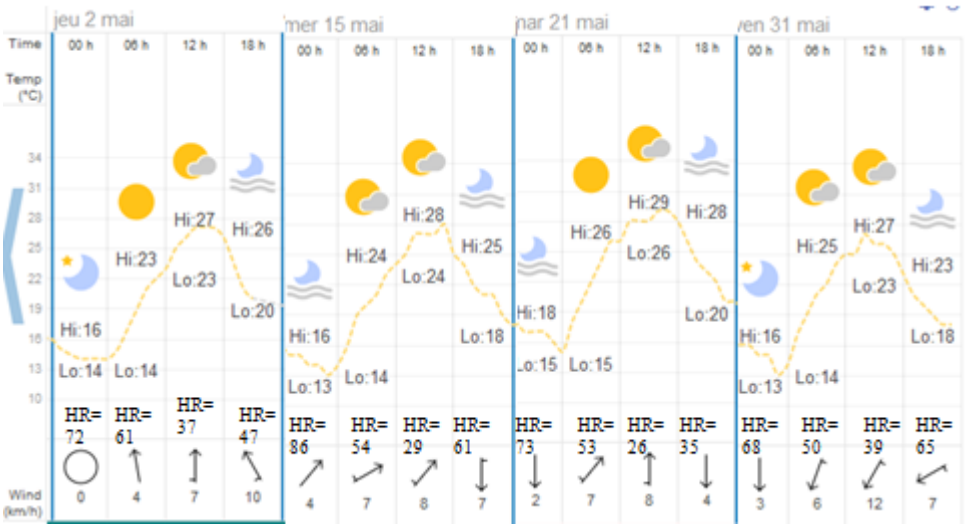


Figure A I- 32 : les jours cycle type mai 2019 pour Kairouan ('World Weather, Time and Date' 1998)

Tozeur

En mai, la température moyenne de Tozeur se balance entre une moyenne des minimums de 18°C et une moyenne des maximums de 31,2°C.

Des cycles représentatifs pour ces fluctuations sont présents en 12, 13, 21 et 26/05/2017 (Figure A I- 33). Le scenario retenu est alors nuit T=18°C et HR= 75% et jour T= 32°C et HR= 30%.

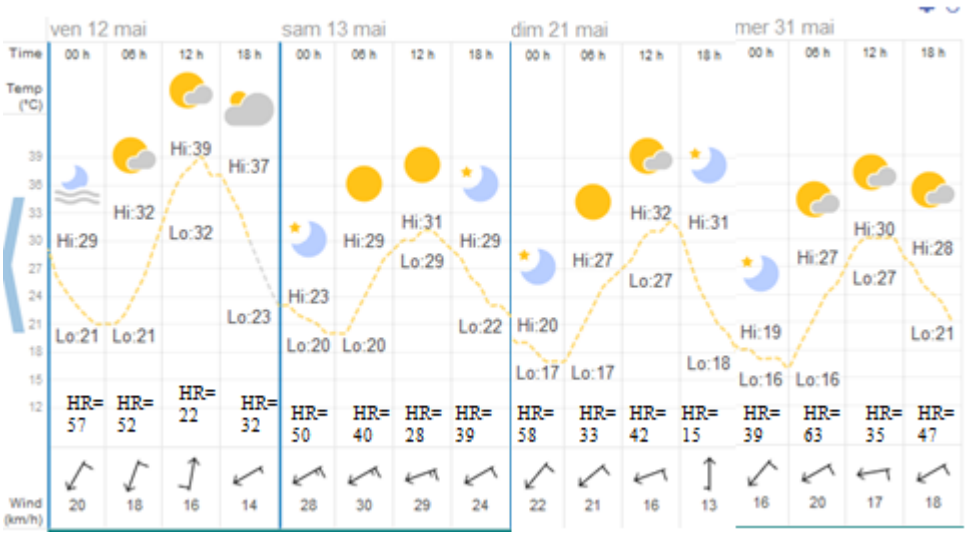


Figure A I- 33 : les jours cycle type mai 2017 pour Tozeur ('World Weather, Time and Date' 1998)

Saison d'été

La Figure A I- 34, donne les valeurs moyennes minimales (gauche) ainsi les maximales (droite) de toutes les villes tunisiennes choisies pendant le mois d'aout sur la période allant de 2015-2019.

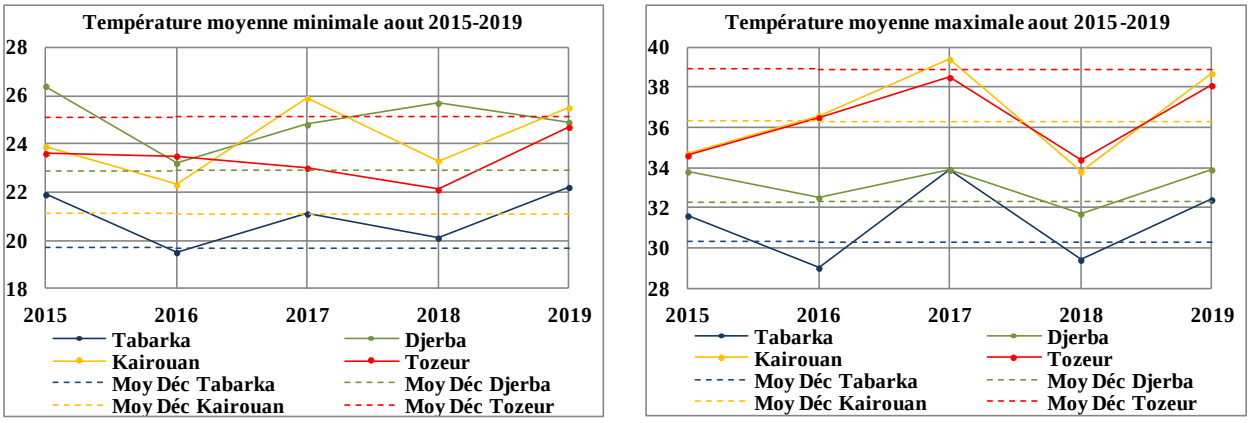


Figure A I- 34 : les températures moyennes minimales (gauche) et maximales (droite) des villes Tunisiennes en Aout pendant 2015-2019, ('Méteo Tunisie' 2022).

Tabarka

En Aout, la température moyenne de Tabarka fluctue entre une moyenne des minimums de 19,7°C et une moyenne des maximums de 30,3°C.

Des cycles représentatifs pour ces fluctuations sont répétés en 02, 03, 11 et 17/08/2018 (Figure A I- 35). Le scenario retenu est alors; nuit T=19,5°C et HR= 85% et jour T= 30°C et HR= 60%.

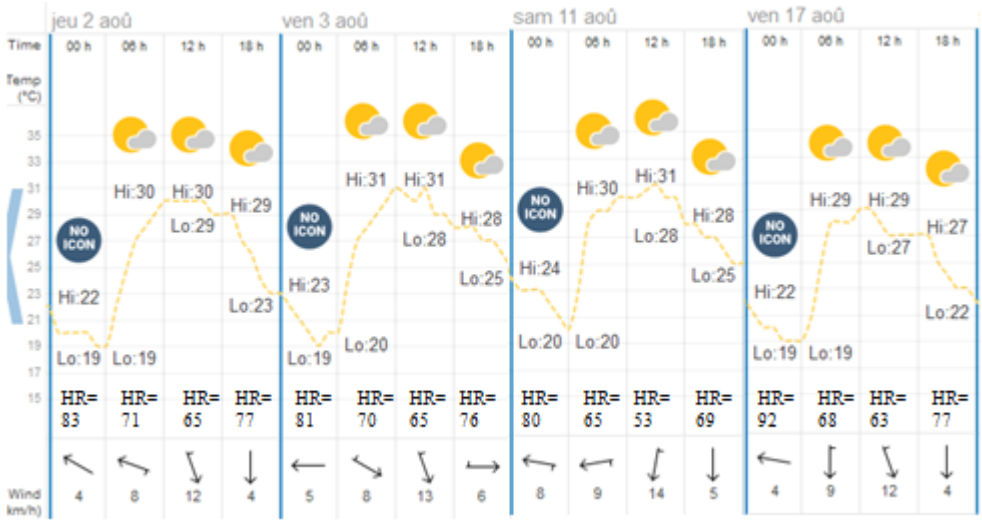


Figure A I- 35 : les jours cycle type aout 2018 pour Tabarka ('World Weather, Time and Date' 1998)

Djerba

En aout, la température moyenne de Djerba est entre une moyenne des minimums de 22,9°C et une moyenne des maximums de 32,3°C.

Des cycles représentatifs pour ces oscillations sont présents en 05, 06, 16 et 27/08/2016 (Figure A I- 36). Le scenario retenu est alors; nuit T=23°C et HR= 80% et jour T= 32°C et HR= 50%.

