

# THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE**

*Discipline : GENIE CIVIL*

*Spécialité : Sciences de l'Ingénieur*

Présentée et soutenue publiquement par

**Georges COSTANTINE**

Le 19 octobre 2018

---

## **Etude et optimisation des performances énergétiques d'une enveloppe en béton de chanvre pour le bâtiment**

---

Thèse dirigée par **GUILLAUME POLIDORI**

Co-directeur : **CHADI MAALOUF**

### JURY

M. Etienne WURTZ,	Directeur de Recherche,	CEA Grenoble,	<b>Président</b>
M. Abderrahim BOUDENNE,	Maître de Conférences HDR,	Université Paris Est Créteil,	<b>Rapporteur</b>
Mme Camille MAGNIONT,	Maître de Conférences,	Université Toulouse III Paul Sabatier,	<b>Examinatrice</b>
M. Elias KINAB,	Maître de Conférences HDR,	Université Libanaise, Faculté de Génie II,	<b>Examineur</b>
M. Guillaume POLIDORI,	Professeur,	Université de Reims,	<b>Directeur de thèse</b>
M. Chadi MAALOUF,	Maître de Conférences HDR,	Université de Reims,	<b>Co-directeur de thèse</b>





## Remerciements

Cette thèse représente l'aboutissement de trois ans de travail déroulés au sein du GRESPI, Groupe de Recherches en Sciences Pour l'Ingénieur, de l'Université de Reims-Champagne-Ardenne.

Je commence tout d'abord par remercier la région, Champagne-Ardenne, pour le financement du projet doctoral, en collaboration avec le FEDER, Fonds Européens pour le Développement Régional.

Ensuite, je souhaite remercier les membres du jury Mr. Etienne WURTZ et Mr. Abderrahim BOUDENNE pour avoir rapporté sur cette thèse et Mme Camille MAGNIONT et Mr. Elias KINAB pour avoir examiné le contenu du travail.

J'adresse en premier lieu toute ma gratitude à monsieur Guillaume POLIDORI, directeur du GRESPI et mon directeur de thèse pour sa grande bienveillance dès le début de ma thèse et jusqu'à présent et pour avoir créé les conditions propices qui m'ont permis de travailler dans un cadre parfaitement adéquat. Je le remercie chaleureusement pour cette collaboration aussi enrichissante techniquement que sur le plan humain.

Ensuite, il m'est difficile de trouver les mots pour remercier Mr. Chadi MAALOUF qui a encadré ce projet de A à Z, de proche et de loin, pendant les heures de travail et en dehors du laboratoire, voire durant les weekends et les vacances en cas de besoin. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour les précieux conseils, l'éclairage d'expert et les discussions fructueuses qu'il m'a prodigués et sans lesquels ce manuscrit n'aurait jamais vu le jour.

Je n'oublie pas non plus l'apport indispensable de Mme Tala MOUSSA, maître de conférence et collègue du GRESPI, qui a suivi mes travaux avec intérêt et bienveillance et ne s'est pas attardée à être à l'écoute et à apporter tout l'appui nécessaire pendant les périodes difficiles de la thèse.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à tous les doctorants du GRESPI, sans lesquels ces trois années n'auraient pas été les mêmes. Un grand merci pour votre support continu et pour les moments de convivialité qu'on a partagés ensemble pendant nos pauses-café déjeuners, soirées et notre rituel petit-déjeuner du vendredi. Je suis fier de pouvoir tisser avec la plupart d'entre vous des relations d'amitié et de fraternité éternelles.

J'adresse toute ma gratitude à Mme Naima BAABOUCHE, secrétaire du GRESPI, pour son enthousiasme et sans convivialité qui nous ont facilité toutes les procédures administratives dans le laboratoire.

Un grand merci également à tous les membres et personnels du GRESPI avec qui j'ai eu le privilège de travailler. Ils m'ont chaleureusement intégré dans leur équipe et ont contribué au bon déroulement de ce projet.

Encore et encore, un merci du fond de mon cœur à mes amis du Liban, qui en dépit de la distance, étaient présents avec moi en chaque instant par leurs support, affection et conseils.

Je n'oublie pas non plus tous mes amis en France, devenus ma deuxième famille, et avec qui j'ai partagé des moments et souvenirs inoubliables ...

Enfin, je finirai par une tendre pensée pour mes parents, mes deux sœurs et leur famille qui ont toujours cru en moi et m'ont apporté leur indéfectible soutien au cours de ces années ... C'est grâce à eux que je suis parvenu à ce stade et c'est à eux que je dédie ce travail!

## Résumé

Face aux normes et réglementations thermiques actuelles devenues de plus en plus sévères, l'orientation des pouvoirs publics vers l'emploi de matériaux bio-sourcés, en particulier à base végétale, fait partie des solutions explorées afin de continuer à construire de façon écologique et de réduire la facture énergétique issue du secteur du bâtiment. Les deux dernières décennies ont témoigné l'intérêt de plusieurs types de matériaux biosourcés, utilisés comme isolants thermiques, tel le béton de chanvre. Promouvoir le béton de chanvre dans la construction neuve et dans la restauration des bâtiments existants nécessite en premier lieu une caractérisation complète de ses propriétés intrinsèques et une validation de son comportement hygrothermique à l'échelle de la composante ou de la paroi voire du bâtiment. Bien que nombreuses études aient réussi à documenter ses propriétés physiques, mécaniques, thermiques, hydriques et acoustiques, son comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi et du bâtiment est cependant toujours en cours d'investigations. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de cette thèse. Dans une première partie, l'étude est consacrée aux parois simples et multicouches en béton de chanvre : plusieurs modèles numériques traitant des aspects physiques relatifs au béton de chanvre sont élaborés dans le but d'appréhender leur impact sur la prédiction des évolutions des températures et humidités relatives dans les parois en question. Ces phénomènes physiques tiennent compte de l'hystérésis du béton de chanvre et de la thermodépendance de ses isothermes de sorption. Les résultats de ces modèles sont comparés entre eux et à ceux de la littérature en vue d'une optimisation de ces parois. Dans la seconde partie, l'étude porte sur un local fictif dont la paroi Sud est en béton de chanvre, en s'intéressant aux paramètres influant ses conditions de confort intérieur et ses consommations énergétiques de chauffage et de climatisation. L'étude est enfin clôturée par le dernier chapitre qui traite du suivi d'un bâtiment existant utilisant le béton de chanvre comme isolant extérieur. Une comparaison entre une approche expérimentale réalisée au sein d'un appartement de ce bâtiment et une autre numérique aux échelles de la paroi et d'une pièce de l'appartement permet de valider les résultats numériques. L'outil de simulation SPARK sert de logiciel de calcul pour l'ensemble du travail.

*Mots clés : Béton de chanvre, hystérésis, thermodépendance, modélisation numérique, étude expérimentale, transferts hygrothermiques*

## Abstract

Thermal standards and regulations have become increasingly stringent nowadays. Therefore, the trend towards plant-based materials, commonly known as « green materials », is considered as one of the innovative solutions providing ecologic constructions and reducing energy costs derived from building sector. The last two decades have witnessed several bio-based materials use in buildings thermal insulation, such as hemp concrete. Promoting hemp concrete in new construction and in existing buildings restoration requires in the first place a complete characterization of its intrinsic properties and a validation of its hygrothermal

behavior at both wall and building scales. Numerous studies have successfully documented its physical, mechanical, thermal, hydric and acoustic properties. Otherwise, its hygrothermal behavior at wall and building scales is still undergoing notable investigations. Therefore, in the thesis first part, the study is devoted to study single and multilayers hemp concrete walls. Several numerical models dealing with physical hemp concrete aspects are developed in the aim of apprehending their impact on the prediction of temperature and relative humidity evolutions in studied walls. These physical phenomena include hemp concrete hysteresis and thermal dependence of its sorption curves. Results of these models are compared together and to those found in literature in order to optimize studied envelopes. In the second part, the study deals with a virtual hemp concrete room having a southern hemp concrete façade. Several parameters influencing its indoor comfort conditions and its energy consumption for heating and cooling are tested. The study concludes with a final chapter dealing with the monitoring of an existing building using hemp concrete as external insulator. It shows a comparison between an experimental approach carried out within an apartment of this building and another numerical at both wall and room scales to validate numerical results. SPARK simulation tool is used in the modelling.

*Key words: Hemp concrete, hysteresis, thermal dependency, numerical modelling, experimental study, hygrothermal transfers*

## Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Etude Bibliographique.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Défis environnementaux actuels.....</b>	<b>4</b>
<i>I.2.1. Changements Climatiques et effet de serre .....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.2. Facture énergétique nationale .....</i>	<i>5</i>
<b>I.3. Mobilisation à l'échelle nationale et européenne .....</b>	<b>5</b>
<i>I.3.1. Réduction des consommations énergétiques .....</i>	<i>5</i>
<i>I.3.2. Réduction des émissions de gaz à effet de serre .....</i>	<i>6</i>
<b>I.4. Contexte actuel du secteur du bâtiment Français .....</b>	<b>6</b>
<i>I.4.1. Consommation d'énergie et émissions des polluants .....</i>	<i>6</i>
<i>I.4.2. Réglementations et directives nationales dans le secteur du bâtiment.....</i>	<i>8</i>
<i>I.4.3. Tendances vers les matériaux bio-sourcés .....</i>	<i>10</i>
<b>I.5. Le béton de chanvre .....</b>	<b>11</b>
<i>I.5.1. Les atouts du chanvre .....</i>	<i>11</i>
<i>I.5.2. Le béton de chanvre et ses applications .....</i>	<i>13</i>
<i>I.5.3. L'importance du béton de chanvre du point de vue environnemental.....</i>	<i>14</i>
<b>I.6. Les échelles d'étude du béton de chanvre .....</b>	<b>15</b>
<i>I.6.1. Echelle du matériau.....</i>	<i>15</i>
<i>I.6.2. Echelle de la composante ou de la paroi.....</i>	<i>17</i>
<i>I.6.2.1. Mise en évidence des transports couplés de chaleur et de masse dans les parois en béton de chanvre .....</i>	<i>18</i>
<i>I.6.2.2. Impacts de la présence des enduits sur le comportement hygrothermique des parois en béton de chanvre.....</i>	<i>21</i>
<i>I.6.2.3. Impact de l'hystérésis dans la modélisation du comportement hygrothermique du béton de chanvre .....</i>	<i>24</i>
<i>I.6.2.4. Thermo-dépendance des isothermes du béton de chanvre dans la modélisation.....</i>	<i>29</i>
<i>I.6.3. Echelle du local et du bâtiment .....</i>	<i>33</i>
<b>I.7. Conclusion.....</b>	<b>37</b>
<b>Chapitre II : Etudes numériques du comportement hygrothermique du béton de chanvre à l'échelle de la paroi .....</b>	<b>38</b>
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>39</b>

<b>II.2.</b>	<b>Phénomènes de transports dans les matériaux poreux .....</b>	<b>39</b>
II.2.1.	<i>Mode de transports de l'humidité dans les matériaux poreux .....</i>	39
II.2.2.	<i>Transfert de chaleur dans les matériaux poreux .....</i>	41
II.2.3.	<i>Modélisation des transports de masse et de chaleur dans les matériaux poreux .....</i>	42
<b>II.3.</b>	<b>Modélisation numérique .....</b>	<b>43</b>
II.3.1.	<i>Outil de simulation numérique SPARK .....</i>	43
II.3.2.	<i>Modélisation des transports de masse et de chaleur dans les matériaux poreux .....</i>	45
II.3.3.	<i>Modélisation des isothermes de sorption et de l'hystérésis du béton de chanvre .....</i>	46
II.3.2.1.	Approche de Merakeb .....	46
II.3.2.2.	Approche de Rode .....	47
II.3.2.3.	Identification de l'hystérésis dans la modélisation .....	49
II.3.4.	<i>Modélisation de la thermodépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre.</i>	49
<b>II.4.</b>	<b>Application au béton de chanvre.....</b>	<b>50</b>
II.4.1.	<i>Approche de Merakeb.....</i>	51
II.4.2.	<i>Approche de Rode.....</i>	53
<b>II.5.</b>	<b>Applications numériques (Costantine et al., 2016) .....</b>	<b>54</b>
II.5.1.	<i>Application de l'approche de Merakeb avec le protocole NordTest :.....</i>	54
II.5.2.	<i>Validation à l'échelle de la paroi en utilisant l'approche de Merakeb.....</i>	55
II.5.2.1.	Impact du maillage .....	56
II.5.2.2.	Comparaison des modèles numériques : conditions de (Lelievre et al. 2014) .....	58
II.5.2.3.	Comparaison des modèles numériques à travers les simulations annuelles de la ville de Nancy .....	60
II.5.3.	<i>Validation à l'échelle de la paroi en utilisant l'approche de Rode.....</i>	62
II.5.3.1.	Impact du maillage .....	62
II.5.3.2.	Comparaison des modèles numériques : conditions de Lelievre et al. (2014) .....	65
II.5.3.3.	Comparaison des modèles numériques à travers les simulations annuelles de la ville de Nancy .....	68
II.5.4.	<i>Contribution à l'étude de la thermodépendance des isothermes de sorption à travers l'implémentation directe de l'équation de Clausius–Clapeyron .....</i>	71
II.5.5.	<i>Application de la prise en compte de l'hystérésis sur les conditions de Ait Oumeziane (2013) .....</i>	74
<b>II.6.</b>	<b>Applications numériques sur une paroi multicouches en béton de chanvre .....</b>	<b>76</b>
II.6.1.	<i>Protocol expérimental non-isotherme appliqué sur une paroi multicouches en béton de chanvre .....</i>	76
II.6.2.	<i>Impact du béton de chanvre en tant qu'isolant intérieur ou extérieur .....</i>	79
<b>II.7.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>83</b>

## **Chapitre III : Etudes numériques du béton de chanvre à l'échelle du local** ..... **84**

<b>III.1.</b>	<b>Introduction</b> .....	85
<b>III.2.</b>	<b>Modélisation à l'échelle du local</b> .....	85
<i>III.2.1.</i>	<i>Approches de modélisation à l'échelle du local</i> .....	85
<i>III.2.2.</i>	<i>Modèle de l'ambiance intérieure</i> .....	86
<i>III.2.3.</i>	<i>Modélisation des transferts entre les parois et les environnements interne et externe</i> .....	87
<i>III.2.4.</i>	<i>Présentation du local étudié</i> .....	88
<b>III.3.</b>	<b>Validation du modèle à l'échelle du local</b> .....	89
<i>III.3.1.</i>	<i>Aperçu général de CoDyBa</i> .....	89
<i>III.3.2.</i>	<i>Application du local-test sur CoDyBa et SPARK</i> .....	90
<i>III.3.2.1.</i>	<i>Cas avec 40% de vitrage sur la façade Sud</i> .....	91
<i>III.3.2.2.</i>	<i>Cas sans vitrage sur la façade Sud</i> .....	92
<b>III.4.</b>	<b>Comparaison des modèles numériques à l'échelle du local (Costantine et al., 2017)</b> 93	
<i>III.4.1.</i>	<i>Ventilation autoréglable</i> .....	94
<i>III.4.2.</i>	<i>Ventilation hygroréglable</i> .....	98
<i>III.4.3.</i>	<i>Synthèse de la comparaison entre les trois modèles</i> .....	101
<b>III.5.</b>	<b>Influence d'autres paramètres à l'échelle du local</b> .....	102
<b>III.6.</b>	<b>Influence du béton de chanvre en tant qu'isolant intérieur ou extérieur</b> .....	105
<b>III.7.</b>	<b>Conclusion</b> .....	108

## **Chapitre IV : Etude d'un bâtiment en béton de chanvre : Suivi expérimental et validation numérique** ..... **109**

<b>IV.1.</b>	<b>Introduction</b> .....	110
<b>IV.2.</b>	<b>Présentation du bâtiment et de l'appartement instrumenté</b> .....	110
<b>IV.3.</b>	<b>Approche expérimentale</b> .....	112
<i>IV.3.1.</i>	<i>Thermographie infrarouge</i> .....	112
<i>IV.3.2.</i>	<i>Conditions météorologiques extérieures</i> .....	114
<i>IV.3.3.</i>	<i>Instrumentation de l'appartement</i> .....	114
<b>IV.4.</b>	<b>Résultats expérimentaux</b> .....	115
<i>IV.4.1.</i>	<i>Période hivernale</i> .....	115
<i>IV.4.1.1.</i>	<i>Station-météo : vitesse et direction du vent</i> .....	115
<i>IV.4.1.2.</i>	<i>Station-météo : densité de rayonnement</i> .....	116

IV.4.1.3. Station-météo : pluviométrie, température et humidité relative extérieures.....	116
IV.4.1.4. Analyse des déperditions thermiques à travers l’enveloppe.....	117
IV.4.1.5. Analyse du confort thermique dans l’appartement.....	120
<i>IV.4.2. Période estivale</i> .....	122
IV.4.2.1. Station-météo : vitesse et direction du vent.....	122
IV.4.2.2. Station-météo : densité de rayonnement.....	122
IV.4.2.3. Station-météo : pluviométrie, température et humidité relative extérieures.....	123
IV.4.2.4. Analyse du confort thermique dans l’appartement.....	124
IV.4.2.5. Analyse du déphasage thermique entre l’extérieur et l’intérieur.....	125
<b>IV.5. Validation numérique sous l’outil de simulation SPARK</b> .....	125
<i>IV.5.1. Echelle de la paroi : déperditions thermiques au niveau de la paroi Sud du bureau</i> .....	125
IV.5.1.1. Comparaison entre les déperditions thermiques expérimentales et numériques .....	125
IV.5.1.2. Etude paramétrique sur la conductivité du béton de chanvre .....	128
IV.5.1.3. Etude paramétrique sur le coefficient d’absorption solaire .....	130
IV.5.1.4. Etude paramétrique sur le coefficient d’échange convectif intérieur .....	131
IV.5.1.5. Etude paramétrique sur la conductivité thermique de la brique .....	132
<i>IV.5.2. Echelle du local : température et humidité relative intérieures dans le bureau</i> .....	133
<b>IV.6. Conclusion</b> .....	138
<b>IV.7. Reproductivité du béton de chanvre dans le bâtiment</b> .....	138
<b>Conclusions générales et perspectives</b> . .....	139
<b>Références bibliographiques</b> .....	142
<b>Annexe 1</b> .....	151
<b>Annexe 2</b> .....	153

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I.1 : Evolution de la facture énergétique en France dans les dernières décennies (ADEME, 2013)	5
Figure I.2 : Evolution de la consommation d'énergie par secteur en fonction des années (SOeS, 2015).	7
Figure I.3 : Evolution des émissions de dioxyde de carbone par secteur en fonction des années (CITEPA, 2015).	7
Figure I.4 : Schématisation d'un bâtiment à énergie positive (RBR 2020-2050, 2015).	9
Figure I.5 : Amélioration Energie et Carbone dans le secteur du bâtiment selon le label E+C- (TCHANG Nathalie, 2016).	10
Figure I.6 : Evolution de la culture de chanvre en Europe entre 1993 et 2016 (Carus, 2017)	12
Figure I.7 : Répartition de la production du chanvre français (DREAL, 2015)	12
Figure I.8 : Représentation schématique des formulations « Toit » (a), « Mur » (b) et « Enduit » (c) (Evrard, 2008)	13
Figure I.9 : Etapes et rendement des procédés de formulation du béton de chanvre pour une mise en œuvre « mur » (Mémento, 2016).	14
Figure I.10 : Impact environnemental des matériaux de construction (Tradical, 2017).	14
Figure I.11 : Energie grise consommée par certains matériaux de construction (Tradical, 2017)	14
Figure I.12 : Variation de la conductivité thermique du béton de chanvre en fonction de la densité et la teneur en eau du matériau (Collet and Pretot, 2014b)	16
Figure I.13 : Impact de l'hygrométrie sur la conductivité thermique du béton de chanvre (Cerezo, 2005)	16
Figure I.14 : Variation de la conductivité thermique du béton de chanvre avec son vieillissement (Bennai et al., 2017).	17
Figure I.15 : Représentation schématique du dispositif expérimental représentant les enceintes climatiques	18
Figure I.16 : Modèle Physique de la paroi simple	20
Figure I.17 : Conditions extérieures de simulation	20
Figure I.18 : Murs-test construit pour l'étude (Rahim et al., 2017)	21
Figure I.19 : Conditions expérimentales statiques et dynamiques (Rahim et al., 2017)	21
Figure I.20 : Schématisation de la configuration utilisée dans l'étude de la paroi enduite en béton de chanvre (Samri, 2008)	22
Figure I.21 : Coupe transversale de la paroi enduite en béton de chanvre (Colinart et al. 2016).	23
Figure I.22 : Forme générale des isothermes de sorption (Piot, 2009).	24
Figure I.23 : Types d'hystérésis dans un matériau poreux (IUPAC, 1985)	25
Figure I.24 : Evolutions des humidités relatives dans la paroi (Ait Ouméziane, 2013)	27
Figure I.25 : Evolutions des températures dans la paroi (Ait Ouméziane, 2013).	27
Figure I.26 : Comparaison entre les températures simulées et mesurée (Lelievre et al., 2014)	28
Figure I.27 : Comparaison entre les humidités relatives simulées et mesurées (Lelievre et al., 2014).	28
Figure I.28 : Comparaison entre les températures simulées et mesurées avec et sans hystérésis pour le 1 <sup>er</sup> test (Lelievre et al., 2014).	28
Figure I.29 : Variation des isothermes de sorption du bois en fonction de la température (Rode and Clorius, 2004).	31