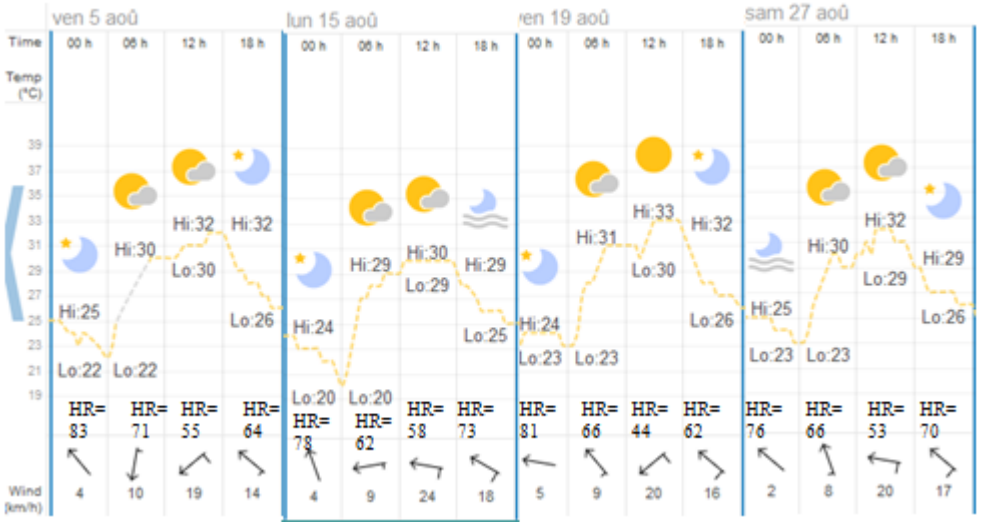


Figure A I- 36 : les jours cycle type aout 2016 pour Djerba ('World Weather, Time and Date' 1998)

Kairouan

En Aout, la température moyenne est entre une moyenne des minimums de 21,1°C et une moyenne des maximums de 36,3°C.

Des cycles représentatifs pour ces fluctuations se répètent en 03, 04, 15 et 26/08/2016 (Figure A I- 37). Le scenario retenu est alors; nuit T=21°C et HR= 60% et jour T= 36°C et HR= 30%.

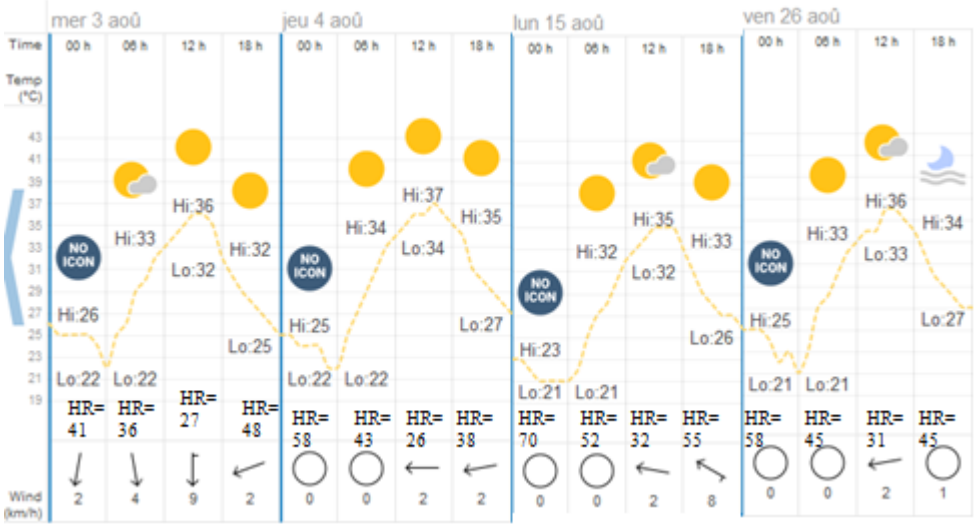


Figure A I- 37 : les jours cycle type aout 2016 pour kairouan ('World Weather, Time and Date' 1998)

Tozeur

En Aout, la température moyenne fluctue entre une moyenne des minimums de 25,1°C et une moyenne des maximums de 38,9°C.

Des cycles représentatifs pour ces fluctuations sont présents en 01, 12, 13 et 27/08/2019 (Figure A I- 38). Le scenario retenu est alors; nuit T=25°C et HR= 45% et jour T= 39°C et HR= 20%.

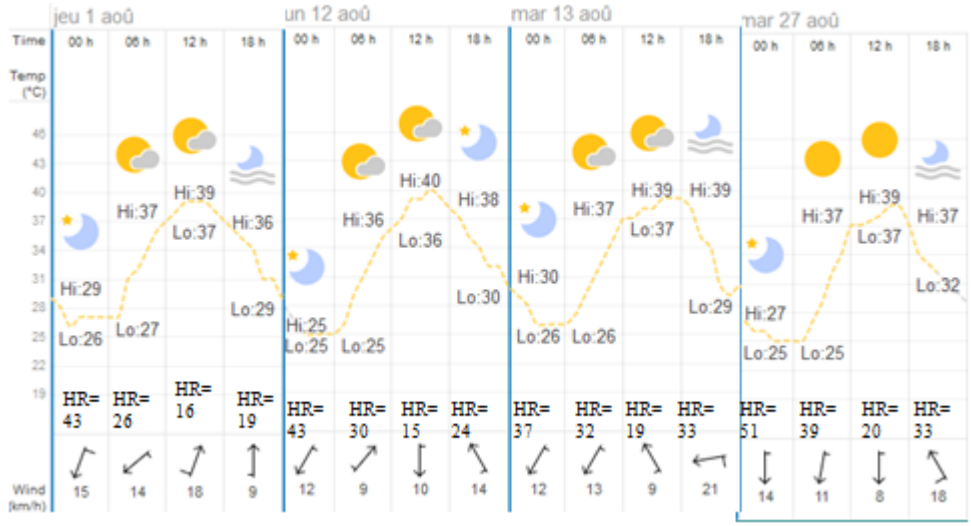


Figure A I- 38 :les jours cycle type aout 2019 pour Tozeur ('World Weather, Time and Date' 1998)

Annexe II : Résultats complémentaires

Sommaire

I.1 Paroi terre chanvre sous gradients de température et de pression de vapeur constants 2

I.1.1 Cinétiques expérimentales d'humidité relative ..... A II-2

I.1.2 Profils expérimentaux d'humidité relative ..... A II-3

I.2 Paroi terre chanvre sous sollicitations cycliques sans ensoleillement ..... A II-4

I.2.1 Profils expérimentaux d'humidité relative au cours du dernier cycle ..... A II-4

I.3 Paroi terre chanvre sous sollicitations cycliques avec ensoleillement ..... A II-5

I.3.1 Profils expérimentaux d'humidité relative au cours du dernier cycle ..... A II-5

I.4 Comparaison aux autres parois ..... A II-5

I.4.1 Sous gradients de température et de pression de vapeur constants ..... A II-5

I.4.2 Parois sous sollicitations cycliques sans ensoleillement ..... A II-8

I.4.3 Parois sous sollicitations cycliques avec ensoleillement ..... A II-9

I.4.4 Parois sous sollicitations hygrique à l'intérieur ..... A II-11

I.1 Paroi terre chanvre sous gradients de température et de pression de vapeur constants

I.1.1 Cinétiques expérimentales d'humidité relative

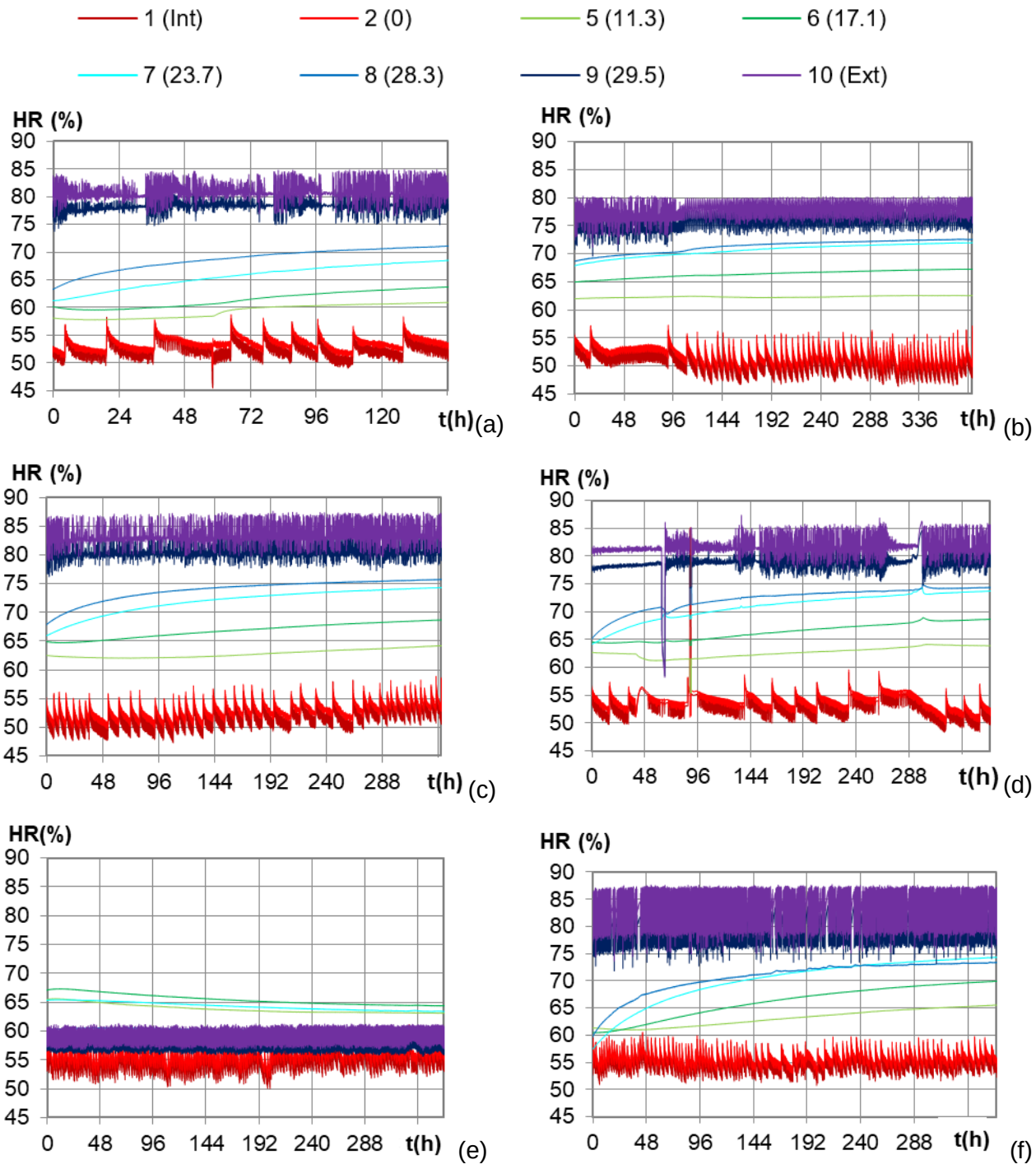


Figure A III- 1 : Cinétiques d'humidité relative pendant la phase de stabilisation pour les climats de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba

I.1.2 Profils expérimentaux d'humidité relative

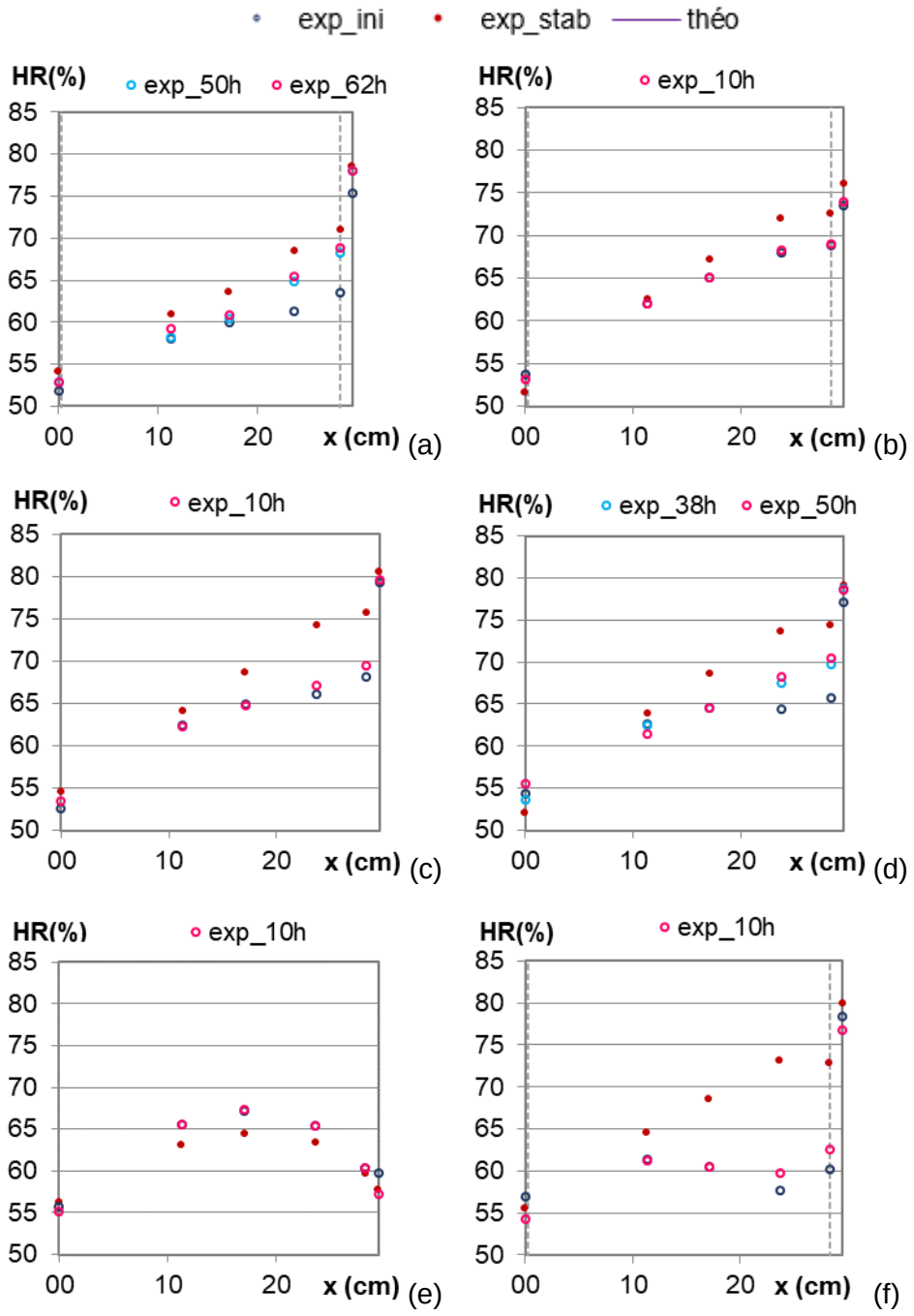


Figure A III- 2 : Profils expérimentaux d'humidité relative pendant la phase de stabilisation pour les climats de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba

I.2 Paroi terre chanvre sous sollicitations cycliques sans ensoleillement

I.2.1 Profils expérimentaux d'humidité relative au cours du dernier cycle

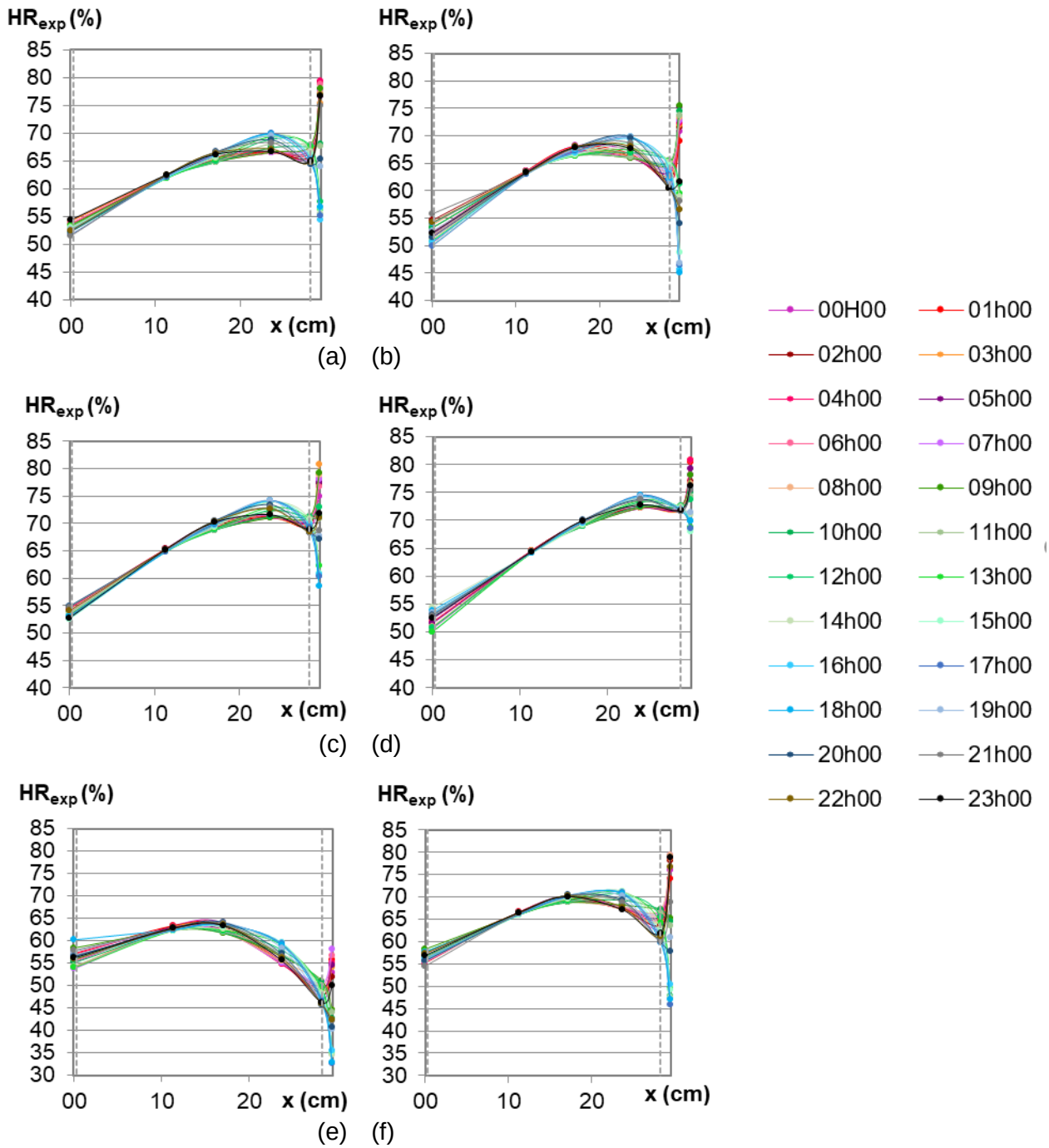


Figure A III- 3 : Profils expérimentaux d'humidité relative au cours du dernier cycle pour les climats de : (a) Rennes, (b) Toulouse, (c) Strasbourg, (d) Brest, (e) Kairouan et (f) Djerba