Figure I.30 : Evolution des humidités relatives sans prise en compte de la thermo-dépendance des courbes (Tran Le et al., 2015) .....	32
Figure I.31: Evolution des humidités relatives avec prise en compte de la thermo-dépendance des courbes (Tran Le et al., 2015).....	32
Figure I.32 : Thermo-dépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre Easy-R (Ait Oumeziane, 2013) .....	32
Figure I.33 : Comparaison des humidités relatives entre le béton cellulaire et le béton de chanvre (Tran Le et al. 2010).....	33
Figure I.34 : Consommations de chauffage entre le béton cellulaire et le béton de chanvre (Tran Le et al. 2010).....	33
Figure I.35 : Comparaison des températures des surfaces intérieure et extérieure (Shea et al., 2012) .	34
Figure I.36 : Comparaison des humidités relatives aux surfaces intérieure et extérieure (Shea et al., 2012) .....	34
Figure I.37 : Paroi du bâtiment en béton de chanvre étudié (Moujalled et al., 2015) .....	34
Figure I.38 : Comparaison des humidités relatives avec et sans hystérésis du côté extérieur (Moujalled et al., 2018).....	35
Figure I.39 : Comparaison des humidités relatives avec et sans hystérésis au milieu de la paroi (Moujalled et al., 2018).....	35
Figure I.40 : Comparaison des humidités relatives avec et sans thermo-dépendance du côté extérieur(Moujalled et al., 2018).....	35
Figure I.41 : Comparaison des humidités avec et sans thermo-dépendance au milieu de la paroi (Moujalled et al., 2018).....	35
Figure I.42 : Comparaison entre les températures mesurées aux différents endroits de l'enveloppe (Gourlay, 2017) .....	36

## Chapitre II

Figure II.1 : Mécanismes de transfert de chaleur à travers le matériau de construction poreux (Clyne et al., 2006).....	41
Figure II.2 : Construction d'un modèle numérique sous SPARK (Sowell and Haves, 2001).....	44
Figure II.3 : Exemple de discrétisation par la méthode des différences finies (Tran Le, 2010).....	44
Figure II.4 : Schématisation de l'hystérésis dans le bois (Carmeliet et al., 2005).....	48
Figure II.5 : Chaleur isostérique de sorption .....	50
Figure II.6 : Calage des isothermes de sorption selon le modèle de Merakeb .....	52
Figure II.7 : Calibrage du modèle à hystérésis (Mod_2) avec l'approche de Merakeb.....	52
Figure II.8 : Thermodépendance des isothermes avec l'approche de Merakeb .....	53
Figure II. 9 : Calage des isothermes de sorption selon le modèle de Rode .....	53
Figure II.10 : Calibrage du modèle à hystérésis (Mod_2) avec l'approche de Rode .....	54
Figure II.11 : Thermodépendance des isothermes avec l'approche de Rode .....	54
Figure II.12 : Températures mesurées et simulées (COMSOL)(Lelievre, 2015) .....	55
Figure II.13 : Températures simulées (SPARK) .....	55
Figure II.14 : Humidités relatives mesurées et simulées (COMSOL)(Lelievre, 2015).....	55
Figure II.15 : Humidités relatives simulées (SPARK) .....	55
Figure II.16 : Conditions expérimentales et emplacement des sondes dans la paroi (Lelievre et al., 2014) .....	56
Figure II.17 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod_1 (Merakeb) .....	57
Figure II.18 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod_1 (Merakeb).....	57

Figure II.19 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod_2 (Merakeb) .....	57
Figure II.20 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod_2 (Merakeb).....	57
Figure II.21 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod_3 (Merakeb) .....	57
Figure II.22 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod_3 (Merakeb).....	57
Figure II.23 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en x = 29 cm.....	58
Figure II.24 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en x = 29 cm .....	58
Figure II.25 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en x = 18 cm.....	58
Figure II.26 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en x = 18 cm .....	58
Figure II.27 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en x = 5cm.....	59
Figure II.28 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en x = 5 cm .....	59
Figure II.29 : Température de surface intérieure pour la période hivernale .....	60
Figure II.30 : Température de surface intérieure pour la période estivale.....	60
Figure II.31 : Flux de chaleur dans la paroi pour la période hivernale.....	60
Figure II.32 : Flux de chaleur dans la paroi pour la période estivale .....	60
Figure II.33 : Teneur volumique en eau à la surface intérieure pour la période hivernale.....	61
Figure II.34 : Teneur volumique en eau à la surface intérieure pour la période estivale .....	61
Figure II.35 : Variations de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour les trois modèles (Merakeb).....	61
Figure II.36 : Illustration de l'hystérésis obtenue par Lelievre et al. (2014) suivant l'approche de Mualem .....	62
Figure II.37 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod_1 (Rode).....	63
Figure II.38 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod_1 (Rode).....	63
Figure II.39 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod_2_ads (Rode)....	63
Figure II.40 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod_2_ads (Rode) .....	63
Figure II.41 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod_2_des (Rode)....	64
Figure II.42 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod_2_des (Rode) .....	64
Figure II.43 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod_3 (Rode).....	64
Figure II.44 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod_3 (Rode).....	64
Figure II.45 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod_4_ads (Rode)....	64
Figure II.46 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod_4_ads (Rode) .....	64
Figure II.47 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod_4_des (Rode)....	65
Figure II.48 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod_4_des (Rode) .....	65
Figure II.49 : Comparaison des humidités relatives .....	66
Figure II.50 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en x = 29 cm .....	66
Figure II.51 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en x = 18 cm.....	66
Figure II.52 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en x = 18 cm .....	66
Figure II.53 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en x = 5 cm.....	66
Figure II.54 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en x = 5cm .....	66
Figure II.55 : Comparaison des humidités relatives entre perméabilité constante et variable .....	68
Figure II.56 : Comparaison des températures entre perméabilité constante et variable .....	68
Figure II.57 : Température de surface intérieure pour la période hivernale .....	68
Figure II.58 : Température de surface intérieure pour la période estivale.....	68
Figure II.59 : Flux de chaleur dans la paroi pour la période hivernale.....	69
Figure II.60 : Flux de chaleur dans la paroi pour la période estivale .....	69
Figure II.61 : Teneur volumique en eau à la surface intérieure pour la période hivernale.....	69

Figure II.62 : Teneur volumique en eau à la surface intérieure pour la période estivale .....	69
Figure II.63 : Variations de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour les trois modèles (Rode).....	70
Figure II.64 : Schématisation de l'hystérésis en initialisation de l'adsorption principale.....	71
Figure II.65 : Schématisation de l'hystérésis en initialisation de la désorption principale .....	71
Figure II.66 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en $x = 29$ cm.....	72
Figure II.67 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en $x = 29$ cm .....	72
Figure II.68 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en $x = 18$ cm.....	72
Figure II.69 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en $x = 18$ cm .....	72
Figure II.70 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en $x = 5$ cm.....	73
Figure II.71 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en $x = 5$ cm .....	73
Figure II.72 : Chaleur isostérique de sorption calculée en fonction de la température et l'humidité relative.....	73
Figure II.73 : Chaleur isostérique de sorption calculée en fonction de la teneur en eau .....	73
Figure II.74 : Conditions expérimentales de Ait Oumeziane (2013) .....	74
Figure II.75 : Comparaison des humidités relatives pour $x = 7,5$ cm.....	75
Figure II.76 : Comparaison des températures pour $x = 7,5$ cm .....	75
Figure II.77 : Comparaison des humidités relatives pour $x = 22,5$ cm.....	75
Figure II.78 : Comparaison des températures pour $x = 22,5$ cm .....	75
Figure II.79 : Coupe transversale de la paroi testée .....	77
Figure II.80 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en $x = 36$ cm.....	77
Figure II.81 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en $x = 36$ cm .....	77
Figure II.82 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en $x = 29$ cm.....	78
Figure II.83 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en $x = 29$ cm .....	78
Figure II.84 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en $x = 18$ cm.....	78
Figure II.85 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en $x = 18$ cm .....	78
Figure II.86 : Coupe transversale de la paroi .....	79
Figure II.87 : Température de surface intérieure en hiver (20 jours en Décembre) .....	80
Figure II.88 : Température de surface intérieure en été (20 jours en Aout) .....	80
Figure II.89 : Déperditions thermiques en hiver (20 jours en Décembre).....	80
Figure II.90 : Déperditions thermiques en été (20 jours en Aout).....	80
Figure II.91 : Températures aux interfaces Brique/Béton de chanvre.....	81
Figure II.92 : Températures aux interfaces Chanvre-chaux/Brique ou Chanvre-chaux/Béton de chanvre .....	81
Figure II.93 : Gradient de densité de vapeur à la surface intérieure en hiver (10 jours en décembre)..	82
Figure II.94 : Gradient de densité de vapeur à la surface intérieure en été (10 jours en été) .....	82

### Chapitre III

Figure III.1 : Approche monozone (Mora, 2003).....	85
Figure III.2 : Approche multizones(Mora, 2003).....	85
Figure III.3 : Approche intermédiaire(Mora, 2003) .....	85
Figure III.4 : Approche par CFD (Mora, 2003).....	85
Figure III.5 : Représentation schématique de la zone intérieure du local .....	86
Figure III.6 : Schéma du local étudié .....	88
Figure III.7 : Variations du débit de ventilation suivant la stratégie .....	89

Figure III.8 : Interface de CoDyBa (Noël and Roux, 2004).....	90
Figure III.9: Humidités relatives intérieures entre CoDyBa et SAPRK avec vitrage pour le mois de février .....	91
Figure III.10: Températures intérieures entre CoDyBa et SAPRK avec vitrage pour le mois de février .....	91
Figure III.11 : Humidités relatives intérieures entre CoDyBa et SAPRK avec vitrage pour le mois de juillet.....	91
Figure III.12 : Températures intérieures entre CoDyBa et SAPRK avec vitrage pour le mois de juillet .....	91
Figure III.13 : Consommations énergétiques entre CoDyBa et SAPRK pour le cas avec vitrage .....	91
Figure III.14 : Humidités relatives intérieures entre CoDyBa et SAPRK sans vitrage pour le mois de février .....	92
Figure III.15 : Températures intérieures entre CoDyBa et SAPRK sans vitrage pour le mois de février .....	92
Figure III.16 : Humidités relatives intérieures entre CoDyBa et SAPRK sans vitrage pour le mois de Juillet .....	92
Figure III.17 : Températures intérieures entre CoDyBa et SAPRK sans vitrage pour le mois de Juillet .....	92
Figure III.18 : Consommations énergétiques entre CoDyBa et SAPRK pour le cas sans vitrage.....	93
Figure III.19 : Comparaison des humidités relatives intérieures en hiver (10 jours en mars).....	94
Figure III.20 : Comparaison des températures intérieures en hiver (10 jours en mars) .....	94
Figure III.21 : Comparaison des humidités relatives intérieures en été (10 jours en juillet).....	94
Figure III.22 : Comparaison des températures intérieures en été (10 jours en juillet) .....	94
Figure III.23 : Comparaison des consommations énergétiques.....	95
Figure III.24 : Comparaison des gradients de densité de vapeur en hiver (10 jours en mars).....	95
Figure III.25 : Comparaison des gradients de densité de vapeur en été (10 jours en juillet).....	95
Figure III.26 : Comparaison des diffusivités thermiques sur la surface intérieure.....	97
Figure III.27 : Comparaison des diffusivités thermiques au milieu de la paroi .....	97
Figure III.28 : Comparaison des effusivités thermiques sur la surface intérieure .....	97
Figure III.29 : Comparaison des effusivités thermiques au milieu de la paroi.....	97
Figure III.30 : Comparaison des conductivités thermiques entre les trois modèles .....	98
Figure III.31 : Comparaison des capacités thermiques entre les trois modèles.....	98
Figure III.32 : Comparaison des humidités relatives intérieures en hiver (10 jours en mars).....	99
Figure III.33 : Comparaison des températures intérieures en hiver (10 jours en mars) .....	99
Figure III.34 : Comparaison des humidités relatives intérieures en été (10 jours en juillet).....	99
Figure III.35 : Comparaison des températures intérieures en été (10 jours en juillet) .....	99
Figure III.36 : Comparaison des consommations énergétiques pour la ventilation hygroréglable .....	99
Figure III.37 : Comparaison des gradients de densité de vapeur en hiver (10 jours en mars).....	100
Figure III.38 : Comparaison des gradients de densité de vapeur en été (10 jours en juillet).....	100
Figure III.39: Comparaison des débits de ventilation en hiver (10 jours en mars) .....	101
Figure III.40: Comparaison des débits de ventilation en été (10 jours en juillet) .....	101
Figure III.41 : Comparaison des comportements de la paroi suivant le scenario d'occupation .....	104
Figure III.42 : Conductivité thermique de l'enveloppe en utilisant la corrélation de (Lelievre et al.,2014) .....	105
Figure III.43 : Conductivité thermique de l'enveloppe en utilisant la corrélation de Ait Oumeziane (2013) .....	105

Figure III.44 : Coupe transversale de la paroi .....	106
Figure III.45 : Comparaison des humidités relatives intérieures pour les mois de février et mars .....	107
Figure III.46 : Comparaison des températures intérieures pour les mois de février et mars .....	107
Figure III.47 : Comparaison des humidités relatives intérieures pour les mois de juillet et août.....	107
Figure III.48 : Comparaison des températures intérieures pour les mois de juillet et août .....	107

## Chapitre IV

Figure IV.1: Vue de la façade Sud du bâtiment .....	111
Figure IV.2 : Vue des façades Est du bâtiment .....	111
Figure IV.3 : Plan de l'appartement étudié .....	112
Figure IV.4 : Thermographie infrarouge extérieure de la façade Sud.....	113
Figure IV.5 : Thermographie infrarouge intérieure dans le bureau.....	113
Figure IV.6 : Thermographie infrarouge extérieure de la façade Ouest.....	113
Figure IV.7 : Station-météo Vantage Pro2.....	114
Figure IV.8 : Emplacement de la station-météo sur la toiture.....	114
Figure IV.9 : Vitesse moyenne du vent en fonction de sa direction en hiver.....	115
Figure IV.10 : Fréquence de la direction du vent en hiver .....	115
Figure IV.11 : Densité de rayonnement solaire global sur une surface horizontale pour la période hivernale .....	116
Figure IV.12 : Température extérieure pour la période hivernale .....	117
Figure IV.13 : Humidité relative extérieure et quantité de précipitations pendant la période hivernale .....	117
Figure IV.14 : Densité de flux et température intérieure pour la première période .....	118
Figure IV.15 : Densité de flux et température intérieure pour la deuxième période .....	118
Figure IV.16 : Méthode de Bland-Altman appliquée pour les Fluxmètres 1 et 2 .....	119
Figure IV.17 : Analyse statistique pour les Fluxmètres 1 et 2 .....	119
Figure IV.18 : Méthode de Bland-Altman appliquée pour les Fluxmètres 1 et 3 .....	119
Figure IV.19 : Analyse statistique pour les Fluxmètres 1 et 3 .....	119
Figure IV.20 : Densité de flux et précipitations pour la deuxième période.....	120
Figure IV.21 : Diagramme psychométrique du séjour en hiver .....	121
Figure IV.22 : Diagramme psychométrique de la chambre des parents en hiver.....	121
Figure IV.23 : Vitesse moyenne du vent en fonction de sa direction en été .....	122
Figure IV.24 : Fréquence de la direction du vent en été.....	122
Figure IV.25 : Densité de rayonnement solaire global sur une surface horizontale pour la période estivale .....	123
Figure IV.26 : Température extérieure pour la période estivale.....	123
Figure IV.27 : Humidité relative extérieure et quantité de précipitations pendant la période estivale .....	124
Figure IV.28 : Diagramme psychométrique du séjour en été.....	124
Figure IV.29 : Diagramme psychométrique de la chambre des parents en été .....	124
Figure IV.30 : Comparaison entre la température extérieure et la température intérieure entre le 20 et le 25 Août 2016.....	125
Figure IV.31 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et numériques du flux thermique pour la 1 <sup>ère</sup> période.....	127

Figure IV.32 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et numériques du flux thermique pour la 2 <sup>ème</sup> période.....	127
Figure IV.33 : Variation de l'humidité relative au milieu de l'enduit sable - chaux, au milieu de la paroi en béton de chanvre et à l'interface entre les deux pour la période allant du 1 <sup>er</sup> décembre 2015 à 11 janvier 2016.....	128
Figure IV.34 : Comparaison entre les flux thermiques expérimentaux et numériques en fonction de la conductivité thermique du béton de chanvre entre le 1 Déc. 2015 et le 15 Déc. 2015.....	129
Figure IV.35 : Comparaison entre les flux thermiques expérimentaux et numériques en fonction de la conductivité thermique du béton de chanvre entre le 16 Déc. 2015 et le 11 Jan. 2016.....	130
Figure IV.36 : Comparaison entre les flux thermique expérimentaux et le cas numérique global entre le 1 Déc. 2015 et le 15 Déc. 2016 .....	133
Figure IV.37 : Comparaison entre les flux thermique expérimentaux et le cas numérique global entre le 16 Déc. 2015 et le 11 Jan. 2016 .....	133
Figure IV.38 : Coefficients d'échange convectifs intérieurs dans la période entre Juillet 26, 2016 et Septembre 23, 2016.....	134
Figure IV.39 : Comparaison entre les températures intérieures mesurées et calculées dans le local pour la période estivale.....	135
Figure IV.40 : Comparaison entre les humidités relatives intérieures mesurées et calculées dans le local pour la période estivale.....	136

## Liste des tableaux

### Chapitre I

Tableau I.1 : Exemples de dosages du béton de chanvre selon les applications .....	13
Tableau I.2 : Systèmes de murs étudiés (Evrard and De Herde, 2010) .....	19
Tableau I.3 : Comparaison des grandeurs caractéristiques pour les systèmes de murs étudiés (Evrard and De Herde, 2010) .....	20

### Chapitre II

Tableau II.1 : Propriétés du béton de chanvre (Lelievre et al., 2014) .....	51
Tableau II.2 : Caractéristiques des modèles numériques testés.....	51
Tableau II.3 : Coefficients des équations des isothermes suivant l'équation de Merakeb .....	52
Tableau II.4 : Coefficients des équations des isothermes suivant l'approche de Rode .....	53
Tableau II.5 : Temps de calcul nécessaire selon le maillage et le modèle (Approche de Merakeb) .....	56
Tableau II.6 : Consommation de chauffage par unité de surface pour les trois modèles (Approche de Merakeb) .....	62
Tableau II.7 : Temps de calcul nécessaire selon le maillage et le type de modèle (Approche de Rode) .....	63
Tableau II.8 : Consommation de chauffage par unité de surface pour les trois modèles (Approche de Rode) .....	69
Tableau II.9 : Consommation de chauffage par unité de surface du Mod_2_des pour 4 ans (Approche de Rode) .....	70
Tableau II.10 : Propriétés du béton de chanvre selon les travaux de (Ait Oumeziane, 2013).....	74
Tableau II.11 : Protocole expérimental appliqué (Colinart et al., 2016) .....	76
Tableau II.12 : Propriétés des matériaux de la paroi testée(Colinart et al., 2016).....	77
Tableau II.13 : Constitution et propriétés des matériaux de la paroi.....	79
Tableau II.14 : Différentes configurations testées pour la paroi multicouches .....	80

### Chapitre III

Tableau III.1: Propriétés du béton de chanvre.....	89
Tableau III.2 : Tableau comparatif entre les trois modèles pour la ventilation autoréglable .....	101
Tableau III.3 : Tableau comparatif entre les trois modèles pour la ventilation hygro-réglable.....	101
Tableau III.4 : Propriétés du béton de chanvre selon les travaux de Ait Oumeziane (2013) .....	103
Tableau III.5 : Comparaison entre les quatre variantes du modèle standard Mod_1 .....	103
Tableau III.7 : Constitution de la paroi Sud du local.....	106
Tableau III.8 : Comparaison entre les deux configurations d'enveloppe à l'échelle du local.....	106

### Chapitre IV

Tableau IV.1 : Propriétés de l'enveloppe .....	111
Tableau IV.2: Dispositif expérimental .....	115
Tableau IV.3: Propriétés de la paroi étudiée pour le cas de simulation initial .....	127
Tableau IV.4: Variation des flux thermiques en fonction de la conductivité du béton de chanvre.....	129
Tableau IV.5: Variation des flux thermiques en fonction du coefficient d'absorption solaire .....	131

Tableau IV.6: Variation des flux thermiques en fonction du coefficient d'échange convectif intérieur .....	131
Tableau IV.7: Variation des flux thermiques en fonction de la conductivité thermique de la brique .	132
Tableau IV.8: Cas de simulation global .....	132
Tableau IV.9: Etude paramétrique à l'échelle du local .....	135

## Nomenclature

Certains symboles et notions n'apparaissent pas dans cette liste mais sont expliqués dans le texte suivant leur parution.