I.3 Paroi terre chanvre sous sollicitations cycliques avec ensoleillement

I.3.1 Profils expérimentaux d'humidité relative au cours du dernier cycle

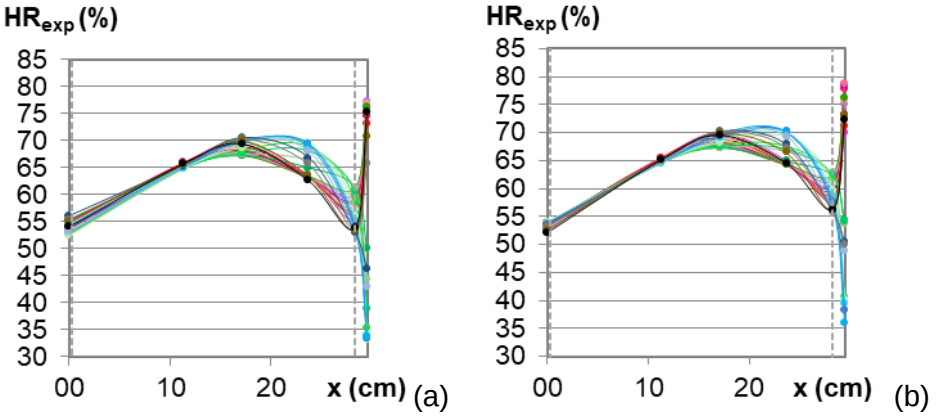


Figure A III- 4 : Profils d'humidité relative au cours du dernier cycle pour les climats de : (a) Rennes, (b) Brest

I.4 Comparaison aux autres parois

I.4.1 Sous gradients de température et de pression de vapeur constants

Cinétiques

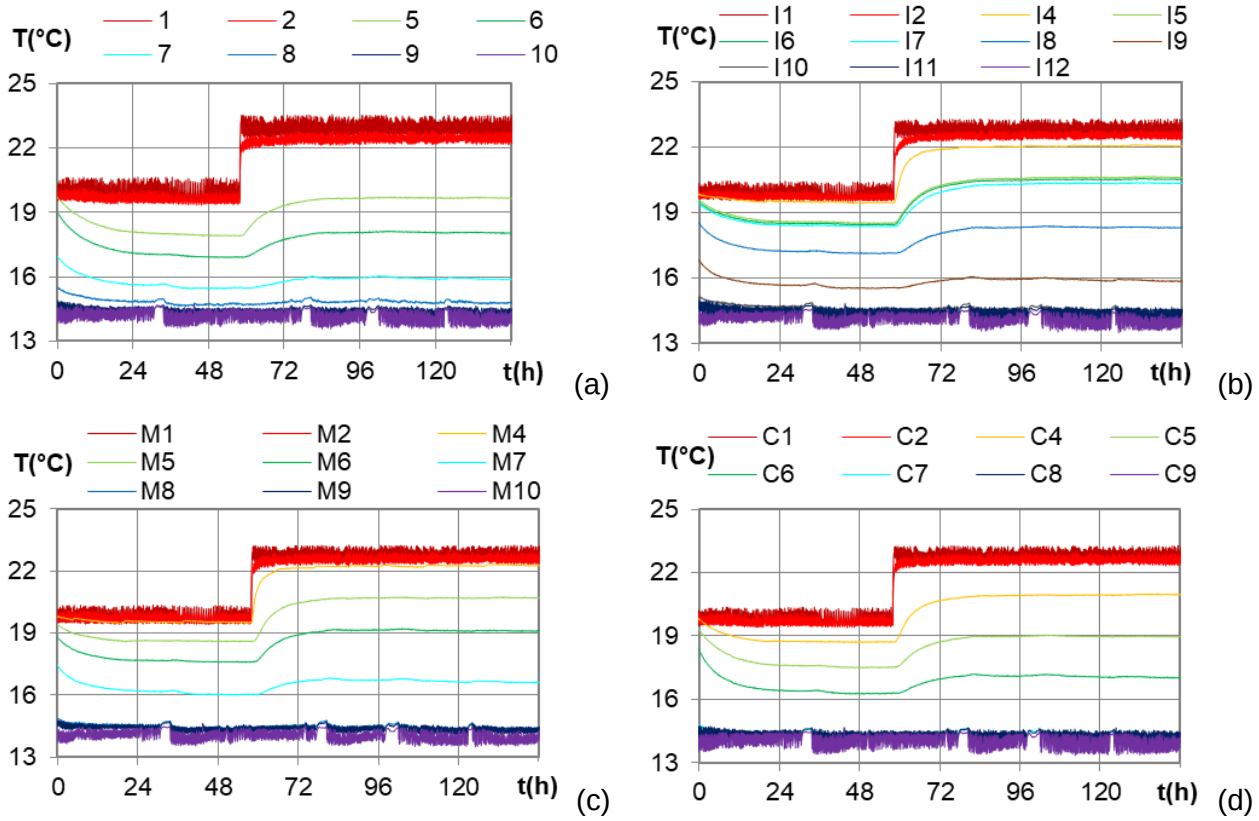


Figure A III- 5 : Cinétiques de température pendant la phase stabilisation climats de Rennes (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

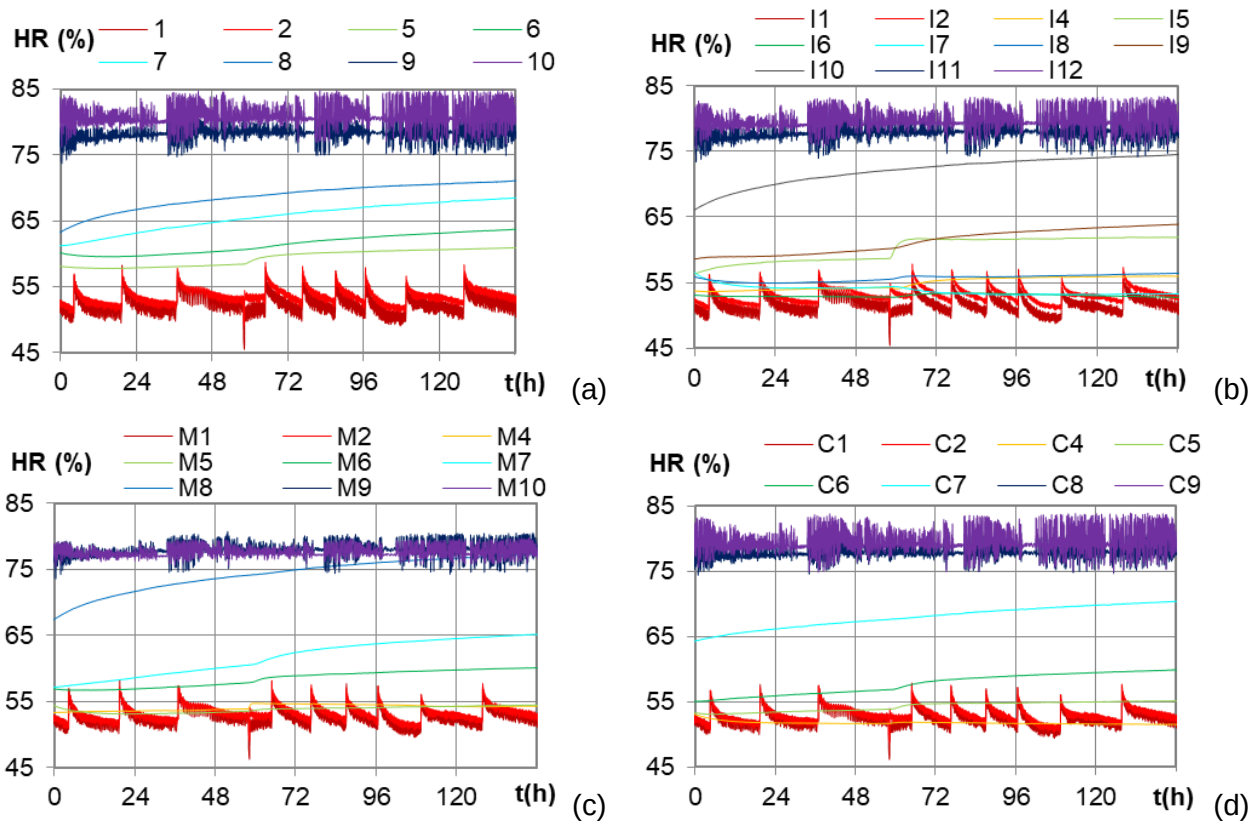


Figure A III- 6 : Cinétiques d'humidité relative pendant la phase stabilisation climats de Rennes (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