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>	<b>Unités</b>
a	diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
a	paramètre thermodynamique	
b	constante de calibration	
C	chaleur spécifique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C <sub>0</sub>	chaleur spécifique de matériau sec	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
x	épaisseur	m
D <sub>T</sub>	coefficient de transport de masse de l'eau lié à un gradient de température	$m^2.s^{-1}.C^{-1}$
D <sub>Tv</sub>	coefficient de transport de la vapeur lié à un gradient de température	$m^2.s^{-1}.C^{-1}$
D <sub>θ</sub>	coefficient de transport de masse de l'eau lié à un gradient de teneur volumique en humidité	$m^2.s^{-1}$
D <sub>θv</sub>	coefficient de transport de masse de la vapeur d'eau associé gradient en humidité volumique	$m^2.s^{-1}$
E	effusivité thermique	$J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$
g	accélération gravitationnelle	$m.s^{-2}$
g <sub>v</sub>	diffusivité hydrique	$m^2.s^{-1}$
H	enthalpie	J
HR	Humidité relative	%
h <sub>M</sub>	coefficient d'échange massique	$m.s^{-1}$
h <sub>T, h</sub>	coefficient d'échange convectif	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h <sub>r</sub>	coefficient d'échange radiatif	$W.m^{-2}.K^{-1}$
I	inertie de la zone	$J.m^{-3}.K^{-1}$
K	conductivité hydraulique	$kg.Pa^{-1}.m^{-1}.s^{-1}$
L <sub>v</sub>	chaleur latente de vaporisation	$J.kg^{-1}$
L <sub>e</sub>	nombre de Lewis	
m	masse	kg
M	Masse molaire	$kg.m^{-3}$

$P_c$	Pression capillaire	Pa
$P_{vs}$	Pression de vapeur saturante	Pa
$Q_s$	flux de l'air	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
$r$	rayon	m
$R$	constante des gaz parfait	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$S$	surface	$\text{m}^2$
$t$	temps	s
$T$	température	$^{\circ}\text{C}$
$u$	teneur massique en eau	$\text{kg}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$
$V$	volume	$\text{m}^3$
$w$	teneur massique en eau	$\text{kg}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$
$x$	abscisse	m

## Notations grecques

Symbole	Définition	Unités
$\lambda$	conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\theta$	humidité volumique	$m^3.m^{-3}$
$\rho$	masse volumique	$kg.m^{-3}$
$\Phi$	densité de flux de chaleur	$W.m^{-3}$
$\pi$	perméabilité de vapeur	$kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$
$\mu$	facteur de résistance à la vapeur	
$\xi$	pentés des tangentes	
$\pi$	perméabilité à la vapeur du matériau	$kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$
$\delta a$	perméabilité à l'air	$kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$
$\delta p$	perméabilité à la vapeur	$kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$
$\Phi$	flux de chaleur	W
$\varphi$	humidité relative	%
$\Phi_{source}$	source de chaleur	W

Notations	Signification
0	relatif au matériau poreux sec
a	relatif à l'air
i	relatif à la surface intérieure
e	relatif à la surface extérieure
$r_m$	relatif à la température rayonnante moyenne
s	relatif à la surface, au solide
ve	relatif à la vapeur d'eau
a	adsorption
d	désorption
l	liquide

## Introduction générale

Le contexte environnemental actuel prédit une fin programmée des énergies fossiles et des ressources minières à l'horizon 2050, accompagnée du réchauffement climatique de la planète qui a atteint des niveaux records ces dernières années. Récemment, une prise de conscience nationale et mondiale de cette situation écologique alarmante, s'est traduite par une mobilisation multi-échelles afin de préserver les moyens de vivre pour les générations futures dans le cadre du développement durable.

Le secteur du bâtiment français constitue l'un des secteurs les plus énergivores du territoire, et se classe parmi les premières sources d'émission du dioxyde de carbone, contributeur principal de l'effet de serre et du réchauffement de la Terre. Il est donc devenu crucial de se poser les questions de solutions et d'alternatives à mettre en œuvre dans ce secteur le plus rapidement possible afin de limiter son impact sur l'écologie.

Le développement des « filières vertes » et des matériaux biosourcés dans les constructions constitue une approche d'actualité innovante qui contribue à la mise en œuvre de la transition énergétique. En effet, l'utilisation des matériaux d'origine végétale, qui « stockent » le carbone et dont la production et les transformations successives ont un impact réduit sur l'environnement, s'impose plus clairement dans le secteur du bâtiment moderne et dans la réhabilitation des constructions existantes.

Le chanvre, qui est une plante renouvelable et recyclable, est une source naturelle exploitable dans le domaine des constructions, connue pour ses qualités isolantes, ses propriétés de régulation de température et d'hygrométrie de l'espace habité améliorant notamment les confort d'hiver et d'été. Il peut ainsi se substituer aux isolants thermiques classiques sous forme de béton ou de mortier de chanvre, obtenus à partir de la paille de chanvre (chènevotte) mélangée à un liant à base de chaux aérienne.

Durant les deux dernières décennies, le béton de chanvre a constitué l'objet de nombreuses études expérimentales afin de le caractériser et d'identifier son comportement lorsqu'il est utilisé à l'échelle de la paroi. Ceci se fait en mettant en place des enceintes bi-climatiques qui imposent des conditions particulières de climat de chaque côté de la paroi. Le suivi de l'évolution des températures et humidités relatives au sein des parois s'effectue grâce à des sondes adaptées. Toutefois, dans la modélisation, les modèles simples de transferts de chaleur et de masse n'arrivent pas à prédire toujours avec succès le comportement de la paroi en béton de chanvre. De ce fait, plusieurs phénomènes physiques sont questionnés et leur influence sur les prédictions du comportement hygrométrique n'est toujours pas validée dans les parois simples ou bien multicouches. L'hystérésis du béton de chanvre et la thermodépendance de ses isothermes de sorption font partie des phénomènes physiques qui nécessitent encore d'être étudiés. D'ailleurs, à l'échelle du local et du bâtiment, les recherches effectuées sont moins importantes et les études sur l'hystérésis et la thermodépendance sont quasi inexistantes. La plupart des travaux sont menés sur la durabilité de ces bâtiments sans se soucier aux conditions de confort intérieur.

Dans ce cadre, les chapitres de la thèse se divisent comme suit : le premier chapitre bibliographique résume généralement l'état de l'art du contexte et les différentes études

réalisées sur le béton de chanvre aux échelles de la paroi et du bâtiment. C'est à la lumière des lacunes de la littérature que s'oriente l'ensemble du travail effectué.

Le deuxième chapitre, mené sur des parois simples et multicouches en béton de chanvre, se focalise sur l'effet de la prise en compte de l'hystérésis et de la thermodépendance des isothermes de sorption dans la modélisation, suivant deux approches de modélisation des courbes de sorption. Des comparaisons avec le cas du modèle standard de transferts sont effectuées pour diverses conditions de température et d'humidité imposées aux parois.

Le troisième est établi à l'échelle du local et traite de l'influence de l'hystérésis et la thermodépendance sur les conditions de confort à l'intérieur ainsi que sur les consommations énergétiques de la pièce. Différents aspects sont traités à l'échelle du local, parmi lesquels la stratégie de ventilation, le scénario d'occupation, le type de climat et les propriétés du béton de chanvre.

Le dernier chapitre est consacré à un suivi expérimental d'un bâtiment occupé dont l'isolation extérieure est en béton de chanvre : les conditions météorologiques extérieures ainsi que celles du confort intérieur d'un appartement sont tout d'abord analysées. Ensuite, un couplage avec une approche numérique est réalisé à l'échelle de la paroi et du local en vue de la validation des résultats. Ce couplage fait appel à une étude paramétrique afin d'évaluer le potentiel de chacun des paramètres sur l'amélioration des résultats.

---

## Chapitre I : Etude Bibliographique

---

Le chapitre bibliographique relève de la problématique générale liée à l'épuisement des ressources minières et à la croissance progressive des émissions de gaz à effet de serre. Ceci suscite une mobilisation aux échelles nationale et mondiale et surtout dans le secteur du bâtiment avec l'ambition de passer d'une approche énergétique à une approche environnementale. C'est ainsi que le béton de chanvre connaît son évolution. Dans ce cadre, la suite du chapitre traite les études et travaux réalisés afin de modéliser et prédire le comportement hygrothermique des enveloppes en béton de chanvre, tout en mettant l'accent sur l'hystérésis qui a lieu entre les isothermes de sorption et leur dépendance à la température.

## **I.1. Introduction**

Récemment, plusieurs défis économiques, sociologiques et environnementaux sont devenus les enjeux majeurs des chercheurs et scientifiques : la population mondiale continue à croître. Elle a été multipliée par sept au cours des deux derniers siècles et devrait continuer à croître jusqu'à atteindre peut être 11 milliards à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (Ined, 2017) . Des études récentes montrent que les sept milliards actuels de personnes sur la planète déploient l'équivalent d'une planète et demie en valeurs de ressources chaque année pour subvenir à leurs besoins. Et si cela continue avec la même cadence, la consommation d'énergie et de ressources minières aura triplé dans trente-cinq ans avec dix milliards d'habitants sur la Terre. Sans oublier que cet accroissement de la demande en énergie et en matières premières se fait au détriment de l'environnement causant ainsi des dégâts irréversibles. De nos jours, les principaux enjeux sociétaux consistent à réduire les factures énergétiques issues des différents secteurs actifs tout en limitant les impacts environnementaux et assurant le développement durable. De son côté, le secteur du bâtiment a tiré l'alarme sur ses consommations énergétiques et ses émissions de dioxyde de carbone et a commencé à se mobiliser à travers la mise en œuvre de nouveaux matériaux de construction appelés « bio-sourcés » dans les nouvelles constructions et dans les rénovations des bâtiments existants. Le béton de chanvre fait partie de ces matériaux « verts » et appartient à la famille des bétons de bois. Au moment où ses propriétés intrinsèques sont largement documentées (Collet, 2004; Evrard, 2008), son comportement hygrothermique est toujours en cours d'investigation (Tran Le, 2010; Ait Oumeziane, 2013; Lelievre, 2015).

Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre est dédiée à la problématique environnementale globale et aux directives nationales et régionales qui en découlent. La deuxième partie est plutôt ciblée et consacrée à l'essor du béton de chanvre et aux approches expérimentales et numériques de son étude.

## **I.2. Défis environnementaux actuels**

### *I.2.1. Changements Climatiques et effet de serre*

Dans ses deux derniers rapports sur l'évaluation du climat mondial, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2016)(OMM, 2015) constate que les années 2015 et 2016 sont considérées comme historiques concernant les phénomènes climatiques extrêmes ou particuliers qui les ont marquées. L'année 2016 est la plus chaude jamais enregistrée. D'après la moyenne établie sur la base des données utilisées par l'OMM, la température à l'échelle du globe, en 2016, a été supérieure de 0,52 °C à la moyenne calculée pour la période de référence 1981–2010 et de 0,06 °C au record précédent établi en 2015. Ces vagues de chaleur d'une intensité extrême ont frappé différentes régions du monde, entraînant une surmortalité de plusieurs milliers de personnes, des précipitations extrêmes atteignant un niveau record, des inondations qui ont fait des dizaines de milliers de sinistrés et des déficits pluviométriques surtout en Afrique. Cette hausse pertinente des températures mondiales est principalement due aux émissions de gaz à effet de serre, à l'instar des hydrocarbures et de dioxyde de carbone, qui constituent les premiers contributeurs du réchauffement climatique menaçant la planète Terre.

## I.2.2. Facture énergétique nationale

En se basant sur le rapport de L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME, 2013), la facture énergétique nationale française s'élève à 68,7 milliards d'euros établissant un record avec une augmentation de 12% par rapport aux années précédentes (Figure I.1) . Cette hausse revient principalement à la flambée du prix de pétrole et à la forte évolution de la facture gazière. Depuis l'été 2014, elle s'effrite pour chuter de 28% environ en 2015 comme conséquence directe de la baisse générale du prix des énergies et plus particulièrement des produits pétroliers (SOeS, 2017).

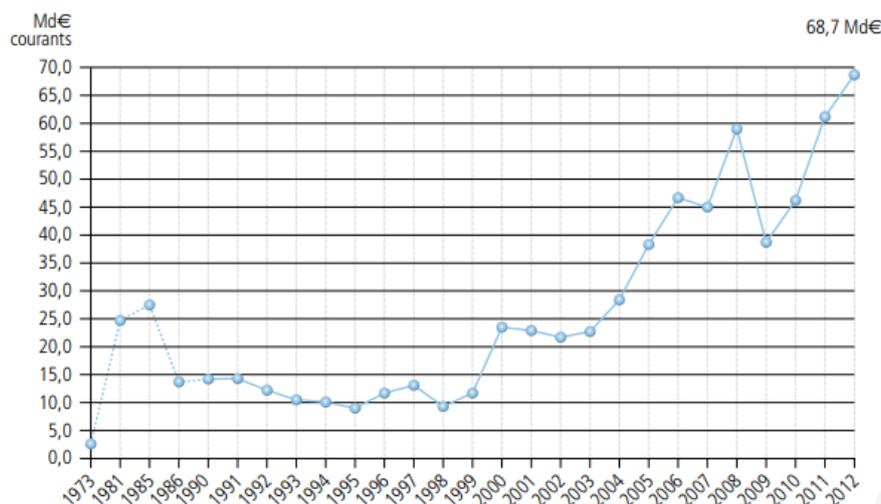


Figure I.1 : Evolution de la facture énergétique en France dans les dernières décennies (ADEME, 2013)

## I.3. Mobilisation à l'échelle nationale et européenne

### I.3.1. Réduction des consommations énergétiques

A travers ses engagements internationaux, européens et nationaux, la France œuvre chaque jour pour améliorer l'efficacité énergétique de ses différents secteurs, et développer les énergies renouvelables. Faisant suite à l'engagement de baisse de 20 % des consommations inscrit dans le paquet énergie climat de 2008 (Paquet Climat-Energie, 2008), la France s'est fixée comme double objectif de réduire sa consommation d'énergie finale à 131 Mtep et d'énergie primaire à 236 Mtep à l'horizon 2020. Ces objectifs sont en bonne voie d'être atteints puisque la France affichait une consommation d'énergie finale de 150 Mtep et une consommation d'énergie primaire de 257 Mtep en 2014. Dans cette continuité, l'Europe s'est fixée en 2014 de nouveaux challenges à l'horizon 2030 visant à améliorer de 27 % minimum le niveau d'efficacité énergétique, d'augmenter de 27 % minimum la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie, et de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40 % par rapport à 1990 (European Commission, 2016). Ces nouveaux objectifs font échos à ceux introduits par la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV, 2015) et notamment celui de réduire de 50 % la consommation finale d'énergie de la France à l'horizon 2050 par rapport à 2012 (i.e. descendre en dessous du seuil de 110 Mtep).

C'est dans ce cadre que de nouvelles mesures sont mises en œuvre telles que la directive sur les performances énergétiques des bâtiments avec l'introduction des diagnostics de performance énergétiques (DPE), la directive étiquetage à travers l'adoption des étiquettes énergie, ou encore la directive sur l'efficacité énergétique avec la mise en place de l'obligation d'audits énergétiques pour les grandes entreprises (ADEME, 2015).

### *1.3.2. Réduction des émissions de gaz à effet de serre*

Depuis 20 ans, d'importants progrès ont été réalisés en matière d'émissions de gaz à effet de serre. En effet, les émissions de ces gaz à effet de serre couverts par le protocole de Kyoto ont été réduites de 12 % entre 1990 et 2013 pour atteindre 492 Mt équivalent CO<sub>2</sub> en 2013. Toutefois, les efforts de réduction doivent être maintenus voire intensifiés pour atteindre les objectifs aux horizons 2030 et 2050 (respectivement 330 Mt éq CO<sub>2</sub> et 140 Mt éq CO<sub>2</sub> en 2050) puisqu'une légère hausse (0,2 %) a été constatée entre 2012 et 2013 avec 492 Mt éq CO<sub>2</sub> émises. La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), publiée fin 2015, devrait contribuer à l'atteinte de ces objectifs à l'échelle de la France et dans diverses activités liées aux secteurs du transport, de l'agriculture, du bâtiment, de l'industrie ou de la production d'énergie. Parmi les mesures déjà mises en avant par cette stratégie, on peut citer l'augmentation de la part carbone dans les taxes intérieures, la prise en compte de l'impact carbone dans les choix d'investissements publics ou financés par les investisseurs institutionnels, ou encore le conditionnement des avantages fiscaux à la prise en compte des qualités environnementales (ADEME, 2015).

## **I.4. Contexte actuel du secteur du bâtiment Français**

### *1.4.1. Consommation d'énergie et émissions des polluants*

Les études récentes (SOeS, 2015) ont montré que les bâtiments (résidentiels et tertiaires) consomment presque 45% de l'énergie totale produite en France (Figure I.2) pour répondre aux exigences des occupants. De même, le secteur de construction se classe deuxième devant celui du transport, étant responsable de presque du quart des émissions de gaz carbonique CO<sub>2</sub> (bâtiments résidentiels et tertiaires additionnés) comme le montre les diagrammes de la Figure I.3 (CITEPA, 2015).

Rapportées au m<sup>2</sup>, les consommations des logements les plus anciens se situent près de 50 % au-dessus de celles des logements récents : plus de 200 kWh.m<sup>-2</sup> pour les logements antérieurs à 1970 et 140 kWh.m<sup>-2</sup> pour les logements construits depuis 2006. Selon les diagnostics de performance énergétique (DPE) délivrés pour les logements construits en 2013, 86 % des résidences principales neuves consomment donc moins de 91 kWh.m<sup>-2</sup>. Toutefois, pour le secteur tertiaire, une consommation d'énergie globalement en hausse malgré l'amélioration des performances globales est constatée. Les activités commerciales et les

bureaux représentent à eux seuls près de la moitié de la consommation d'énergie du secteur (ADEME, 2015).

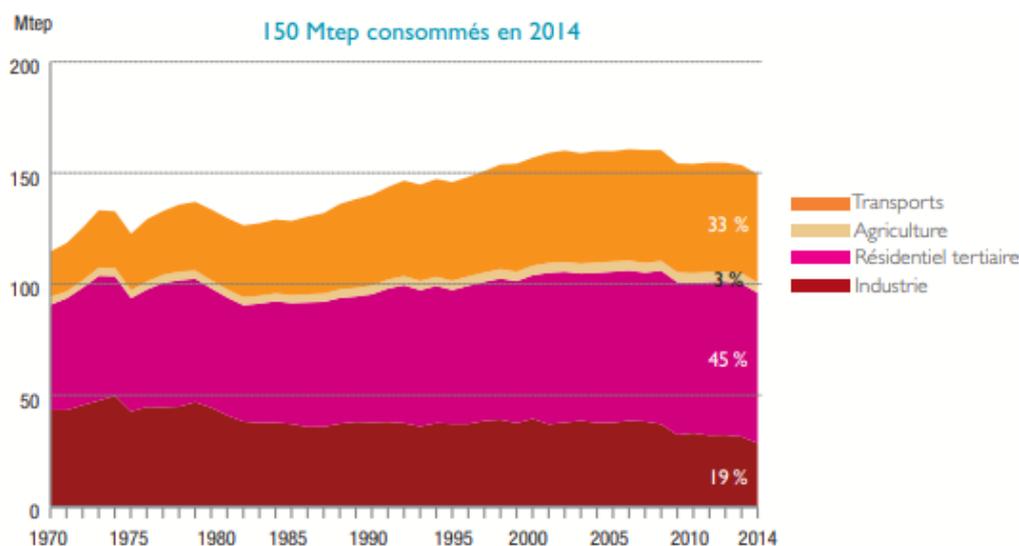


Figure I.2 : Evolution de la consommation d'énergie par secteur en fonction des années (SOeS, 2015)

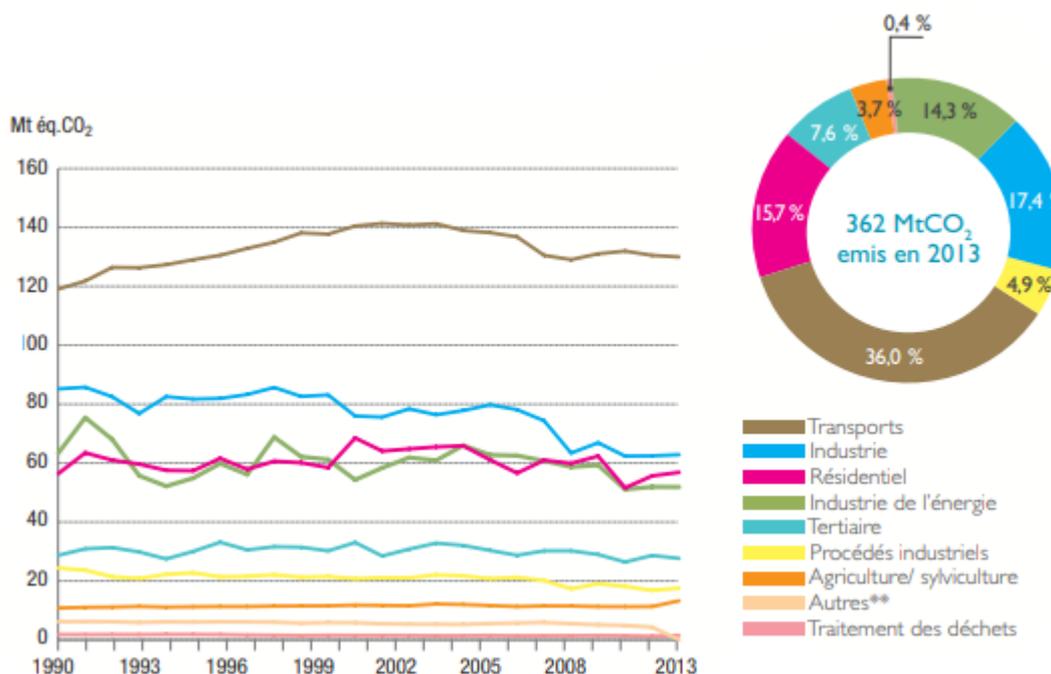


Figure I.3 : Evolution des émissions de dioxyde de carbone par secteur en fonction des années (CITEPA, 2015)

D'ailleurs, le secteur du bâtiment a connu une forte hausse de ses émissions entre 1960 et 2013. L'année 2013 est quasiment au même niveau d'émissions qu'en 1990 (84 Mt). L'année 2011 représente le niveau le plus bas observé (78 Mt) du fait de la douceur du climat français cette année-là. Actuellement, pour un bâtiment neuf, 1 m<sup>2</sup> construit génère environ 1,5 tonne de CO<sub>2</sub> émis (Lebert et al., 2013). De ce fait, les bâtiments constituent un gisement important

d'économies d'énergie, et donc de réduction de gaz à effet de serre, ce qui a donné à ce secteur une place primordiale dans les nouvelles réglementations et directives.

#### *1.4.2. Réglementations et directives nationales dans le secteur du bâtiment*

Les efforts globaux à l'échelle du bâtiment sont en plein essor depuis la dernière décennie. La loi Grenelle 1 de l'Environnement (2010) a fixé comme objectif principal de diminuer d'au moins 38 % la consommation des bâtiments et de réduire de moitié les émissions de CO<sub>2</sub> dans le parc résidentiel entre 2007 et 2020.

Les objectifs fixés par le Paquet Climat-Energie (2008) à l'horizon 2020 et qui se résument par la directive des «3×20», ont par ailleurs été complétés par divers outils et réflexions stratégiques à l'échelle nationale sur le besoin d'adaptation au changement climatique.

La Réglementation Thermique 2012 (RT, 2012), applicable depuis le 28 octobre 2011 aux bâtiments neufs à usage de bureaux et d'enseignement, a été étendue aux autres bâtiments du secteur au-delà du 1<sup>er</sup> janvier 2013. Les bâtiments neufs doivent donc répondre aux critères des Bâtiments Basse Consommation (BBC), qui doivent consommer en moyenne moins de 50 kWh.m<sup>-2</sup> d'énergie primaire par an sur les cinq usages réglementaires (chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, éclairage et auxiliaires électriques de ventilation et pompes).

L'adoption de la Loi Transition Énergétique pour la Croissance Verte en Août 2015 (LTECV, 2015) a par ailleurs imposé à l'ensemble du parc immobilier, à l'horizon 2050, de répondre aux normes «bâtiments basse consommation» et a fixé comme objectif la rénovation énergétique de 500 000 logements par an à compter de 2017, visant ainsi une baisse de 15 % de la précarité énergétique au bout de 2020.

En parallèle, afin d'atteindre ses objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre aux horizons 2030 et 2050, la France a élaboré la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) en indiquant, par secteur et par palier jusqu'en 2028, des plafonds d'émissions de gaz à effet de serre au niveau national. C'est ainsi que le label «BBCA» (Bâtiments Bas Carbone) a vu le jour en 2015, est entré en vigueur en mars 2016 pour le logement collectif et les bureaux, et s'est lancé à la conquête du «Quartier Bas Carbone» en février 2017 (BBCA, 2018). L'objectif premier de ce nouveau référentiel est de proposer une méthodologie d'évaluation de l'empreinte du carbone pour les bâtiments existants. Il s'agit aussi d'encourager les démarches «bas carbone», de diviser par deux les émissions de CO<sub>2</sub> et de mettre en lumière, grâce aux opérations pilotes, les pratiques exemplaires.

Dans le même ordre d'idées, ces nouvelles transitions énergétiques sont accompagnées d'une nouvelle réglementation thermique d'ici 2020, la RBR 2020 (RBR 2020-2050, 2015), imposant une réflexion sur le bâtiment responsable et durable et dans laquelle les bâtiments neufs devront respecter les exigences du label «BEPOS» (Bâtiment à Energie Positive). Ceci se traduit par une consommation d'énergie primaire inférieure à la quantité d'énergie renouvelable produite pour aboutir ainsi à la notion de «bâtiments autosuffisants». En d'autres termes, la différence autorisée, exprimée en énergie primaire, entre la quantité d'énergie ni

renouvelable ni de récupération consommée par le bâtiment et la quantité d'énergie renouvelable ou de récupération produite et exportée par le bâtiment et ses espaces attenants, doit être négative ou inférieure à une valeur seuil comme montré sur la Figure I.4.

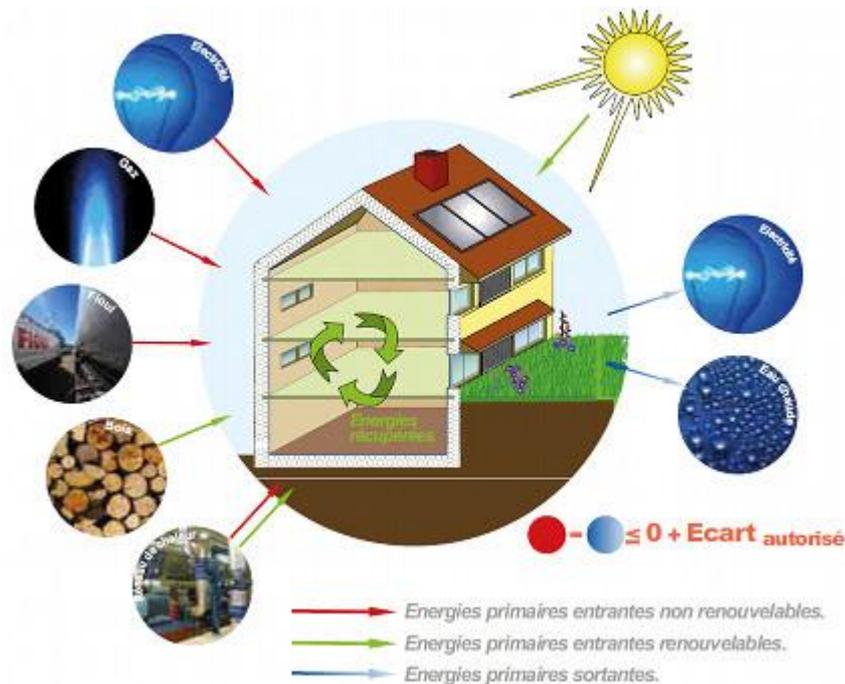


Figure I.4 : Schématisation d'un bâtiment à énergie positive (RBR 2020-2050, 2015)

En outre, cette nouvelle réglementation environnementale renforcera les directives actuellement en vigueur par deux indicateurs : ENERGIE et CARBONE sous le label E+C- (TCHANG Nathalie, 2016). Les niveaux de performances du bâtiment neuf sont caractérisés par :

- Un critère d'énergie basé sur l'indicateur Bilan<sub>BEPOS</sub>
- Un critère de carbone basé sur l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre

Ainsi, quatre niveaux de performance énergétique (Énergie 1, Énergie 2, Énergie 3, et Énergie 4) et deux niveaux de performance environnementale relatifs aux émissions de gaz à effet de serre (Carbone 1 et Carbone 2) sont créés. Les premiers niveaux, « Énergie 1 », « Énergie 2 » constituent une avancée par rapport aux exigences actuelles de la réglementation thermique RT 2012. Leur mise en œuvre doit conduire à une amélioration des performances du bâtiment à coût maîtrisé, soit par des mesures d'efficacité énergétique, soit par le recours, pour les besoins du bâtiment, à des énergies renouvelables (notamment la chaleur renouvelable). Le niveau « Énergie 3 » constitue un effort supplémentaire par rapport aux précédents niveaux. Son atteinte nécessitera un effort en terme d'efficacité énergétique du bâti et des systèmes et un recours significatif aux énergies renouvelables, qu'il s'agisse de chaleur ou d'électricité renouvelable. Enfin, le dernier niveau « Énergie 4 » correspond à un bâtiment avec bilan énergétique nul (ou négatif) sur tous les usages et qui contribue à la production d'énergie renouvelable à l'échelle du quartier.

Pour le critère environnemental, le niveau « Carbone 1 » se veut accessible à tous les modes constructifs et vecteurs énergétiques ainsi qu'aux opérations qui font l'objet de multiples contraintes (zone sismique, nature du sol...) ; il vise à embarquer l'ensemble des acteurs du bâtiment dans la démarche d'évaluation des impacts du bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie et de leur réduction. Le niveau « Carbone 2 » vise à valoriser les opérations les plus performantes ; il nécessite un travail renforcé de réduction de l'empreinte carbone des matériaux et équipements mis en œuvre, ainsi que celui des consommations énergétiques du bâtiment. Un schéma qui résume la procédure adoptée est montré sur la Figure I.5.

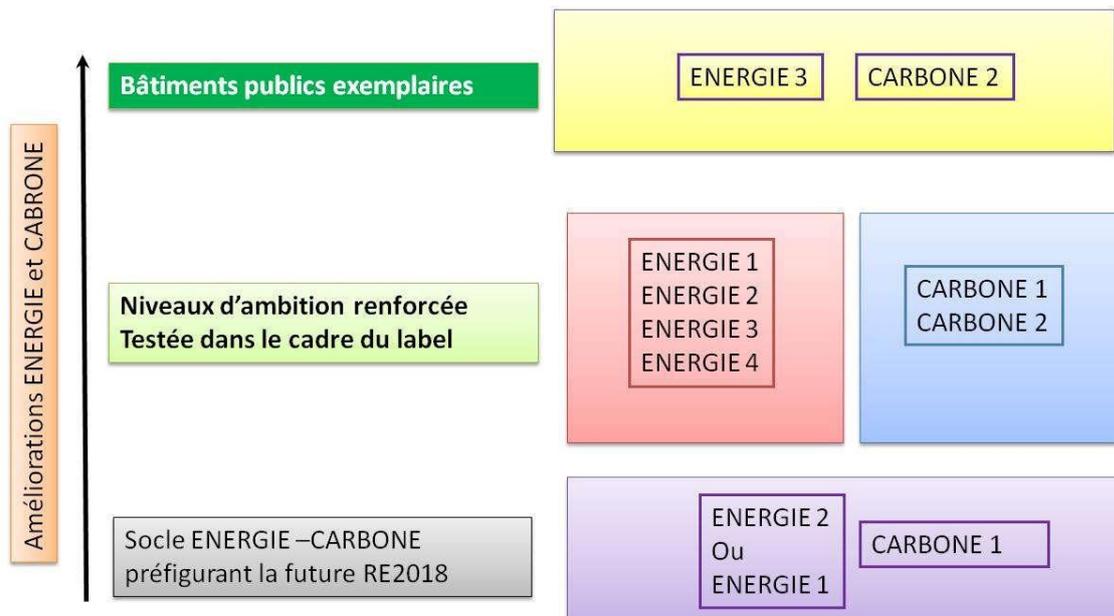


Figure I.5 : Amélioration Energie et Carbone dans le secteur du bâtiment selon le label E+C- (TCHANG Nathalie, 2016)

#### 1.4.3. Tendances vers les matériaux bio-sourcés

Depuis un siècle, l'extraction des matériaux de construction a été multipliée par 34 alors que celle des énergies fossiles a été multipliée par 12 (Architectures CREE, 2015). Ainsi, le béton est la deuxième matière la plus consommée au monde après l'eau. Le sable, constituant du béton, est la deuxième matière première minérale extraite avec une pénurie annoncée au même titre que celle des énergies fossiles et des impacts environnementaux et socio-économiques nombreux. Il est donc devenu primordial de s'interroger sur les matériaux de construction conventionnels actuels et penser à ceux de demain, surtout dans le secteur de construction. A cet égard, comme il est confirmé dans la majorité des directives nationales, le recours à des sources d'énergie renouvelables dans le secteur du bâtiment est un pilier principal sur lequel se basent les objectifs actuels visant à aboutir au bâtiment durable qui respecte l'environnement. Par conséquent, cette prise en compte des mesures d'efficacité énergétique dans les logements neufs et rénovés entraînera une demande plus élevée d'isolation thermique. Cette dernière est fondamentale pour améliorer le confort du logement en réduisant les déperditions thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment. D'où la mobilité de plusieurs pays

à mettre en place des politiques pour encourager le déploiement d'une économie bio-sourcée basée sur l'extraction et la valorisation de la biomasse.

En France, force est de constater que l'intégration des matériaux bio-sourcés dans la construction ne constitue pas, à ce jour, une obligation à laquelle sont soumis les constructeurs, qu'ils soient privés ou publics. Cependant, le label « Bâtiment bio-sourcé 1 » a été mis en place, en 2012 (Arrêté du 19 Décembre 2017, 2017), par les pouvoirs publics afin de valoriser l'utilisation des matériaux et produits de construction bio-sourcés. De même, à l'issue de la loi sur la transition énergétique d'août 2015 (LOI n° 2015-992, 2015), des obligations relatives au respect des hautes performances environnementales et du label « BEPOS » sont précisées dans le décret du 21 Décembre 2016 (Décret n° 2016-1821, 2016) et de l'arrêté du 10 avril 2017 (Arrêté du 10 avril 2017, 2017) respectivement.

L'utilisation de matériaux bio-sourcés constitue une solution plausible et intéressante de nos jours et concourt significativement au stockage de carbone atmosphérique et à la préservation des ressources naturelles : étant renouvelables, ils limitent l'utilisation de ressources d'origines fossiles et étant des puits de carbone, ils permettent de stocker le dioxyde de carbone. De plus, selon la Fédération Française du Bâtiment, certains matériaux bio-sourcés sont disponibles en quantité abondantes sur le territoire français pour le secteur du bâtiment, à savoir, entre autres :

- la paille : si 5 % de la paille qui retourne au sol est utilisée, il sera possible d'isoler 500 000 logements par an
- le chanvre : la France est le premier producteur en Europe, avec une surface cultivée annuelle de 8 000 à 10 000 hectares
- le textile recyclé : 600 000 tonnes de déchets de textiles sont produits chaque année par les ménages et autant par les entreprises, et la production actuelle d'isolant à base de textile est d'environ 3 000 tonnes par an.

## **I.5. Le béton de chanvre**

### *I.5.1. Les atouts du chanvre*

L'utilisation du chanvre est considérée comme un atout sur plusieurs plans :

- 1) Un atout écologique : c'est une plante qui est non seulement renouvelable et recyclable, mais possède un système racinaire permettant de structurer le sol. En plus, 1 hectare de chanvre absorbe autant de CO<sub>2</sub> qu'un hectare de forêt. Aussi, 1 m<sup>2</sup> de mur construit en béton de chanvre emmagasine 48 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> sur 100 ans.
- 2) Un atout agronomique comme le chanvre supporte la sécheresse et ne nécessite pas des travaux de culture et d'irrigation.
- 3) Un atout économique étant donné que les producteurs sont à proximité des industries de transformation ce qui réduit les prix de transportation et de fabrication.

La France est leader européen de production en chanvre (Figure I.6) avec 8 000 à 10 000 hectares mis en culture chaque année, soit 0,03% de la surface agricole utile française (Carus,

2017). De plus, la région Champagne-Ardenne présente le taux de production le plus élevé en France (Figure I.7), dépassant 50% du pourcentage de la production nationale (DREAL, 2015).

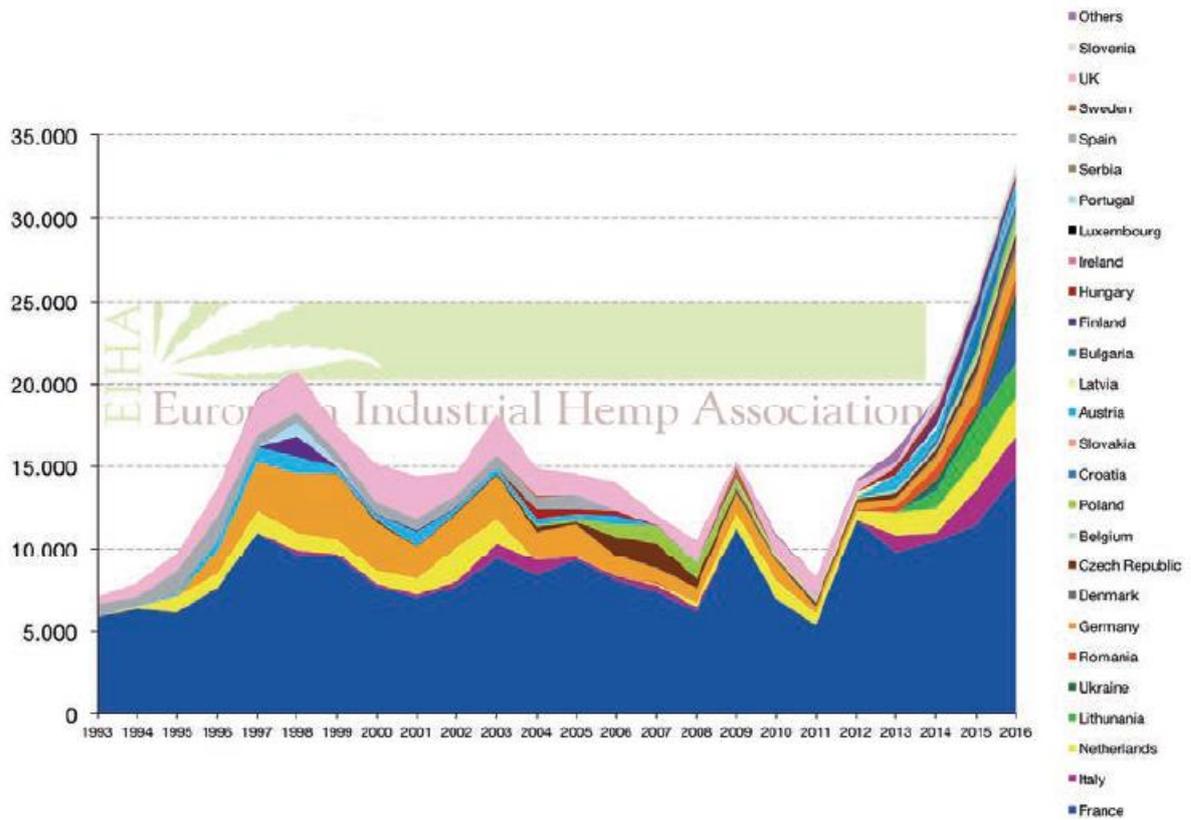


Figure I.6 : Evolution de la culture de chanvre en Europe entre 1993 et 2016 (Carus, 2017)

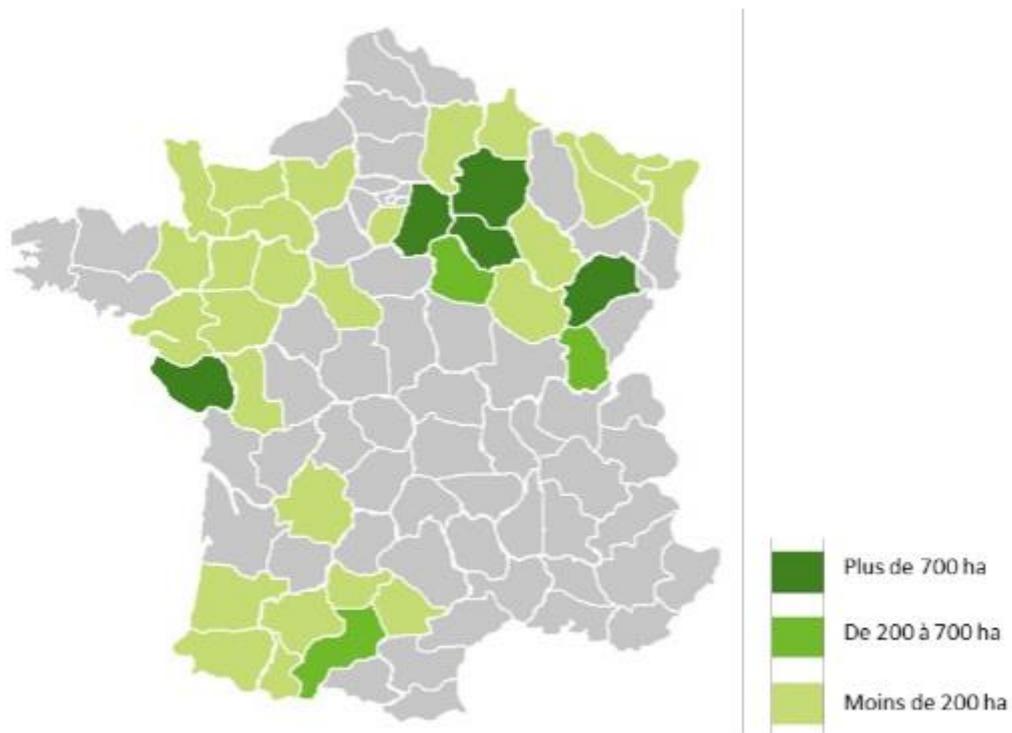


Figure I.7 : Répartition de la production du chanvre français (DREAL, 2015)

### 1.5.2. Le béton de chanvre et ses applications

Le béton de chanvre est un matériau de construction développé en France depuis le début des années 90. Il fait partie de la famille des bétons de bois obtenu en mélangeant la chènevotte, qui est la partie intérieure broyée de la plante de chanvre, un liant à base minérale, de l'eau et d'éventuels adjuvants lui conférant son caractère alcalin et résistant au feu. Il sert principalement de matériau de remplissage de mur à ossature (bois, poutre métallique, béton armé), ou sous forme d'enduit (intérieur/extérieur). Il est formulé sur la base d'un mélange liant minéral/chaux dont les proportions varient selon les types d'usage : murs, enduits, toitures, dalle... La formulation « toit » contient par exemple une forte proportion de chènevotte, tandis que celles « mur » et « dalle » présentent une quantité de liant plus importante. Dans la formulation « enduit », la chènevotte est noyée dans la matrice de liant. Des dosages correspondant à ces formulations sont proposés à titre d'exemple dans la Figure I.8 (Evrard, 2008) et le Tableau I.1 ci-après pour un liant Tradical PF 70 et une chènevotte « Chanvribat ». Les modalités d'application sont régies depuis 2007 par des règles professionnelles de mise en œuvre, qui facilitent et encadrent l'assurabilité de ces constructions (RP2C, 2007).