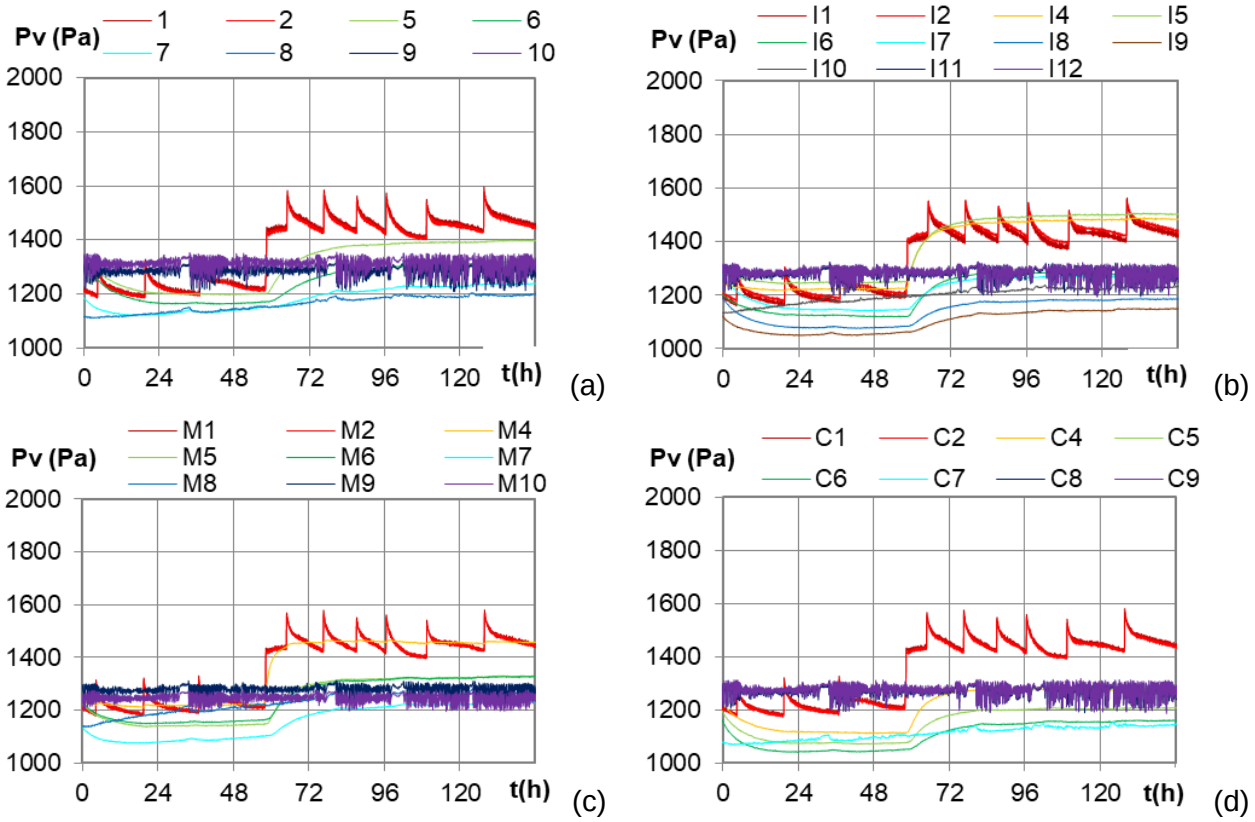


Figure A III- 7 : Cinétiques de pression de vapeur pendant la phase stabilisation climats de Rennes (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

Profils expérimentaux d'humidité relative

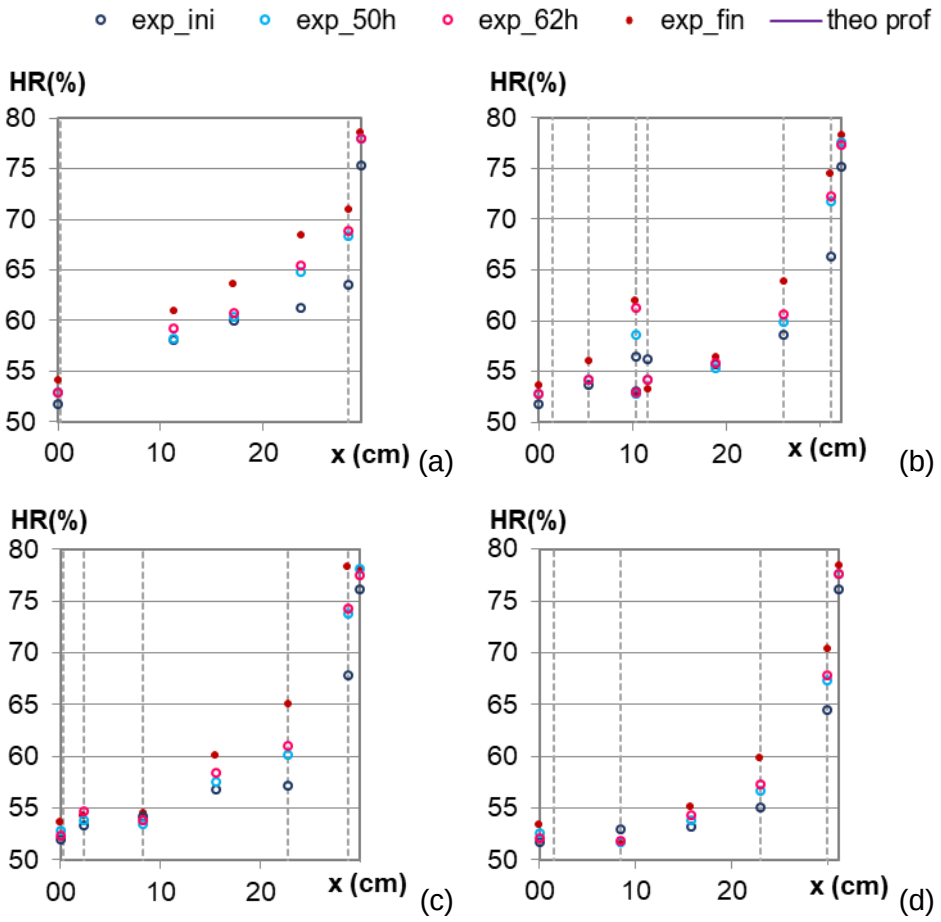


Figure A III- 8 : Profils d'humidité relative pendant la phase stabilisation climats de Rennes (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

I.4.2 Parois sous sollicitations cycliques sans ensoleillement

Cinétiques expérimentaux

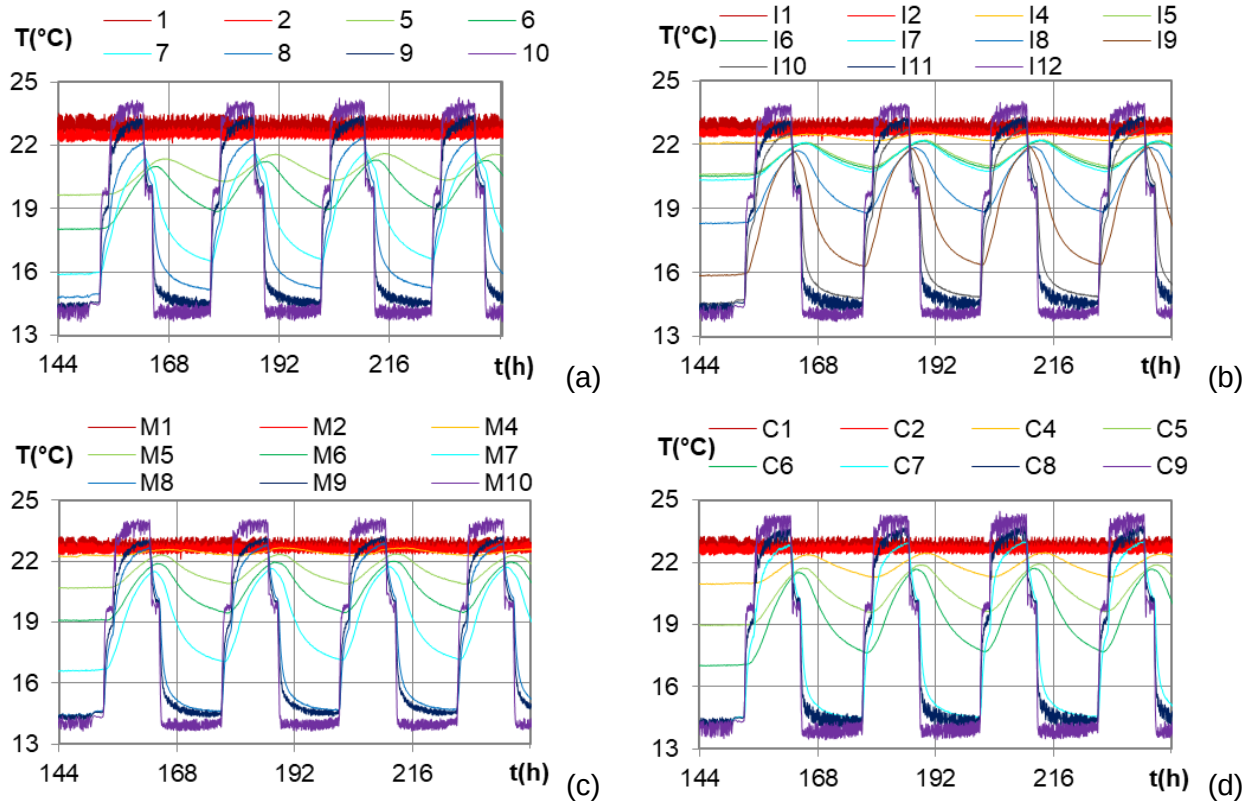


Figure A III- 9 : Cinétiques de température climats de Rennes (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

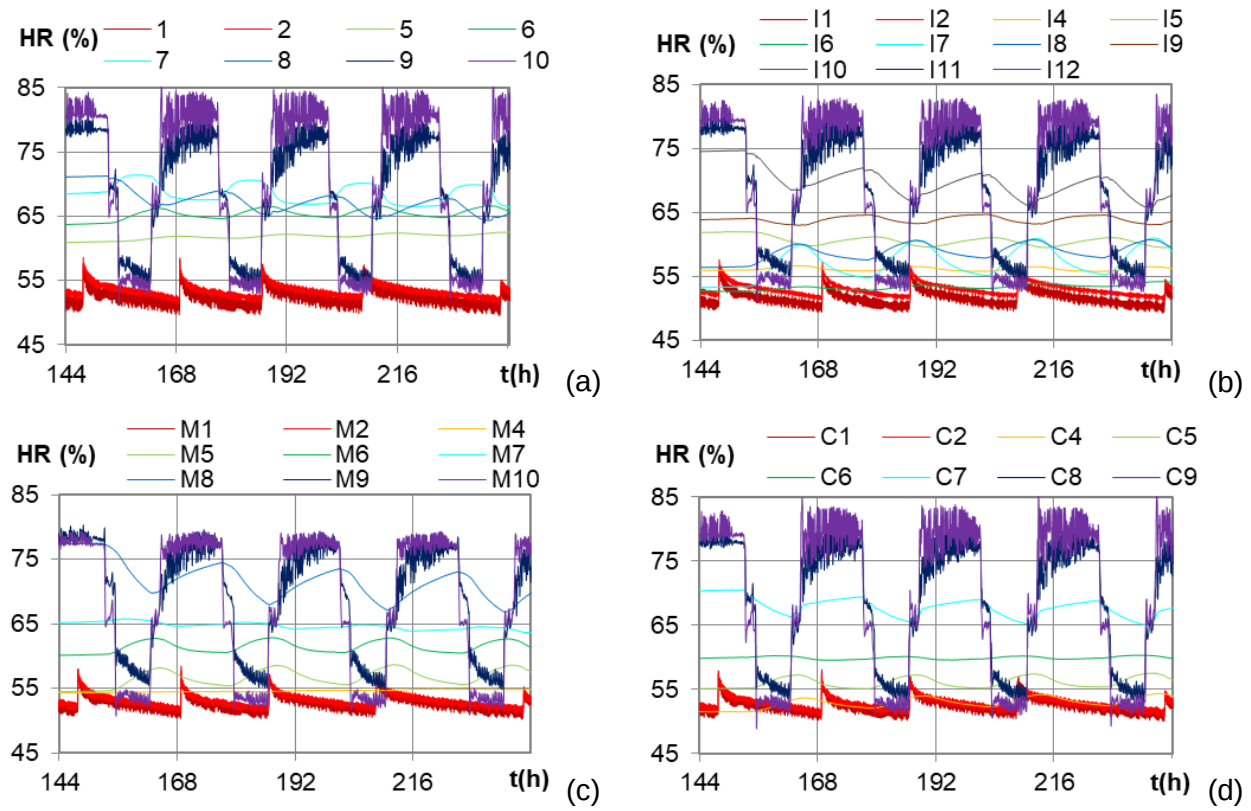


Figure A III- 10 : Cinétiques d'humidité relative climats de Rennes (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

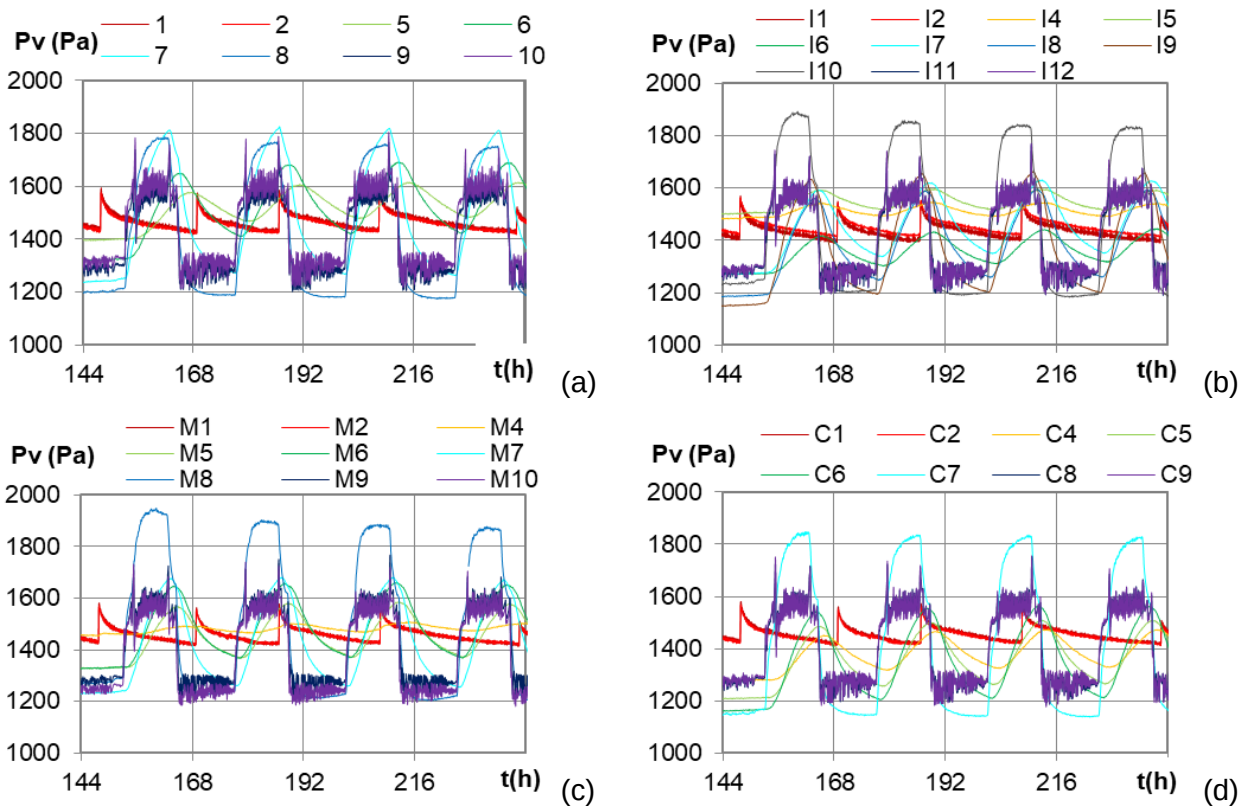


Figure A III- 11 : Cinétiques de la pression de vapeur pendant le climat de Rennes (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

I.4.3 Parois sous sollicitations cycliques avec ensoleillement

Cinétiques expérimentaux

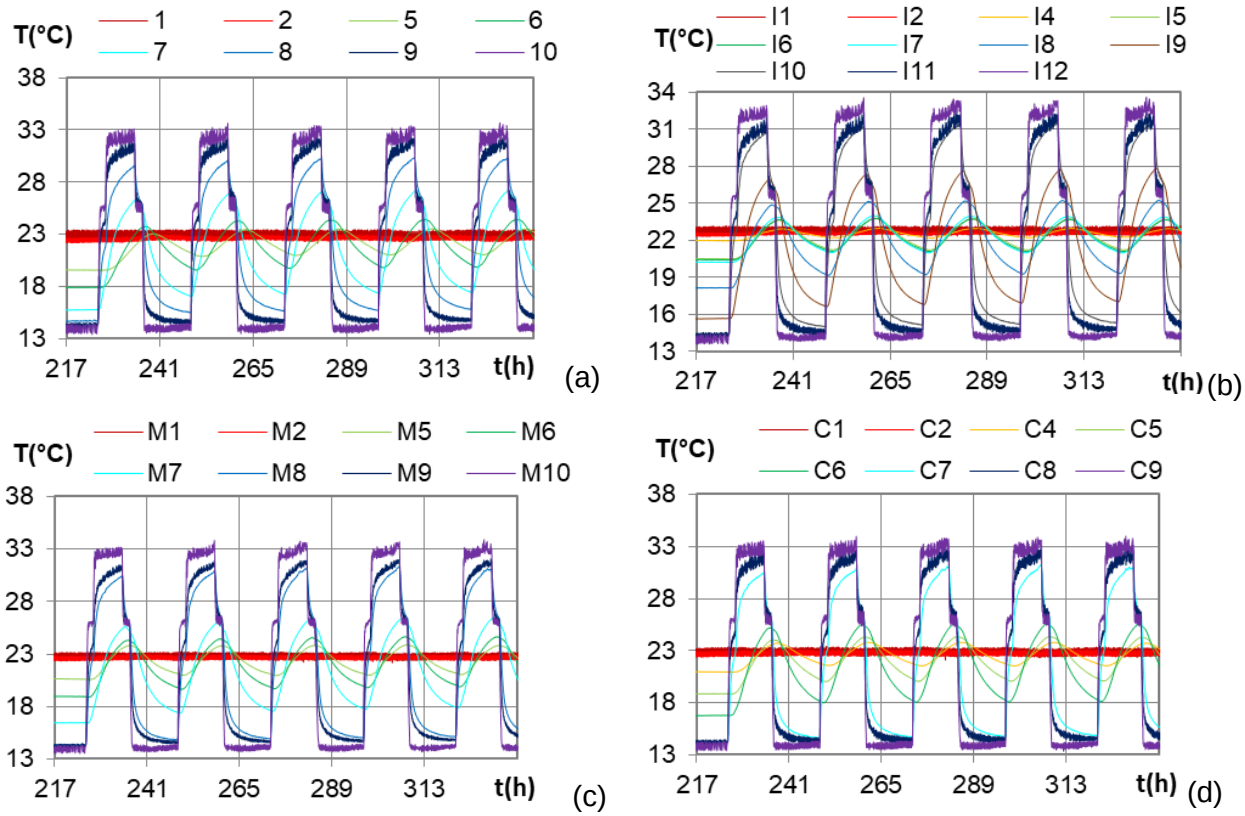


Figure A III- 12 : Cinétiques de la température (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