Formulation (Pour 1 m <sup>3</sup> )	Chènevotte (kg)	Liant (kg)	Sable (kg)	Eau (kg)
Toit	130	110	-	225
Mur	130	220	-	350
Sol (Dalle)	130	275	-	500
Enduit	130	485	160	650

Tableau I.1 : Exemples de dosages du béton de chanvre selon les applications

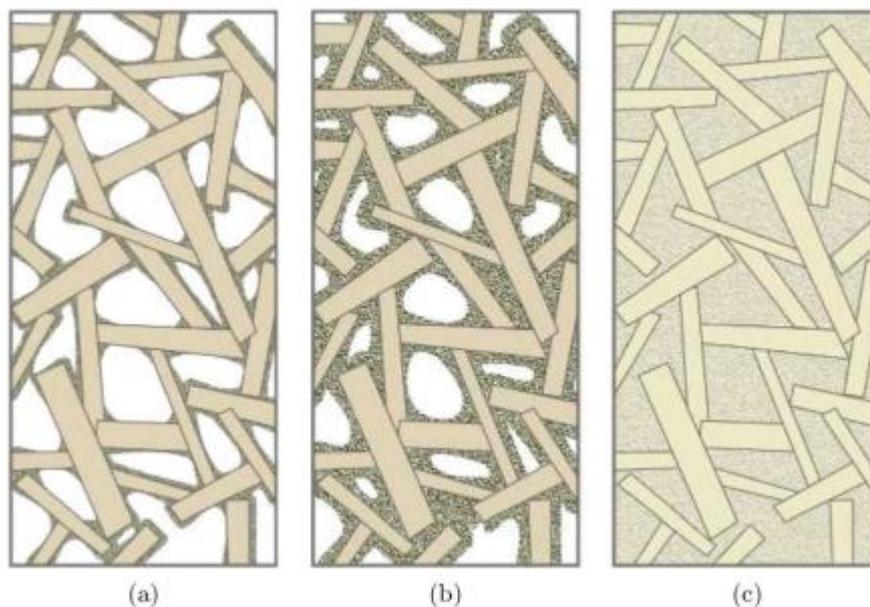


Figure I.8 : Représentation schématique des formulations « Toit » (a), « Mur » (b) et « Enduit » (c) (Evrard, 2008)

Les bétons bio-sourcés utilisent 10% de la production de granulat de chanvre (chènevotte) pour une production annuelle estimée à 40 000 tonnes de bétons (FRD, 2016). Une procédure de fabrication du béton de chanvre pour application « Mur » est montrée dans le schéma suivant de la Figure I.9 (Mémento, 2016).

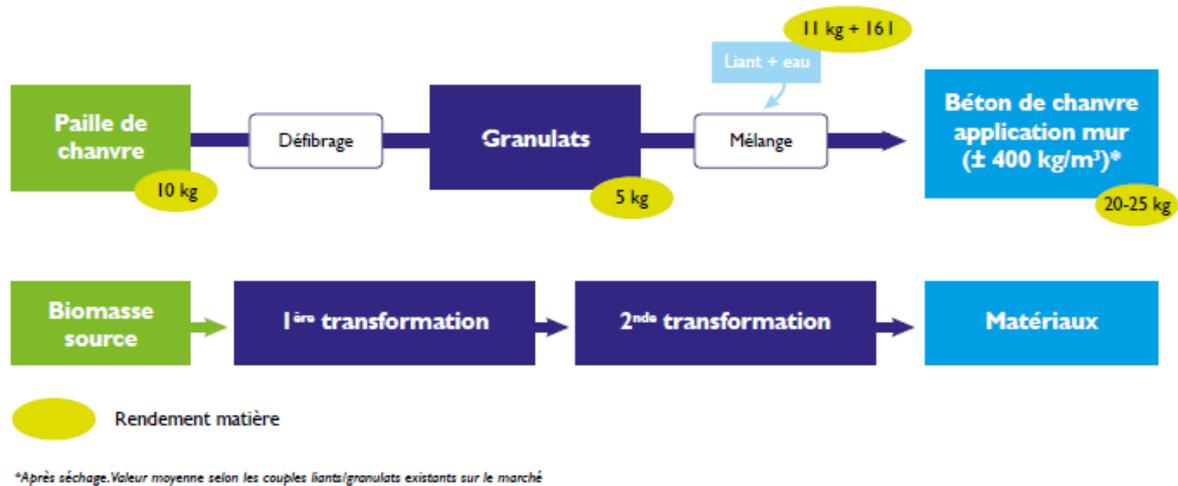


Figure I.9 : Etapes et rendement des procédés de formulation du béton de chanvre pour une mise en œuvre « mur » (Mémento, 2016)

### I.5.3. L'importance du béton de chanvre du point de vue environnemental

L'analyse du cycle de vie d'un mur en béton de chanvre banché sur ossature bois a montré que le béton de chanvre (Tradical, 2017) a d'excellentes performances environnementales (Figure I.10) et sur des aspects aussi importants que l'épuisement des ressources naturelles, la pollution de l'eau ou la pollution de l'air. En effet, 1 m<sup>2</sup> de mur de 26 cm d'épaisseur de béton de chanvre avec ossature bois stocke 75 kg de CO<sub>2</sub> et un autre de 1 m<sup>2</sup> et de 35 cm d'épaisseur stocke 100 kg de CO<sub>2</sub>.

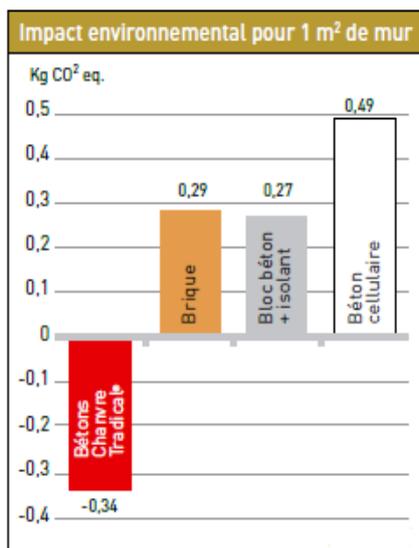


Figure I.10 : Impact environnemental des matériaux de construction (Tradical, 2017)

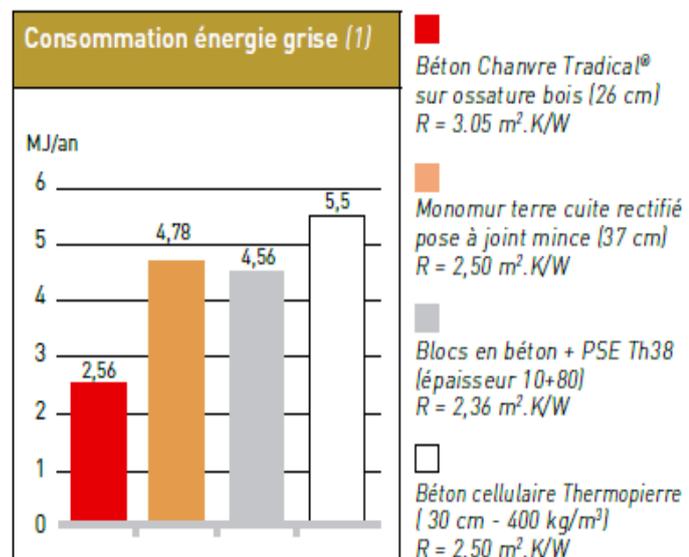


Figure I.11 : Energie grise consommée par certains matériaux de construction (Tradical, 2017)

Conformément à la NF 10.010 (Norme NF P 01-010, 2011), l'impact "Effet de Serre" du Béton Chanvre Tradical® est de -0,34 kg CO<sub>2</sub> eq./UF/an alors que la majorité des matériaux usuels émettent au-delà de +0,25 kg CO<sub>2</sub> eq./UF/ an. D'ailleurs, comparés à d'autres matériaux usuels ayant des résistances thermiques similaires, les besoins en énergie grise pour la fabrication de 1 m<sup>2</sup> de mur en Béton Chanvre Tradical® sont faibles (Figure I.11).

## **I.6. Les échelles d'étude du béton de chanvre**

Pour chaque famille de matériaux de construction, des études à plusieurs échelles sont réalisées. On distingue, entre autres, l'échelle du matériau, celle du composant ou bien de la paroi, celle du local conduisant à l'étude à l'échelle du bâtiment.

### *I.6.1. Echelle du matériau*

C'est au niveau de cette échelle qu'a lieu la caractérisation du matériau et la détermination de ses propriétés physiques. Les propriétés du béton de chanvre sont largement documentées dans la littérature. Il s'agit d'un matériau à porosité très élevée, et essentiellement « ouverte » qui dépasse 70% en volume pour une formulation de type « Mur » (Collet, 2004 ; Evrard et al., 2005) avec plusieurs tailles caractéristiques de pores (Samri, 2008):

- Des macropores (d'environ 1 cm de diamètre) dus à l'agencement imparfait des diverses particules de chanvre dans le mélange
- Des mésopores (de 0,1 mm à 1 mm) au sein des particules et du liant
- Les micropores interhydrates (inférieurs à 0,01µm) dans la matrice du liant

La principale caractéristique du béton de chanvre est sa légèreté présentant une masse volumique apparente sèche de l'ordre de 400 kg.m<sup>-3</sup>, nettement inférieure à celle d'un béton classique, généralement comprise entre 2000 et 2600 kg.m<sup>-3</sup>. Pour les bétons de chanvre projetés, la densité apparente varie de 260 kg.m<sup>-3</sup> pour la formulation « toiture » à 460 kg.m<sup>-3</sup> pour la formulation « sol » ou « dalle ». Pour les murs, elle varie de 390 kg.m<sup>-3</sup> pour les murs légers à 460 kg.m<sup>-3</sup> pour les murs moyens et lourds. Le béton de chanvre moulé présente une densité apparente de 381 kg.m<sup>-3</sup> tandis que le béton préfabriqué présente une densité apparente entre 320 et 420 kg.m<sup>-3</sup> (Amziane and Arnaud, 2013). Ainsi, étant léger et fortement poreux, il a des propriétés mécaniques faibles ne lui permettant pas d'être un matériau porteur, mais de remplissage d'une structure associée à une ossature (Elfordy et al., 2008).

Au niveau thermique, sa conductivité thermique est fonction de plusieurs paramètres essentiels :

- Mode de fabrication de l'échantillon (force de compactage, orientation des particules de chanvre dans le mélange)
- Masse volumique du matériau (nature et dosage des matières premières)
- Teneur en eau du matériau

Différentes études expérimentales menées pour caractériser sa conductivité thermique ont montré des valeurs comprises entre 0,06 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> et 0,21 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> (Hustache, 2008 ; Walker and Pavía, 2014; Dhakal et al., 2017) : Collet and Pretot (2014b) proposent des

corrélations de la conductivité thermique du béton de chanvre en fonction de la masse volumique du matériau et de sa teneur en eau (Figure I.12). Lelievre et al. (2014) mettent en relation une conductivité variable du béton de chanvre en fonction de la température de la paroi et de l'humidité relative absolue qu'elle contient. De plus, des essais réalisés à l'ENTPE (Cerezo, 2005) montrent l'impact de l'hygrométrie sur la conductivité thermique du béton de chanvre étant donné que les phénomènes de changements de phase qui ont lieu dans le matériau suite aux modifications des conditions environnementales modifient sensiblement sa conductivité thermique (Figure I.13).

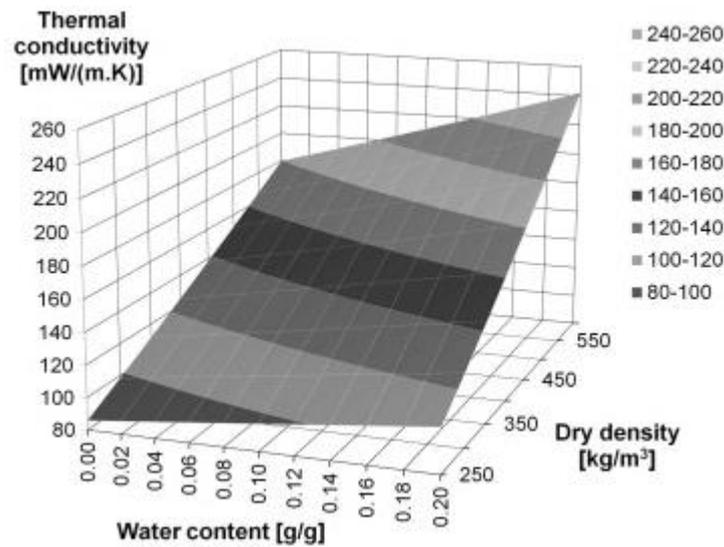


Figure I.12 : Variation de la conductivité thermique du béton de chanvre en fonction de la densité et la teneur en eau du matériau (Collet and Pretot, 2014b)

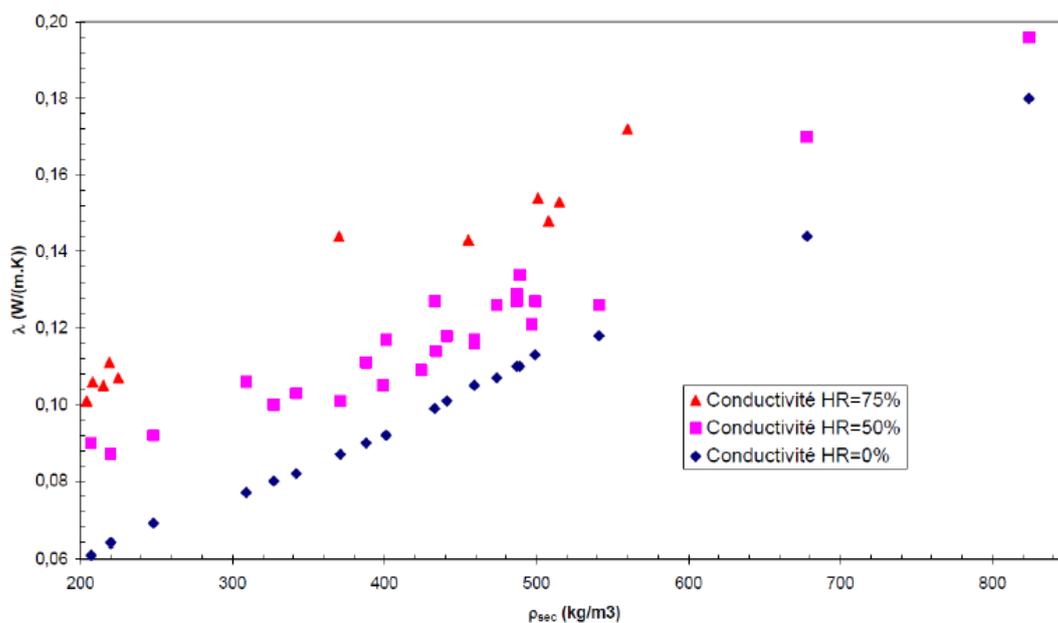


Figure I.13 : Impact de l'hygrométrie sur la conductivité thermique du béton de chanvre (Cerezo, 2005)

D'ailleurs, Bennai et al., (2017) ont prouvé la variation des propriétés thermiques du béton de chanvre, inclue la conductivité thermique, en fonction de son vieillissement. Ceci est dû à la dépendance entre ses propriétés et la microstructure du matériau qui évolue fortement avec son âge (Figure I.14).

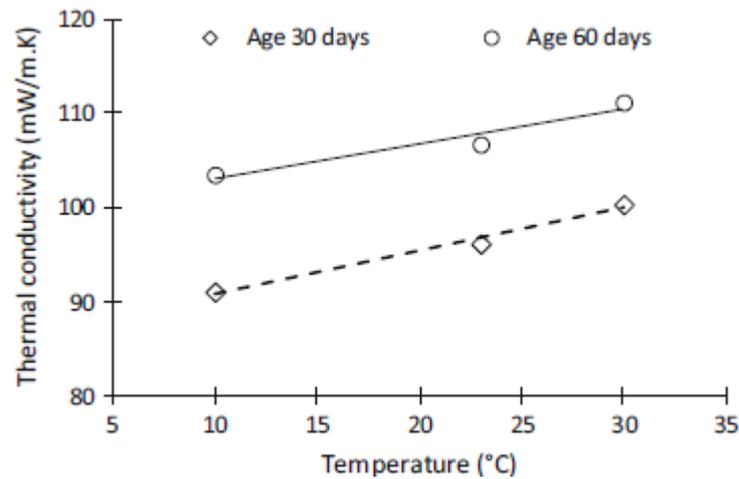


Figure I.14 : Variation de la conductivité thermique du béton de chanvre avec son vieillissement (Bennai et al., 2017)

Au niveau hydrique, la capacité tampon hydrique du béton de chanvre est mesurée selon le protocole Nordtest détaillé dans (Rode and Grau, 2008). La capacité tampon hydrique MBV caractérise la capacité du matériau à modérer les variations d'hygrométrie de l'air avoisinant. Elle est donnée par :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A(HR_{haute} - HR_{basse})} \quad (I.1)$$

$\Delta m$  est la variation de la masse en grammes g durant la phase d'adsorption ou désorption, A la surface d'échange en  $m^2$  et  $HR_{haute/basse}$  les humidités relatives haute et basse en % au cours du cycle. Dans leurs travaux, Collet and Prétot (2012) ont montré que le béton de chanvre est classé comme un excellent régulateur d'humidité avec une capacité tampon hydrique de l'ordre de  $2 \text{ g}/(m^2.\%HR)$  et pouvant atteindre  $2,51 \text{ g}/(m^2.\%HR)$ , selon la composition du liant utilisé lors du mélange. Dans le même ordre des idées, il a été prouvé que cette capacité tampon hydrique se trouve plus ou moins réduite selon le type d'enduit mis en œuvre à la surface du matériau pour atteindre une valeur de  $1 \text{ g}/(m^2.\%HR)$  avec un enduit non perméable de type sable-chaux et une valeur de  $1,79 \text{ g}/(m^2.\%HR)$  avec un enduit perméable de type chanvre-chaux (Collet et al., 2013).

#### I.6.2. Echelle de la composante ou de la paroi

L'échelle de la paroi représente le deuxième niveau de recherche sur l'hygrométrie des matériaux bio-sourcés. Les composants étudiés sont soit des parois simples sans revêtement, soit des parois multi-couches constituées d'un assemblage de plusieurs matériaux. La plupart des études menées afin de caractériser le comportement hygrothermique des bétons végétaux

sont réalisés en faisant appel à des enceintes climatiques programmées comme montré sur la Figure I.15.

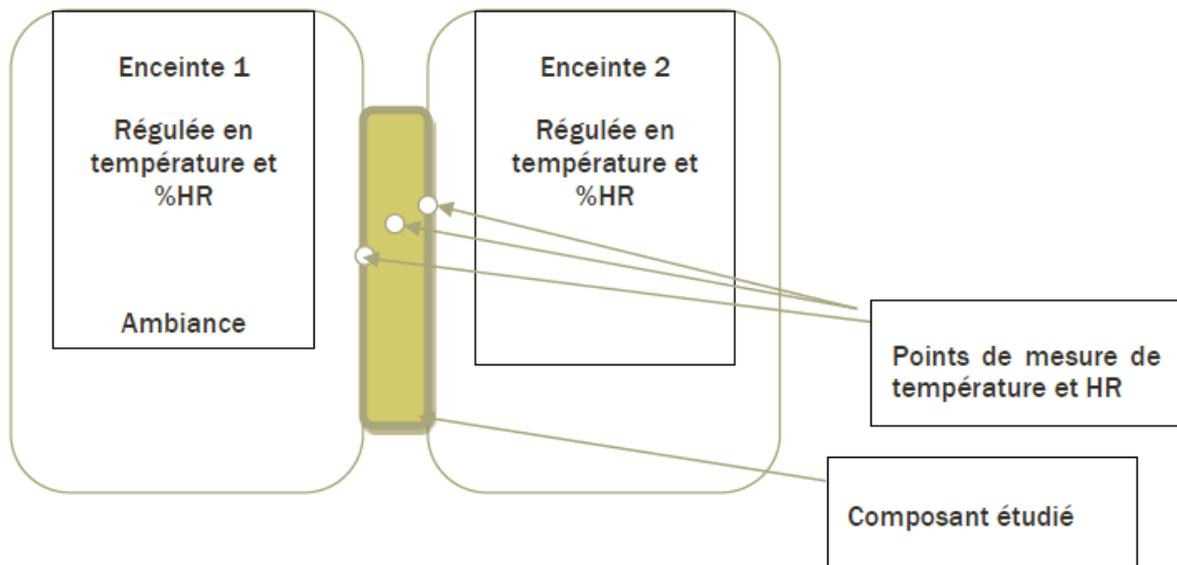


Figure I.15 : Représentation schématique du dispositif expérimental représentant les enceintes climatiques

Le béton de chanvre est le composant étudié dans ce cas. Le principe consiste à positionner la paroi considérée entre deux enceintes climatiques pilotées en température et humidité relative afin de créer les conditions de l'expérience. Ensuite, à l'aide de capteurs plantés sur les surfaces intérieures et extérieures et au sein de la paroi, les températures et humidités relatives à différentes positions sont mesurées. Dans plusieurs cas, ces relevés sont ensuite utilisés pour valider les résultats de la simulation numérique établie à l'échelle de la paroi en se servant de différents logiciels et modèles de transfert de température et d'humidité. Nombreuses sont les études élaborées sur le comportement hygrothermique du béton de chanvre à l'échelle de la paroi. Les unes sont expérimentales réalisées sur de vraies parois conçues en béton de chanvre. D'autres sont numériques consacrées à prédire ce même comportement via la modélisation numérique. Différents aspects sont abordés comme suit.

#### I.6.2.1. Mise en évidence des transports couplés de chaleur et de masse dans les parois en béton de chanvre

Samri (2008) a étudié expérimentalement l'influence des flux d'humidité au sein du béton de chanvre sur les transferts d'énergie qui ont lieu. Pour illustrer ce phénomène, il a comparé expérimentalement le comportement d'un mur de 30 cm de béton de chanvre à deux parois de même épaisseur constituées respectivement de béton cellulaire autoclavé et de brique de terre cuite, assujetties du côté extérieur à des sollicitations de type créneau. Il a constaté que la teneur en eau dans le béton de chanvre varie plus fortement que celle des deux autres matériaux. Ceci s'explique par l'apparition de phénomènes internes de changements de phase : lorsque la température extérieure augmente brusquement, de l'eau liquide se vaporise au sein du matériau se traduisant par une élévation de l'humidité relative et un amortissement de la hausse de température compte tenu du caractère endothermique de la vaporisation. De la même

manière, quand la température imposée sur la paroi extérieure diminue brusquement, des phénomènes exothermiques d'adsorption se produisent. Ces mêmes phénomènes sont constatés par Collet et al. (2011) : en effet, lors d'une variation de température de 15°C à 28°C de l'ambiance extérieure, une inversion du flux de chaleur au sein du mur est observée ainsi qu'un pic de pression de vapeur traduisant le phénomène d'évaporation-condensation de l'eau absorbée apparaît.

Evrard and De Herde (2010) se sont intéressés, par la simulation numérique avec le logiciel WUFI, aux réponses hygrothermiques de différents systèmes de murs notés de A à G (Tableau I.2) et soumis à des variations brusques de température extérieure. Les murs A à F possèdent le même coefficient de transmission thermique  $U = 0,44 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , le mur G a la même épaisseur que B avec  $U = 0,14 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . La comparaison des performances s'établit en calculant plusieurs grandeurs caractéristiques définies comme suit :

- $t_{s-s}$  : c'est le temps nécessaire pour atteindre 95% du flux thermique à l'état stationnaire (en heure)
- $Q_{24}$  : c'est le rapport de l'énergie effectivement transférée pendant 24 heures. Il est défini comme étant l'effort à appliquer pour maintenir constante la température intérieure lors d'un changement brusque de température extérieure
- $ph_{th}$  : correspond au déphasage thermique (en heure) décrivant le temps nécessaire pour atteindre les valeurs maximales à la surface intérieure en considérant les mêmes extrêmes du côté extérieur
- $dmp_{th}$  : correspond à l'amortissement thermique en (%) lié à la différence d'amplitude de température entre les surfaces intérieure et extérieure.

Systemes de mur	Matériaux
A	Béton de chanvre avec enduits intérieur et extérieur
B	Béton de chanvre avec enduit intérieur et bardage extérieur
C	Béton cellulaire
D	Parpaings, briques d'argile et polystyrène extrudé
E	Briques d'argile et polystyrène du côté extérieur
F	Briques d'argile et polystyrène du côté intérieur
G	Laine minérale

Tableau I.2 : Systemes de murs étudiés (Evrard and De Herde, 2010)

Les résultats sont groupés dans le Tableau I.3 :

Systèmes de mur	A	B	C	D	E	F	G
$t_{s-s}$	68	64	33	74	118	77	15
$Q_{24}$	17	19	46	21	13	23	75
$ph_{th}$	15	14	9	12	12	11	5
$dmp_{th}$	92	91	72	91	95	90	38

Tableau I.3 : Comparaison des grandeurs caractéristiques pour les systèmes de murs étudiés (Evrard and De Herde, 2010)

Sachant que le matériau thermiquement « idéal » serait celui ayant  $t_{s-s}$ ,  $ph_{th}$ , et  $dmp_{th}$  les plus élevés et  $Q_{24}$  le plus faible, les murs A et B en béton de chanvre présentent ainsi le meilleur comportement entre les six murs présentés. Ce qui prouve le rôle d’amortisseur thermique du béton de chanvre.

Maalouf et al. (2011) ont prouvé numériquement les effets du transport d’humidité sur l’inertie thermique d’une paroi simple de 20 cm (Figure I.16) soumise à des conditions de température et d’humidité constantes du côté intérieur (24°C et 50% respectivement) et sinusoïdales du côté extérieur (Figure I.17). SPARK (Sowell and Haves, 2001) est l’environnement de simulation utilisé dans l’étude.

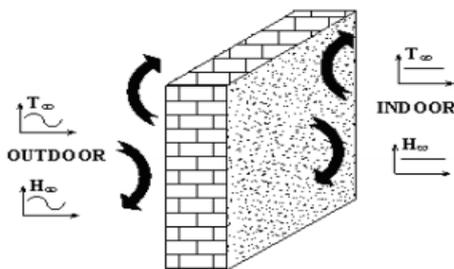


Figure I.16 : Modèle Physique de la paroi simple

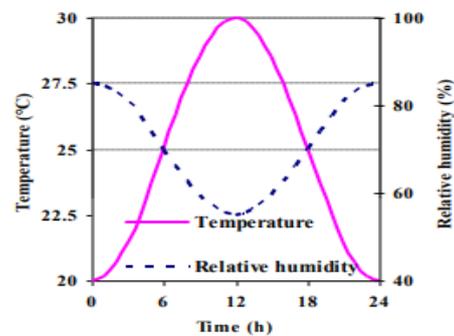


Figure I.17 : Conditions extérieures de simulation

Trois types de paroi simple sont testés : le béton classique, la brique et le béton de chanvre. Les simulations ont montré que la température de surface intérieure est la plus basse pour le cas du béton de chanvre avec un temps de déphasage entre les températures extérieures et intérieures le plus grand (7 heures). D’autre part, les résultats pour le béton de chanvre dépendent fortement des transferts d’humidité dans le matériau.

Rahim et al. (2017) ont comparé expérimentalement les comportements hygrothermiques de deux enveloppes bio-sourcées : l’une en béton de chanvre, et l’autre en béton à base de paille (béton de colza) sous des conditions statiques et dynamiques. Les murs étudiés sont de dimensions réelles (Figure I.18). Le côté extérieur du mur d’essai est soumis à diverses conditions extérieures de température et d’humidité relative en utilisant une chambre climatique, tandis que l’autre côté est en contact avec l’ambiance du laboratoire (la température

et l'humidité relative sont relativement constantes) (Figure I.19). Les résultats montrent que les phénomènes de changement de phase intervenant dans la paroi influencent les variations de température et d'humidité relative. Les phénomènes d'évaporation et de condensation peuvent se produire simultanément dans la paroi et, par conséquent, les phénomènes de changement de phase peuvent réduire la variation de température dans le mur. Malgré leur faible capacité calorifique spécifique, ces matériaux présentent une inertie thermique non négligeable.

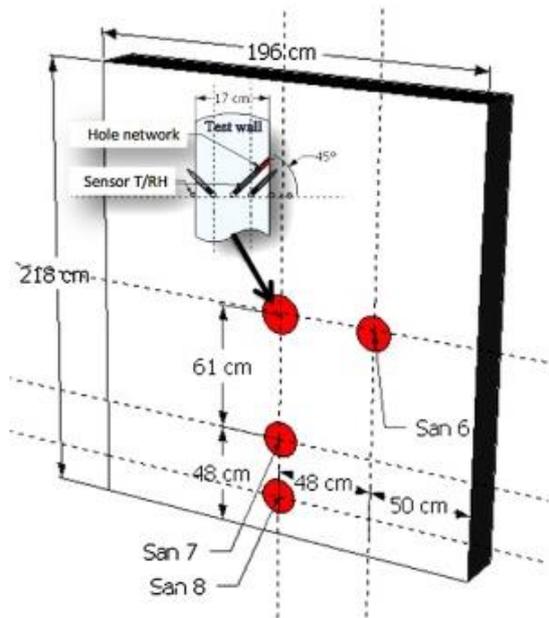


Figure I.18: Murs-test construit pour l'étude (Rahim et al., 2017)

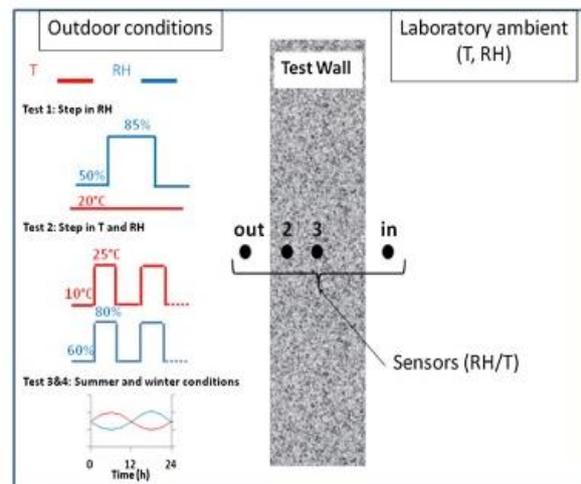


Figure I.19: Conditions expérimentales statiques et dynamiques (Rahim et al., 2017)

#### I.6.2.2. Impacts de la présence des enduits sur le comportement hygrothermique des parois en béton de chanvre

A l'échelle de la paroi, l'utilisation des enduits et leur effet sur le comportement du béton de chanvre est aussi abordée dans plusieurs travaux de recherches. Samri (2008) a modélisé les transferts hygrothermiques dans une paroi enduite en béton de chanvre en supposant une continuité des températures et humidités relatives aux interfaces. Les revêtements utilisés consistent en une couche de 2,5 cm de chanvre-chaux sur la surface intérieure et une couche de 1,8 cm de sable-chaux sur la surface extérieure (Figure I.20). Elle est soumise à des sollicitations statiques composées de quatre paliers de 24 h, soit une durée totale de l'essai égale à 96 h, avec des conditions généralement rencontrées en hiver (10°C, 80% ; 10°C, 45%), au printemps (20°C, 50% ; 20°C, 30%) et en été (30°C, 70% ; 40°C, 45%).

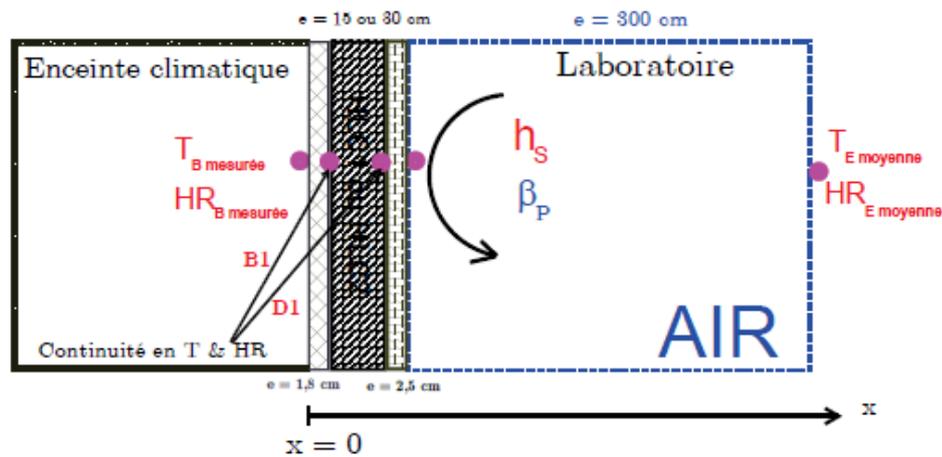


Figure I.20: Schématisation de la configuration utilisée dans l'étude de la paroi enduite en béton de chanvre (Samri, 2008)

L'impact de la présence des enduits se traduit donc en priorité sur le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau du matériau. Une valeur réduite de cette perméabilité conduit à des écarts significatifs avec une réponse en température plus rapide. C'est le paramètre le plus influent sur le transfert de chaleur. Ceci traduit une migration de vapeur d'eau freinée dans le béton de chanvre et de ce fait, le transfert par changement de phase dans le matériau n'est plus conséquent. Les enduits jouent donc un rôle tampon sur le transfert de masse.

Ouméziane et al. (2012) ont travaillé aussi sur cet aspect en considérant une paroi en béton de chanvre de 30 cm couverte d'un côté avec de l'enduit de chanvre-chaux. Deux épaisseurs de revêtement sont analysées et comparées : 5cm et 3 cm. Pour le test numérique, les températures restent constantes égales à 23 ° C et le côté avec revêtement est soumis à 4 créneaux différents de sollicitations hydriques, chacun de 96 heures (80%, 40%, 60% et 30%). Les résultats montrent que le revêtement joue un rôle dans la limitation de la diffusion de l'humidité relative dans le béton de chanvre, étant donné que le maximum atteint d'humidité relative à 22 cm dans le béton de chanvre est de 57% sans revêtement, 47% avec revêtement de 3 cm et 45% avec 5 cm. De même, la cinétique des variations est ralentie par la présence des enduits étant donné que les maximums ou minimums d'humidité relative sont atteints avec retard par rapport au mur sans revêtement. D'ailleurs, pour une courte période (12 heures) après une phase d'augmentation de l'humidité relative extérieure, l'enduit limite l'adsorption du béton de chanvre. De la même manière, pendant une période de 12 heures après une étape de diminution de l'humidité relative extérieure, ce même revêtement limite la désorption du béton de chanvre. Pour une longue période de 96 heures (4 jours) après l'humidification ou le séchage, le revêtement désorbe de l'humidité dans le béton de chanvre.

En outre, Colinart et al. (2013) et Colinart et al. (2016) ont abordé cette notion avec une paroi de 36cm en béton de chanvre revêtue de 4 couches d'enduits (sable-chaux et chanvre-chaux) comme montré sur la Figure I.21. La paroi multi-couches considérée est soumise à des séries de sollicitations statiques et dynamiques via une enceinte bi-climatique adaptée.

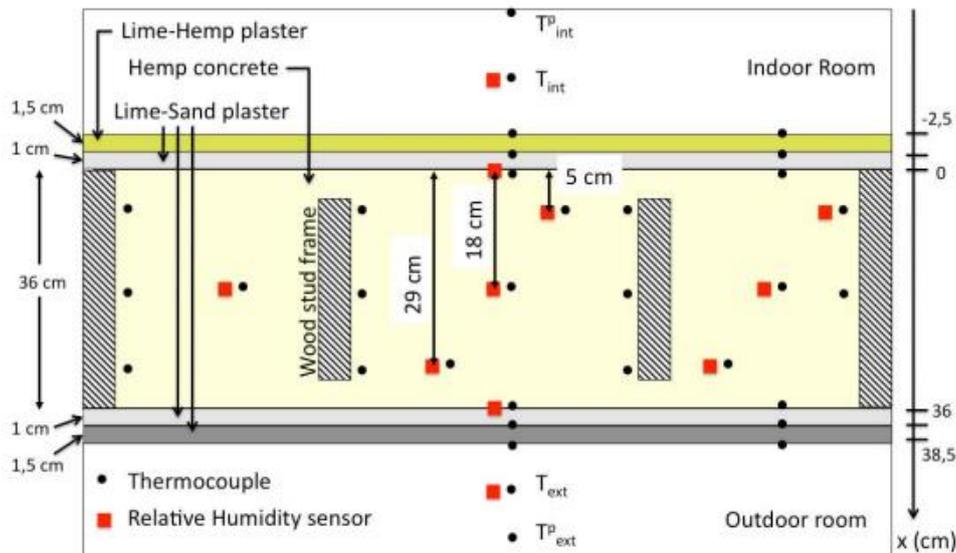


Figure 1.21: Coupe transversale de la paroi enduite en béton de chanvre (Colinart et al., 2016)

Colinart et al. (2013) ont constaté que les profils de température sont similaires pour les deux types de sollicitations statique et dynamique. Seul un léger retard est observé dans la réponse à la température en présence de plâtres. Ces différences proviennent de la faible épaisseur des plâtres (1 à 2 cm) et de leur faible résistance thermique. D'autre part, les niveaux de pression de vapeur sont plus faibles dans la paroi lorsque les revêtements sont appliqués. Ceci revient au fait que les plâtres sont moins perméables à la vapeur et agissent ainsi comme une barrière pour la diffusion de la vapeur. A noter aussi que bien que les niveaux de pression de vapeur ne soient pas exactement les mêmes, la différence entre l'état initial et final est minime. Ainsi, la quantité d'eau vaporisée est la même pour la paroi non revêtue, et par conséquent, la présence d'enduits n'affecte pas les phénomènes d'évaporation dans le béton de chanvre.

Des observations semblables sont constatées par Collet and Pretot (2014a) en faisant appel à une paroi-test en béton de chanvre de dimensions  $2,30 \times 2,10 \times 0,30 \text{ m}^3$ . La paroi est soumise à des sollicitations statiques de température et d'humidité relative :  $23^\circ\text{C}/80\%$  du côté extérieur et  $23^\circ\text{C}/40\%$  du côté intérieur. Les enduits consistent en deux couches de chaux commerciale de chaque côté de la paroi. L'analyse des résultats indique que le revêtement induit une résistance additive à la vapeur ce qui réduit et retarde son transfert de vapeur à travers la paroi. Cependant, il n'entrave pas les phénomènes de sorption-désorption et / ou d'évaporation-condensation dans le béton de chanvre.