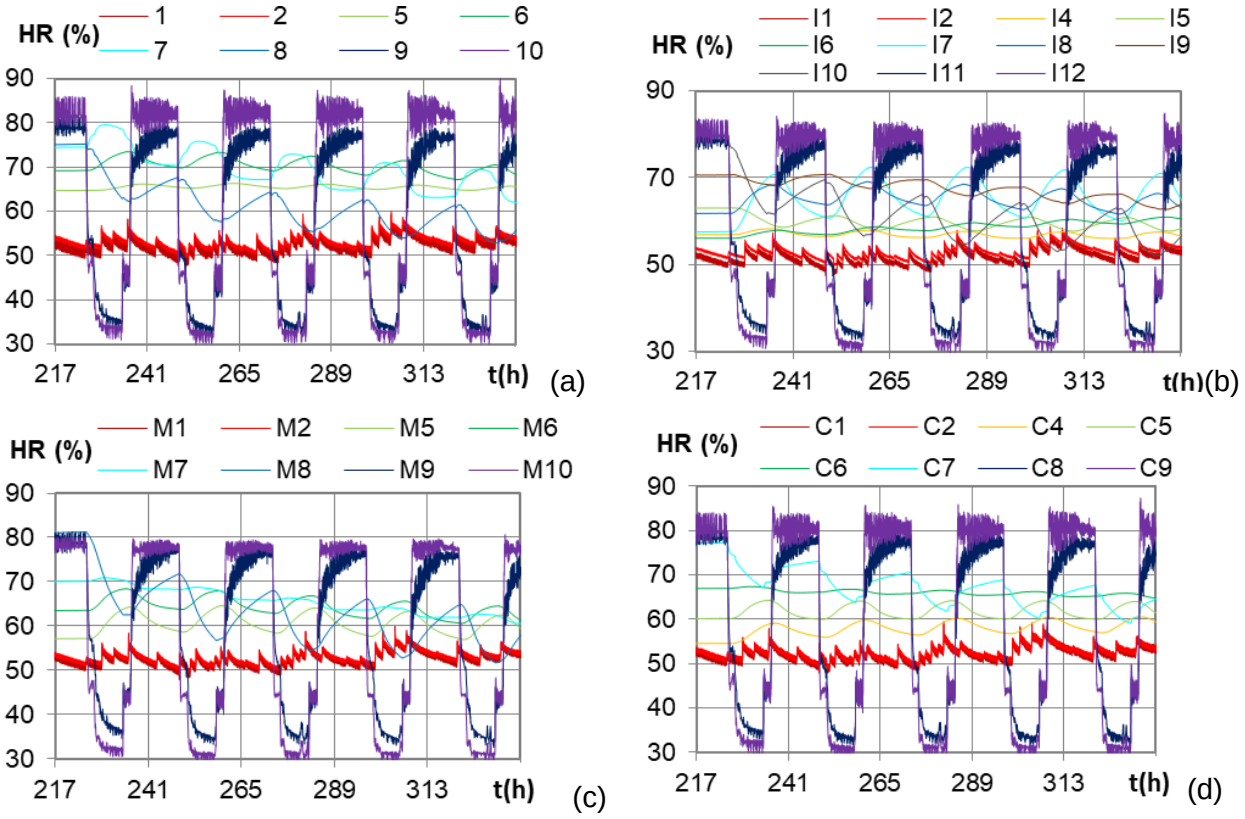


Figure A III- 13 : Cinétiques d'humidité relative (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

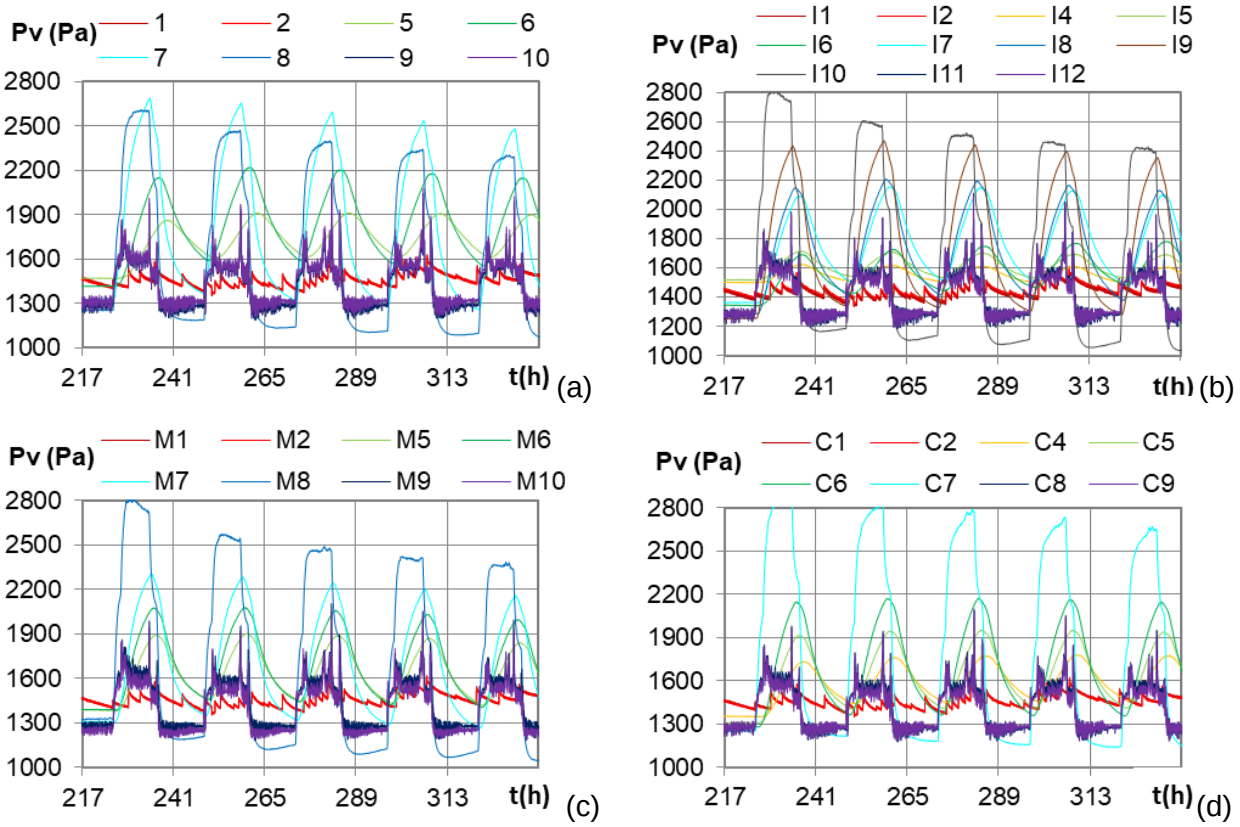


Figure A III- 14 : Cinétiques de la pression de vapeur (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

I.4.4 Parois sous sollicitations hygrique à l'intérieur

Cinétiques expérimentaux

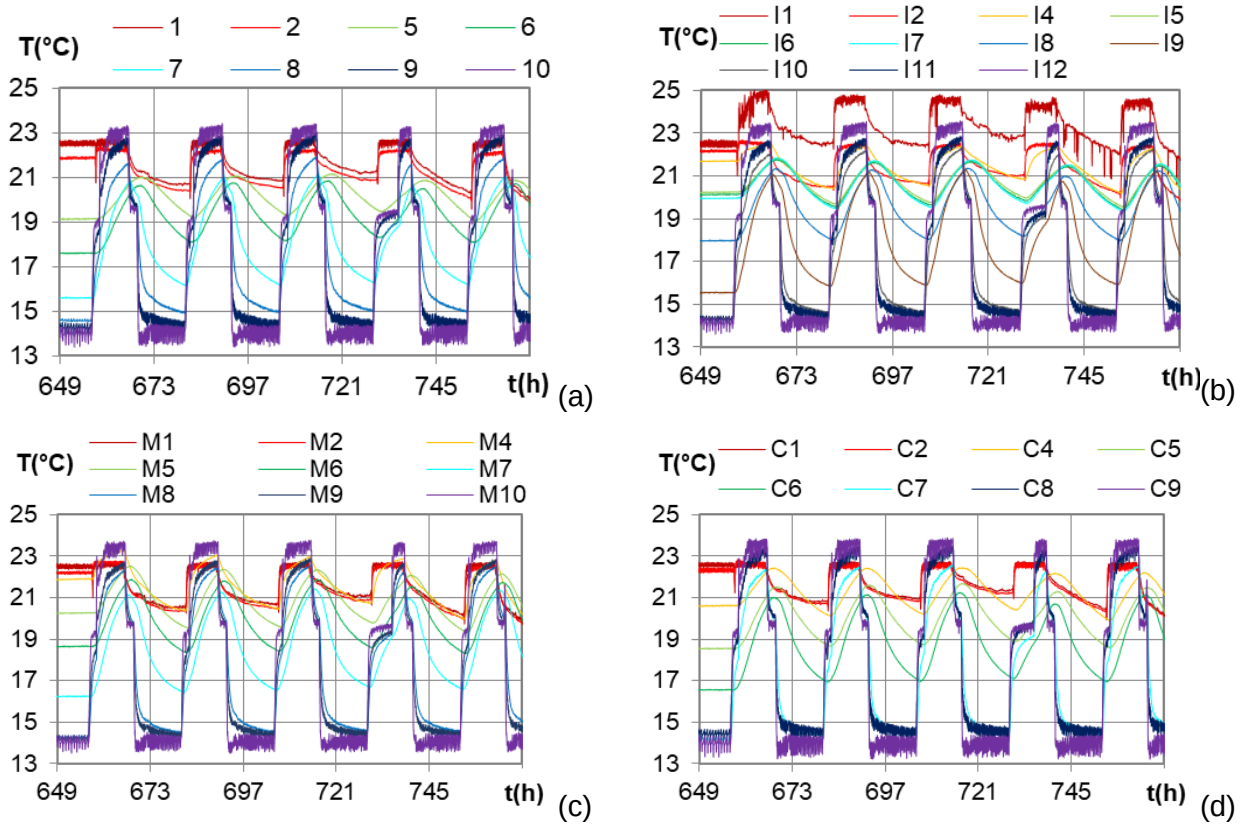


Figure A III- 15 : Cinétiques de la température (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