Récemment, Piot et al. (2017) ont prouvé l'importance du choix des enduits du côté intérieur et extérieur pour éviter tout risque de moisissure dans les parois considérées. Deux parois-test en béton de chanvre préfabriqué sont construites en vraies dimensions et soumises pendant un an aux conditions réelles de température et humidité relative d'un côté et à des conditions pilotées de l'autre. L'enduit du côté intérieur consiste en une couche à base de chaux commerciale pour les deux parois. Du côté extérieur, deux enduits à base de ciment et chaux sont choisis, l'un commercial pour la première paroi, et l'autre mixé sur place pour la seconde. Les différentes analyses et interprétations données montrent que l'enduit du côté intérieur est perméable à la vapeur et que le comportement hygrothermique des blocs de béton de chanvre

n'est pas influencé par les humidifications de courte durée appliquées du côté intérieur. Les simulations établies sous WUFI montrent aussi que le revêtement intérieur ne ralentit pas significativement la désorption du béton de chanvre. Ensuite, pour l'enduit du côté extérieur, les résultats montrent que l'enduit commercial n'absorbe pas l'eau de pluie, au contraire du second. Cette absorption modifie considérablement les humidités relatives perçues dans l'enduit et ses effets sont même détectés au sein du béton de chanvre à long terme à travers des niveaux élevés des humidités relatives. Ceci risque de créer des conditions propices au développement de moisissure et rongeurs.

Par ailleurs, à noter que les travaux de Tran Le et al. (2010) et Maalouf et al. (2014) abordent l'influence des revêtements sur les enveloppes en béton de chanvre à l'échelle du local. D'après leurs travaux, l'addition à l'enveloppe du béton de chanvre d'une couche de mortier engendre des effets significatifs et conduit à une surestimation de 4,23% de la consommation d'énergie de chauffage et à une sous-estimation de 8% de l'humidité relative moyenne intérieure tout en minimisant les effets d'amortissement de cette humidité relative extérieure. Ces effets sont dus à la valeur de la conductivité thermique élevée du mortier et à sa perméabilité à la vapeur plus réduite, ce qui limite en conséquence la capacité tampon hydrique du béton de chanvre.

#### I.6.2.3. Impact de l'hystérésis dans la modélisation du comportement hygrothermique du béton de chanvre

L'isotherme de sorption d'un matériau hygroscopique est une courbe traduisant l'accroissement de la teneur en eau dans le matériau en fonction de l'humidité relative de l'air avoisinant à une température donnée. Si la variation de la teneur en eau part d'un état saturé, la courbe est appelée « isotherme de désorption » et si elle part d'un état sec, la courbe est nommée « isotherme d'adsorption ». La forme générale des courbes de sorption est donnée sur la Figure I.22 (Piot, 2009). La détermination des isothermes de sorption du béton de chanvre a été l'objet de plusieurs travaux de recherche à l'instar de ceux de Collet (2004), Cerezo (2005), Samri (2008) et Y. Ait Ouméziane (2013).

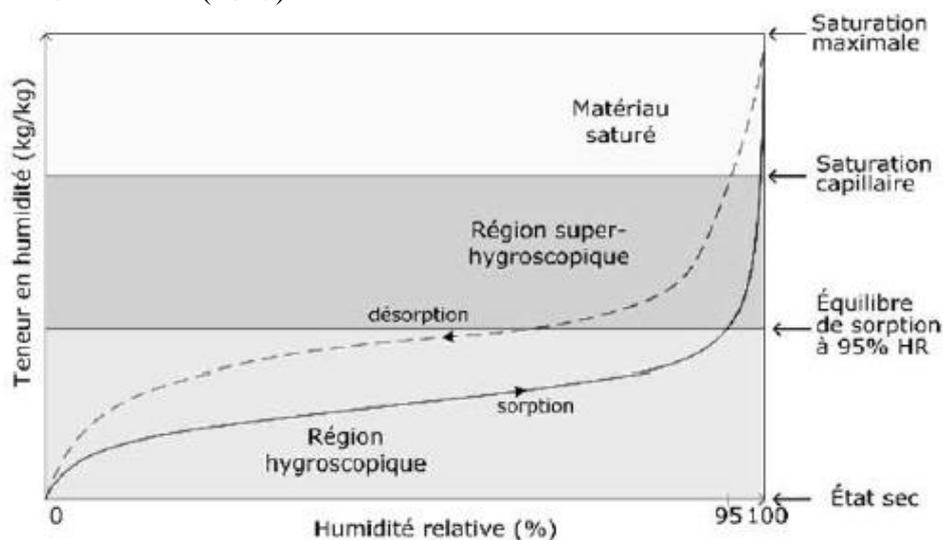


Figure I.22: Forme générale des isothermes de sorption (Piot, 2009)

Il existe un phénomène d'hystérésis entre les courbes d'adsorption et désorption du béton de chanvre. Ceci fait apparaître des courbes de sorption intermédiaires entre les courbes principales. L'hystérésis fait référence au fait qu'à la même humidité relative, le matériau subit un degré de saturation en humidité différent en fonction de l'historique hydrique de son comportement (Derluyn et al., 2012). Cela signifie que la teneur en eau mesurée en désorption pour une humidité relative donnée est supérieure à celle observée en adsorption. Ce phénomène est expliqué par la condensation capillaire dans les mésopores (IUPAC, 1985) qui classe l'hystérésis en quatre types selon la structure des pores (Figure I.23).

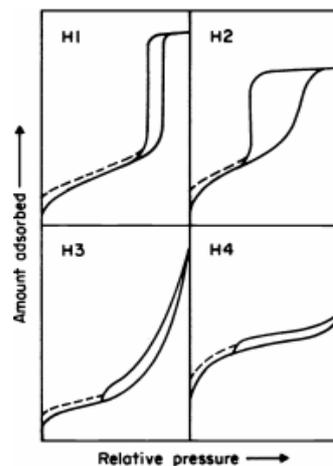


Figure I.23: Types d'hystérésis dans un matériau poreux (IUPAC, 1985)

L'explication de ce phénomène est liée au phénomène de la « bouteille d'encre » (Daian, 1986 ; Collet et al., 2008) qui se produit au sein des pores de diamètres variables et à la différence de mouillabilité des pores en adsorption et en désorption (Leon and Uantachrome, 1998). En effet, les angles de contact de l'eau dans les pores sont plus élevés en adsorption qu'en désorption. D'autres études proposent une interprétation plus généraliste de l'hystérésis en se basant sur les interactions ayant lieu dans les espaces interconnectés entre les pores (Naono and Hakuman, 1993).

La littérature fournit de nombreux modèles décrivant le phénomène d'hystérésis dans les matériaux poreux. En fait, trois modèles globaux peuvent être distingués :

- Les modèles physiques développés par Mualem (1974) : dans ces modèles, l'allure des courbes intermédiaires s'explique par les propriétés physiques des matériaux, à savoir les rayons des pores.
- Les modèles mathématiques de Kool and Parker (1987) : les courbes intermédiaires possèdent des allures similaires à celles principales.
- Les modèles empiriques proposés par Pedersen (1990) : ils se basent sur les valeurs pondérées des capacités hydriques ou les pentes des courbes de sorption principales.

Les deux premiers groupes de modèles sont prédictifs et ne nécessitent que la connaissance des courbes de sorption principales tandis que les modèles empiriques exigent au moins la connaissance d'une courbe de sorption primaire. Jusqu'à présent, la prise en compte de l'hystérésis dans les modélisations numériques se trouve confrontée aux interfaces limitées des

logiciels de simulation (Kwiatkowski et al., 2009). Néanmoins, des travaux ont réussi à l'aborder et à étudier les effets de son prise en compte dans la modélisation numérique.

Rode and Clorius (2004) ont réussi à implémenter un modèle d'hystérésis basé sur l'approche de Pedersen dans leurs travaux de modélisation des transports de vapeur dans le bois. Une toiture en bois d'un centre Danois, exposée aux conditions climatiques extérieures, a été instrumentée pour mesurer la teneur volumique en eau à différents endroits. D'après les résultats, ils signalent que l'effet de l'hystérésis réside dans la réduction des pentes des courbes intermédiaires par rapport à celles principales, ce qui par conséquent affecte considérablement la pression de vapeur locale lorsque la teneur en eau dans le matériau change. Ainsi, prendre en compte l'hystérésis est intéressant en considérant les réponses dynamiques à court-terme des teneurs en eau. Par contre, à long terme, la courbe moyenne de sorption est bien adaptée pour prédire ces teneurs volumiques et l'effet de l'hystérésis est négligeable sur les résultats.

Steeman (2009) et Van Belleghem et al. (2010) ont effectué leur travail sur l'hystérésis dans un matériau poreux tel le plâtre en adoptant un modèle CFD-HAM (« Heat and Moisture transfers ») basé sur l'approche de Mualem. Les résultats montrés pour 48h de simulation ont montré que l'hystérésis n'a pas apporté tant d'amélioration dans les résultats par rapport à l'expérimental, mais les écarts calculés sans hystérésis tombent fréquemment hors de la plage d'incertitude de l'expérience. D'ailleurs, la simulation du cas de test avec hystérésis prise en compte aboutit en effet à un meilleur accord avec les valeurs expérimentales dans la phase de désorption. Le comportement du matériau est probablement affecté par l'hystérésis. En continuant sur le même type de matériau, de leur côté, (Kwiatkowski et al., 2009) ont pris en compte l'hystérésis dans leurs simulations sur une plaque de 1,25 cm de plâtre. Leur modèle se base sur l'approche de Pedersen et les simulations sont menées avec le logiciel « MATCH » (Delgado et al., 2010). Leurs conclusions globales portent sur le fait que l'utilisation d'une seule des équations isothermes de sorption (adsorption ou désorption) conduit à des différences significatives. Des résultats plus précis ont été obtenus lorsque la courbe moyenne des équations est mise en place. Cependant, pour de fortes variations des conditions aux limites, la convergence vers un état quasi-permanent est beaucoup plus lente si l'on considère l'hystérésis. Cet effet influence le comportement dynamique des matériaux. Il a également été montré que dans des conditions réalistes (une pièce soumise à des charges climatiques et hygrothermiques variables), négliger l'hystérésis entraîne une surestimation des propriétés tampon hydriques des matériaux en contact avec l'air intérieur. Dans certains cas, une telle surestimation peut entraîner une sous-estimation des risques de croissance de moisissure et / ou de condensation.

Zhang (2014) et Zhang et al. (2015) se sont concentrés sur l'étude de l'hystérésis et de son influence sur le transport d'humidité dans les bétons à base de ciment. Deux modèles d'hystérésis basés sur les approches de Mualem et Rubin sont élaborés et validés. Leur travail consiste à comparer les variations massiques d'un échantillon cylindrique entre les valeurs expérimentales, le modèle à prédiction sans hystérésis et les deux modèles avec hystérésis. L'échantillon est soumis à deux phases d'adsorption et désorption (157 jours et 243 jours respectivement). Les simulations effectuées par la modélisation sans hystérésis sont présentées pour deux cas qui correspondent respectivement à la courbe de sorption moyenne et à la courbe de désorption principale. Les résultats montrent que le modèle de Mualem fournit le meilleur

accord avec les courbes de perte de masse mesurées pour les deux phases au moment où le modèle de Rubin surestime la masse totale d'humidité obtenue au cours de la désorption. Les deux cas de modélisation sans hystérésis montrent, de manière inattendue, des résultats très similaires mais sous-estiment nettement les variations de masse de l'échantillon qui chute brutalement en désorption. Ceci est dû à la variation du coefficient de saturation entre les modèles. Dans ce cas aussi, l'hystérésis prise en compte sert à mieux corréliser avec les données expérimentales.

Les études de cet aspect sur le béton de chanvre existent mais sont moins nombreuses. Ait Ouméziane (2013) s'est intéressé à l'hystérésis du béton de chanvre en choisissant l'approche de Huang-Mualem pour la modélisation. Les tests sont réalisés sur une paroi d'épaisseur 30 cm de béton de chanvre en vraies dimensions soumise à des sollicitations climatiques imposées par l'enceinte bi-climatique. Deux phases d'adsorption et de désorption d'une durée totale de 20 jours sont sélectionnées pour confronter les résultats expérimentaux et numériques, avec et sans hystérésis. Les Figures I.24 et I.25 montrent les résultats des humidités relatives et températures respectivement.

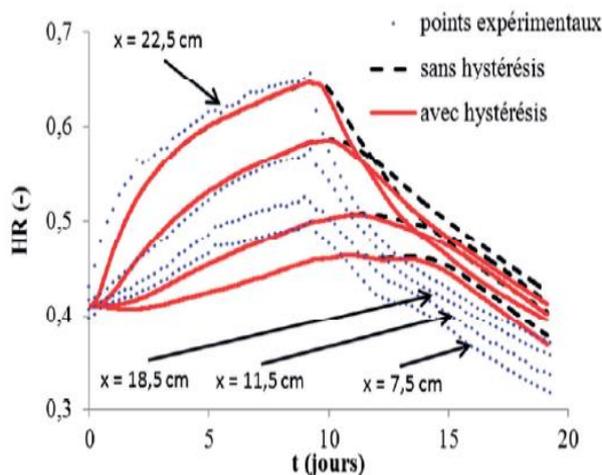


Figure I.24 : Evolutions des humidités relatives dans la paroi (Ait Ouméziane, 2013)

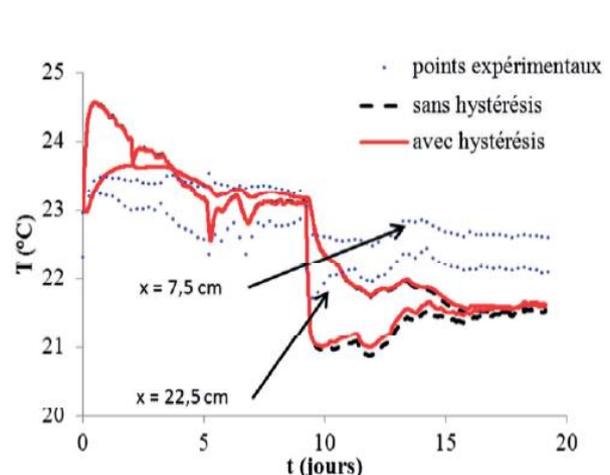


Figure I.25 : Evolutions des températures dans la paroi (Ait Ouméziane, 2013)

En phase d'adsorption, jusqu'au pic d'humidité autour du 10ème jour, la prise en compte du phénomène d'hystérésis n'a ici clairement aucun effet. En effet, durant cette période, l'évolution de la teneur en eau au sein du matériau est gouvernée dans chaque cas par la courbe d'adsorption principale. En revanche, en phase de désorption, le modèle d'hystérésis permet de mieux prendre en compte les variations d'humidité grâce à une meilleure modélisation de la cinétique de stockage. D'après Y. Ait Ouméziane (2013), l'amélioration des résultats s'effectue non seulement par la prise en compte de l'hystérésis, mais aussi par le choix adéquat de la teneur en eau initiale dans le matériau. En effet, le meilleur compromis consiste à éviter de prendre des teneurs en eau initiales extrêmes (c'est-à-dire de la courbe d'adsorption ou bien de désorption), mais à privilégier des teneurs intermédiaires raisonnables.

Plus récemment, l'hystérésis du béton de chanvre apparaît aussi dans les travaux de (Lelievre et al., 2014) et (Lelievre, 2015). Une paroi de 36 cm de béton de chanvre est testée

sous des conditions imposées par une enceinte bi-climatique. Un modèle numérique qui tient en compte l'hystérésis du béton de chanvre est établi pour prédire numériquement les évolutions des températures et humidités au sein de la paroi. Les résultats sont présentés ci-après.

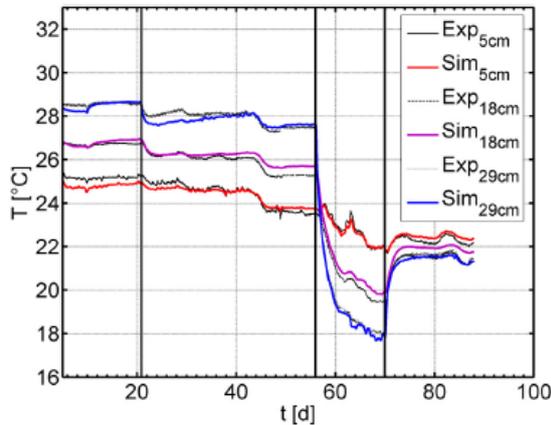


Figure I.26: Comparaison entre les températures simulées et mesurée (Lelievre et al., 2014)

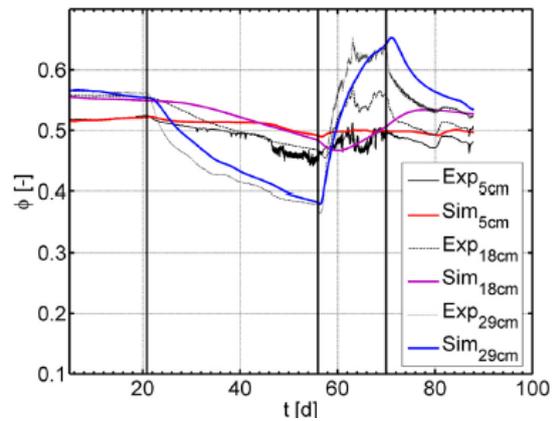


Figure I.27: Comparaison entre les humidités relatives simulées et mesurées (Lelievre et al., 2014)

Lelievre et al. (2014) signalent que pour les températures (Figure I.26) un bon accord entre les valeurs expérimentales et numériques est trouvé concernant l'amplitude et le déphasage à tout endroit de la paroi. Pour les humidités relatives (Figure I.27), l'accord n'est pas parfait mais reste acceptable surtout du côté intérieur et extérieur de la paroi pour des raisons liées aux valeurs expérimentales elles-mêmes ou bien à des défauts de fabrication dans le béton de chanvre. Avec hystérésis, le comportement hygrothermique du béton de chanvre est bien prédit. Dans le même contexte, (Colinart et al., 2016) ont travaillé sur une paroi identique en béton de chanvre mais cette fois enduite de ses deux côtés. Les températures et humidités intérieures dans sont fixées à 23°C et 50%, tandis que les conditions du côté extérieur changent. Les températures et humidités relatives sont mesurées à trois endroits différents et comparés avec les sorties de trois modèles numériques : l'un sans hystérésis, l'autre avec hystérésis initialisé de la courbe d'adsorption et le dernier avec hystérésis initialisé de la courbe de désorption. Les résultats figurent ci-après.

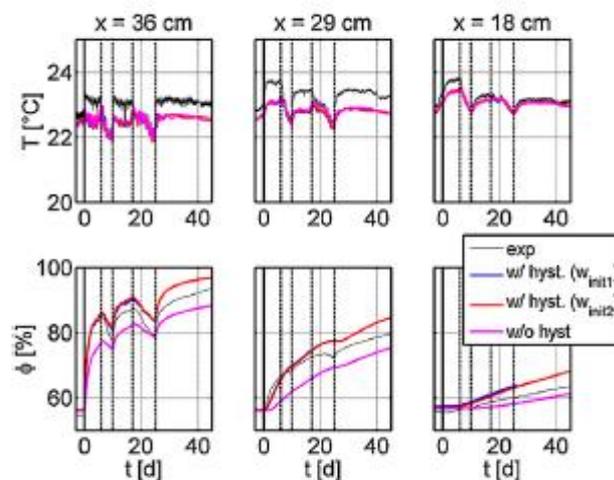


Figure I.28: Comparaison entre les températures simulées et mesurées avec et sans hystérésis pour le 1<sup>er</sup> test (Lelievre et al., 2014)

Sur la Figure I.28, en ce qui concerne les températures, la différence entre les trois modèles est négligeable. Cependant, une grande influence de l'hystérésis dans la prédiction de l'humidité relative est observée : le modèle sans hystérésis conduit à une sous-estimation des variations d'humidité relative, alors qu'avec hystérésis une légère surestimation mais qui reste dans les limites d'incertitude des capteurs est constatée. La différence observée provient de la pente de la courbe de sorption : l'isotherme de désorption principale a une forte pente, ce qui conduit à des variations d'humidité relative plus faibles pour un flux d'humidité donné.

Par ailleurs, Fabbri and McGregor (2017) ont montré que des simulations bien précises et prometteuses peuvent être effectuées sans tenir compte de l'hystérésis observée entre les courbes de désorption et les courbes de sorption. Ceci est dû au fait que lorsque le matériau est soumis à des cycles d'humidité modérés (entre 85% HR et 23% RH), la relation entre la teneur en eau et l'humidité relative est presque réversible et linéaire, et donc la pente semble rester assez constante, au moins entre 23 °C et 40 °C. Cette apparente indépendance vis-à-vis de la température fait allusion à la variation des isothermes de sorption en fonction de la température.

Ces études restent à l'échelle de la paroi pour des conditions hygrothermiques qui sont soit de courtes durées ou non réalistes. Leur impact sur les conditions intérieures de l'air et sur les consommations énergétiques est méconnu... L'hystérésis, à elle seule, ne permet pas de prédire à totalité le comportement dans le matériau. Certains auteurs ont proposé aussi une prise en compte de la thermodépendance des isothermes de sorption comme abordé dans la section suivante.