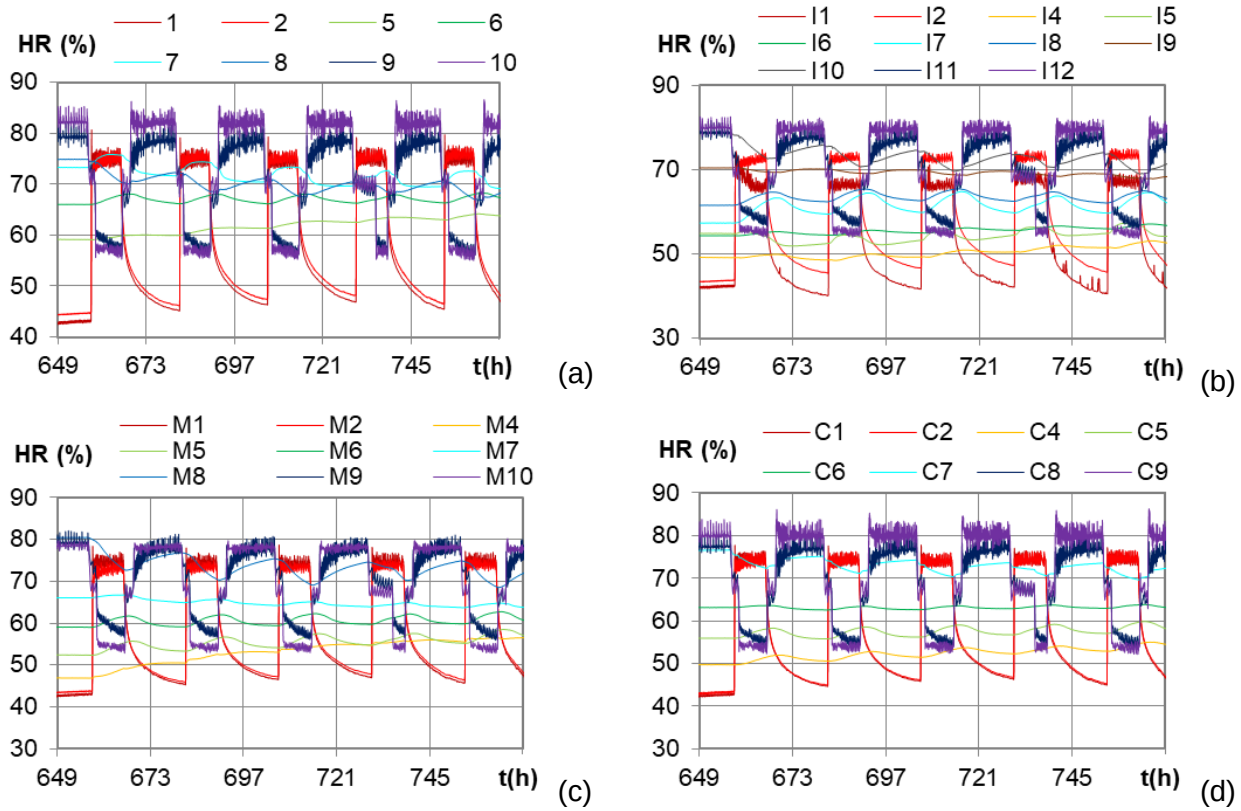


Figure A III- 16 : Cinétiques d'humidité relative ; (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

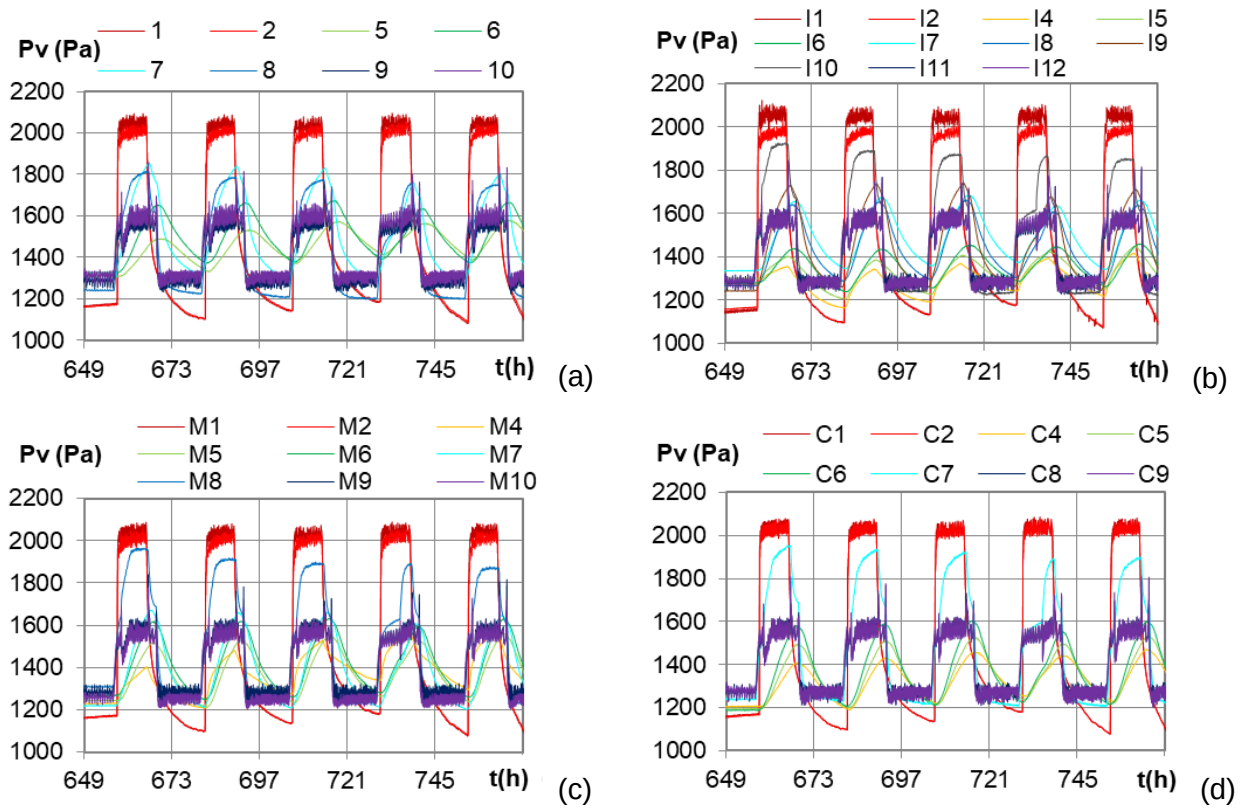


Figure A III- 17 : Cinétiques de la pression de vapeur ; (a) paroi terre chanvre, (b) paroi Isobio, (c) paroi Mais et (d) paroi Colza

UNIVERSITÉ DE RENNES 1

Titre : comportement hygrothermique de matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi en ambiance contrôlée et in-situ

Mots clés : transfert de chaleur et de masse ; étude expérimentale ; simulation numérique ; murs ; dispositif bi-climatique ; climats ; bâtiment rénové

Résumé : Actuellement, les matériaux de construction isolants biosourcés sont conçus dans le but de réduire les consommations d'énergie et de ressources non renouvelables. Une fois que leurs propriétés multiphysiques sont caractérisées à l'échelle du matériau, il est nécessaire d'étudier leur comportement à l'échelle de la paroi et du bâtiment.

L'étude expérimentale et numérique à l'échelle de la paroi est réalisée en ambiance contrôlée. Le mur d'essai en matériaux bio-sourcés est implémenté comme mur de séparation d'un dispositif bi-climatique, qui permet de simuler des climats intérieurs et extérieurs. Ces climats correspondent à des climats français et tunisiens estivaux et de mi-saison. Les simulations numériques sont réalisées avec le logiciel WUFI Pro 6.5. Le comportement hygrothermique de la paroi est analysé à partir des cinétiques et des profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur. Les résistances thermique et hygrique de la paroi sont identifiées. Le comportement en régime dynamique est caractérisé par l'amortissement et le déphasage de température et de pression de vapeur ainsi que par des bilans de flux.

L'étude in-situ porte sur un bâtiment rénové en béton de chanvre situé en Normandie. Les résultats sont analysés en terme de confort thermique, de consommations énergétiques et de comportement hygrothermique de parois en béton de chanvre.

Title : hygrothermal behavior of bio-based materials at the wall scale in controlled ambient and in-situ

Keywords : heat and mass transfer; experimental study; numerical simulation; walls; bi-climatic device; climates; renovated building

Abstract : Currently, bio-based insulating building materials are designed with the goal of reducing energy and non-renewable resource consumption. Once their multiphysical properties are characterized at the material scale, it is necessary to study their behavior at the wall and building scale.

The experimental and numerical study at the wall scale is performed in a controlled environment. The test wall in bio-sourced materials is implemented as a partition wall of a bi-climatic device, which allows to simulate indoor and outdoor climates. These climates correspond to French and Tunisian summer and mid-season climates. The numerical simulations are performed with the WUFI Pro 6.5 software. The hygrothermal behavior of the wall is analyzed from the kinetics and profiles of temperature, relative humidity and vapor pressure. The thermal and hygric resistances of the wall are identified. The behavior in dynamic regime is characterized by the damping and the phase shift of temperature and vapor pressure as well as by flow balances.

The in-situ study concerns a renovated hemp concrete building located in Normandy. The results are analyzed in terms of thermal comfort, energy consumption and hygrothermal behavior of hemp concrete walls.