#### I.6.2.4. Thermo-dépendance des isothermes du béton de chanvre dans la modélisation

L'étude de l'effet de la température sur le comportement hydrique d'un matériau de construction poreux est récente. Initiées expérimentalement par Radjy and Richards (1973) et Bray and Sellevold (1973), ces études sont ensuite menées sur des matériaux à base de ciment (Poyet, 2009; Brue, 2009 et Drouet, 2010). Les constatations communes ont montré que la température modifie l'allure de l'isotherme de sorption en affectant les évolutions des teneurs en eau dans le matériau. Trois grandes théories peuvent expliquer les principaux phénomènes à l'origine de ces modifications :

- La modification de la microstructure des pores : un élargissement de la taille des pores est attribué à une augmentation de la température. Un test effectué sur des échantillons à base de ciment (Radjy et al., 2003) prouve la présence de pores avec des diamètres plus grands à 80°C qu'à 30°C.
- Les changements des propriétés intrinsèques de l'eau avec la température : la théorie de la redistribution de la taille des pores à des températures élevées est limitée pour expliquer l'équilibre de la teneur en eau dans le matériau à des humidités relatives plus élevées (Milly, 1982).
- L'évolution thermodynamique des mécanismes de sorption avec la température : étant donné que l'adsorption est un processus exothermique (Brunauer et al., 1940), une augmentation de la température entrave son processus physique en provoquant une diminution du nombre de molécules adsorbées et donc de la teneur en eau (Poyet and Charles, 2009).

Généralement, prendre en compte la dépendance des isothermes de sorption d'un matériau hygroscopique à la température consiste à décrire ses caractéristiques de sorption à différents niveaux de température. Dans la littérature, parmi les approches qui décrivent cet aspect, deux approches sont largement connues :

- Approche de Milly (Milly, 1982) :

Le modèle développé propose de justifier l'influence de la température sur les isothermes de sorption par une modification des propriétés intrinsèques de l'eau. La modification des propriétés intrinsèques de l'eau peut ainsi contrebalancer l'effet de la température sur la structure poreuse et ainsi répondre au comportement hydrique à saturation. Prédire les isothermes de sorption à des températures différentes se fait grâce aux corrélations suivantes :

$$\varphi_2(T_2, \theta) = \varphi_1(T_1, \theta) e^{C_\varphi(T_2-T_1)} \quad (I.2)$$

$$C_\varphi = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial T} \quad (I.3)$$

$\theta$  étant la teneur volumique en eau,  $\varphi$  l'humidité relative,  $T_1$  la température de référence et  $T_2$  le deuxième niveau de température.

- Approche de Poyet et Charles (Poyet and Charles, 2009):

Elle se base sur l'évolution de l'équilibre thermodynamique de l'adsorption et de la désorption. Dans leurs travaux, ces auteurs introduisent la notion de chaleur isostérique de sorption  $q_{st}$  (J.kg<sup>-1</sup>) qui peut être calculée à partir de deux isothermes de sorption à deux températures différentes. Connaissant cette énergie isostérique, la prédiction de l'évolution d'une isotherme de sorption à une température donnée sera faite en se basant sur la relation de Clausius-Clapeyron (Poyet and Charles, 2009):

$$\varphi_2(T_2, \theta) = \varphi_1(T_1, \theta) \frac{P_{sat}(T_1)}{P_{sat}(T_2)} e^{q_{st}(\theta) \frac{M_1}{R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)} \quad (4)$$

Avec  $M_1$  la masse molaire de l'eau (kg.mol<sup>-1</sup>), et  $R$  la constante des gaz parfaits (J. mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>), et  $P_{sat}$  la pression de saturation de la vapeur d'eau (Pa).

A part les matériaux cimentaires, des travaux sur la thermo-dépendance des isothermes de sorption ont été effectués sur le bois. Rode and Clorius (2004) ont couplé les effets de l'hystérésis du bois et ceux de la température sur ses isothermes de sorption (Figure I.29).

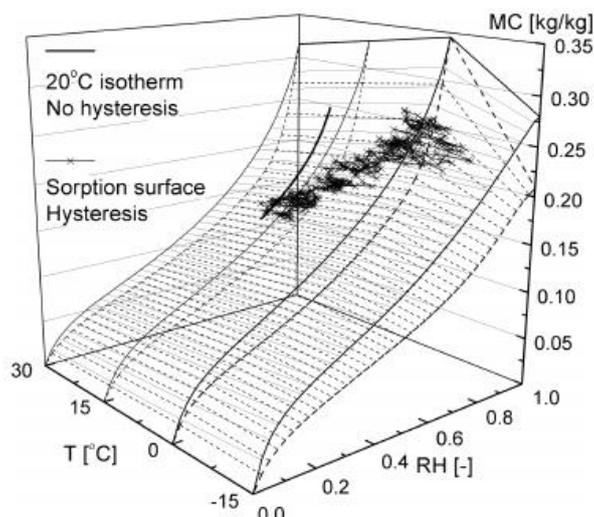


Figure I.29: Variation des isothermes de sorption du bois en fonction de la température (Rode and Clorius, 2004)

Les résultats de simulations suggèrent que l'effet de l'inclusion des courbes dépendant de la température est une augmentation de 10% de l'amplitude annuelle de la fluctuation de la teneur en humidité par rapport aux modèles supposant une sorption isotherme. Ceci revient à une capacité hydrique apparente plus élevée du matériau qui se traduit par une teneur en eau plus grande avec l'augmentation de l'humidité relative. Cette observation est fortement gouvernée par les périodes aux humidités relatives ambiantes élevées coïncidant avec les périodes avec de basses températures ambiantes, où l'équilibre en teneur en eau est atteint pour ses valeurs les plus élevées. Corrélativement, les faibles valeurs ambiantes de l'humidité relative sont rencontrées dans les périodes à hautes températures, où la teneur en humidité à l'équilibre est la plus faible.

Dubois (2014) et Dubois et al. (2016) ont abordé cet aspect sur les matériaux à base végétale issus de la paille. Une paroi-test en paille est construite et soumise à des variations de conditions thermiques via une enceinte bi-climatique. Les températures au sein de la paroi sont relevées et comparées aux résultats numériques de trois modèles établis sous COMSOL et dont deux tiennent en compte la thermo-dépendance des isothermes de sorption. Dans le premier, l'approche de Poyet est adoptée. Dans le second, une corrélation linéaire de prédiction de la teneur en eau en fonction de la température est utilisée et le troisième consiste en un modèle standard de la bibliothèque des modèles « HAM ». La comparaison des résultats montre qu'aucune distinction ne peut être faite visuellement entre les modèles concernant la modélisation du champ de température. Les résultats issus de toutes les versions semblent être compatibles avec la température expérimentale. Pour les humidités relatives, le modèle standard sous-estime les résultats expérimentaux, au moment où le premier modèle présente les meilleurs résultats.

Concernant le béton de chanvre, la thermo-dépendance des isothermes de sorption a fait l'objet des travaux de Tran Le et al. (2015). Une paroi de 30 cm en béton de chanvre est testée numériquement. D'un côté, des conditions cycliques de température et d'humidité sont imposées : 30°C et 70% pendant 24 heures suivies de 20°C et 30% pendant les deuxièmes 24 heures. De l'autre côté, la paroi est en contact avec les conditions ambiantes du laboratoire. La modélisation de la thermo-dépendance s'établit en se basant sur l'approche de Poyet et Charles

pour les trois cas examinés : courbe d'adsorption, courbe de désorption et courbe moyenne entre adsorption et désorption. Pour les profils de températures suivies, des résultats similaires sont montrés entre les modèles avec et sans prise en compte de la température. Cependant, pour les humidités relatives, les modèles de courbes isothermes (Figure I.30) n'arrivent pas à simuler les évolutions dynamiques des humidités relatives au sein de la paroi, au contraire des modèles non-isothermes (Figure I.31), avec un privilège accordé pour le modèle qui utilise la courbe d'adsorption.

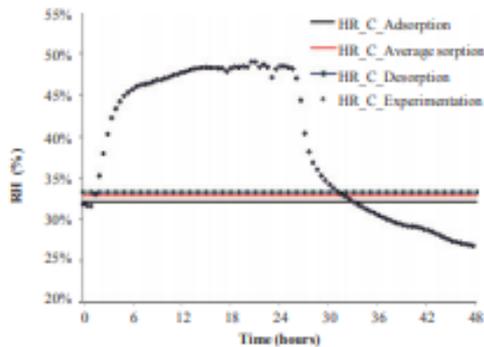


Figure I.30: Evolution des humidités relatives sans prise en compte de la thermo-dépendance des courbes (Tran Le et al., 2015)

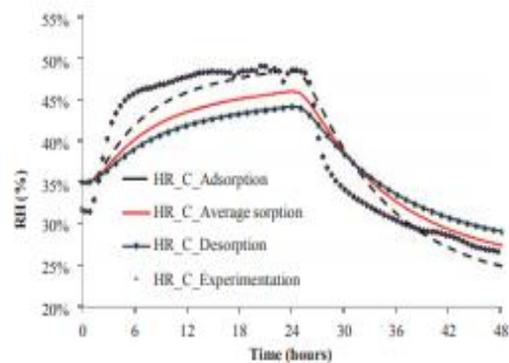


Figure I.31: Evolution des humidités relatives avec prise en compte de la thermo-dépendance des courbes (Tran Le et al., 2015)

En outre, Ait Oumeziane (2013) et Aït Oumeziane et al. (2016) se sont intéressés à la variation des isothermes du béton de chanvre en fonction de la température et à son influence sur son comportement hygrothermique. Les isothermes du béton de chanvre étudié (Easy-R) ainsi que la chaleur de sorption isostérique sont déterminées expérimentalement. Puis à l'aide d'une approche basée sur Poyet et Charles (Poyet and Charles, 2009), une prédiction des isothermes de sorption est faite sur une gamme de températures comprises entre 0°C et 35°C comme montré sur la Figure I.32. L'observation que l'augmentation de la température réduit la loupe d'hystérésis est confirmée.

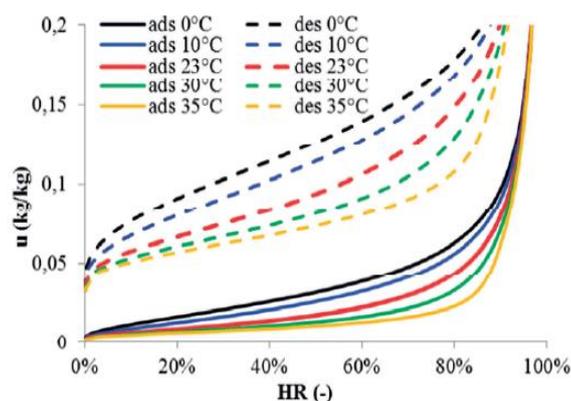


Figure I.32: Thermo-dépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre Easy-R (Ait Oumeziane, 2013)

Du point de vue numérique, une comparaison entre des modèles numériques avec et sans prise en compte de la thermo-dépendance des isothermes de sorption est effectuée à l'échelle de la paroi. Il s'ensuit que seule la prise en compte de l'effet de la température sur la teneur en eau permet de reproduire la cinétique de distribution d'humidité lorsque la température diminue

fortement. Cependant, la modélisation adoptée est insuffisante pour traduire les variations importantes d'humidité dans la paroi proche de la surface extérieure au contraire de la surface intérieure où les distributions d'humidité semblent néanmoins tout à fait acceptables. Ces différences pourraient être dues selon eux à l'évaluation de la capacité hydrique en fonction de la température. Par ailleurs, il est à noter que les distributions de température au sein de la paroi sont plutôt bien reproduites.

Finalement, Colinart and Glouannec (2017) ont mis en évidence l'impact de la prise en compte de la thermodépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre dans la modélisation de son comportement hygrothermique. Une paroi de 36 cm en béton de chanvre est testée. La thermodépendance est abordée numériquement suivant deux approches : l'une à travers le modèle de GAB, et l'autre en se basant sur la corrélation de Clausius-Clapeyron. Les résultats de ces deux modèles sont comparés aux relevés expérimentaux et aux résultats d'un modèle standard de transfert de chaleur et d'humidité de la librairie WUFI. D'après les résultats, ce dernier a échoué à montrer l'effet de la température sur les variations de l'humidité relative dans la paroi. Deuxièmement, des différences ont été observées entre les deux approches de modélisation ce qui souligne la nécessité de porter une attention particulière à la chaleur isostérique de sorption et de l'exprimer en fonction de l'humidité relative plutôt qu'en fonction de la teneur en humidité. Par ailleurs, même si tenir compte de cette thermo-dépendance est d'une grande importance pour capter les variations locales d'humidité relative dans les plages de larges variations de température, elle a au contraire moins de conséquences sur la prédiction des flux de chaleur et d'humidité globaux dans la paroi.

### 1.6.3. Echelle du local et du bâtiment

L'étude du béton de chanvre à l'échelle du local et du bâtiment est peu abordée dans les travaux scientifiques et elle est toujours en plein essor. Tran Le et al. (2010) ont réalisé la simulation du comportement hygrothermique d'un local en béton de chanvre. Dans leur étude, un modèle basé sur les travaux de Mendes (1997) a été utilisé. La diffusion d'humidité dans le plancher n'est pas considérée. Deux modèles sont testés avec et sans transfert d'humidité. Les types d'enduit et la stratégie de ventilation sont variés. Les performances hygrothermiques du local sont ensuite comparées à celles d'un local en béton cellulaire.

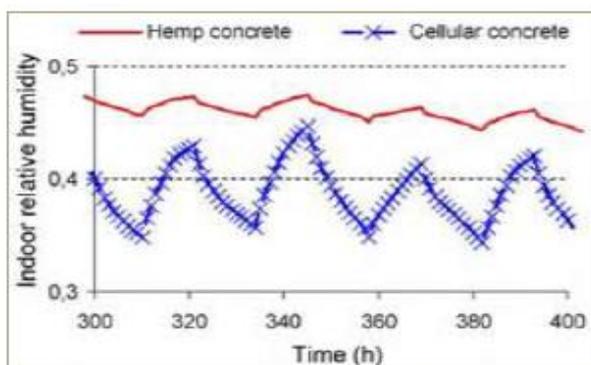


Figure I.33: Comparaison des humidités relatives entre le béton cellulaire et le béton de chanvre (Tran Le et al. 2010)

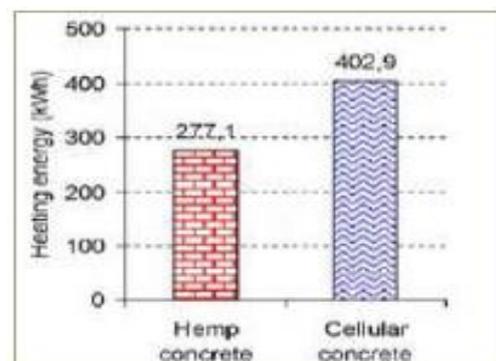


Figure I.34: Consommations de chauffage entre le béton cellulaire et le béton de chanvre (Tran Le et al. 2010)

Les résultats ont montré que la cellule en béton de chanvre a une meilleure capacité tampon hydrique que celle en béton cellulaire (Figure I.33) et il en résulte une réduction des consommations énergétiques de l'ordre de 30% (Figure I.34)

D'autre part, Shea et al. (2012) ont travaillé sur une maquette expérimentale d'un bâtiment avec des murs en béton de chanvre. Il s'agit d'une cellule de surface 27 m<sup>2</sup>, avec 20 cm de murs en béton de chanvre. La toiture consiste en une plaque de plâtre de 0,9 cm et un isolant à cellules fermées de 20 cm. Les relevés de mesure pendant 11 jours du mois de mai 2011 ont montré la capacité du béton de chanvre à amortir les variations extérieures de température (Figure I.35) et d'humidité (Figure I.36) et à retarder les effets de leurs pics.

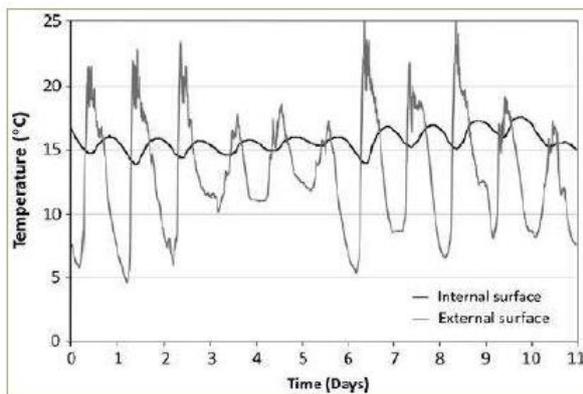


Figure I.35: Comparaison des températures des surfaces intérieure et extérieure (Shea et al., 2012)

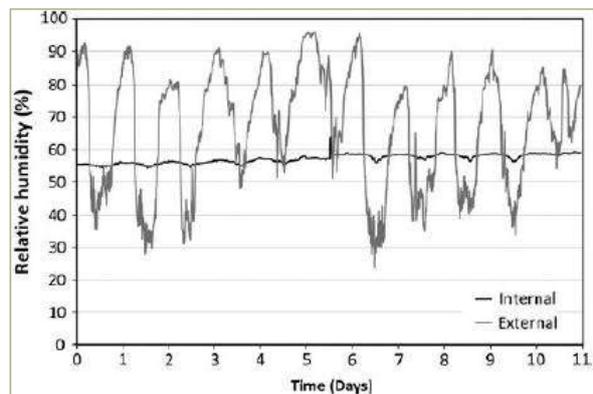


Figure I.36 : Comparaison des humidités relatives aux surfaces intérieure et extérieure (Shea et al., 2012)

Moujalled et al. (2015) et Moujalled et al. (2018) ont travaillé aussi dans ce contexte. Leur étude s'étend sur quatre ans et porte sur un bâtiment en béton de chanvre situé à Périgueux dans le Sud-Ouest de la France. Son enveloppe est constituée d'une couche de 30 cm de béton de chanvre projeté comme montré ci-après, ainsi que de deux autres couches d'enduit sable-chaux d'épaisseurs respectives 2 cm et 1 cm. (Figure I.37). Les tests de thermographie infrarouge de l'enveloppe ont montré que la paroi est globalement homogène sans ponts thermiques relatif à l'ossature en bois.

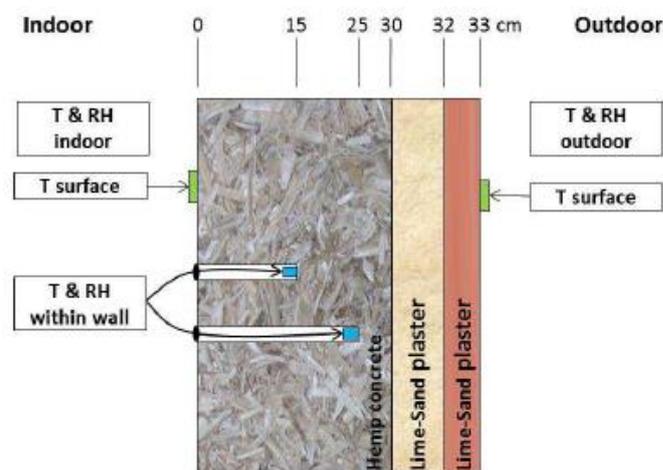


Figure I.37 : Paroi du bâtiment en béton de chanvre étudié (Moujalled et al., 2015)

L'analyse des relevés de mesure montre que les tendances annuelles de la température intérieure et de l'humidité relative sont similaires pour les quatre ans et pour les différentes pièces testées. Le tracé du diagramme psychrométrique selon la norme EN 15251 dans le séjour montre le respect des niveaux de confort thermique dans la pièce ainsi que dans les autres chambres.

Les simulations numériques menées pour valider les résultats expérimentaux utilisent deux logiciels WUFI et Matlab d'autre part et ne sont pas capables de reproduire les variations journalières des températures et d'humidité relative. Néanmoins, en comparaison avec les données expérimentales, les résultats permettent de bien reproduire la tendance globale annuelle des évolutions. Les écarts entre les deux logiciels peuvent être expliqués par le fait que les isothermes de sorption et les coefficients de transport liquide ne sont pas similairement implémentés.

La suite des simulations est faite sous Matlab pour étudier l'impact de la prise en compte de l'hystérésis (Figures I.38 et I.39) avec le modèle de Huang et de la thermo-dépendance (Figures I. 40 et I.41) des isothermes de sorption avec l'approche de Poyet dans la modélisation.

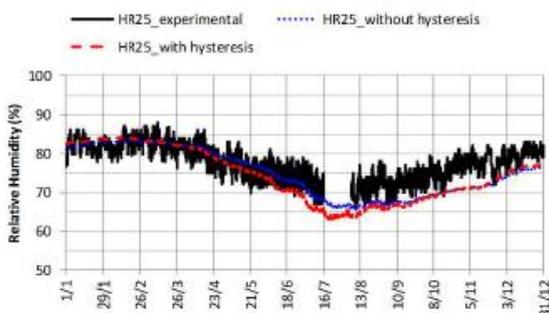


Figure I.38: Comparaison des humidités relatives avec et sans hystérésis du côté extérieur (Moujalled et al., 2018)

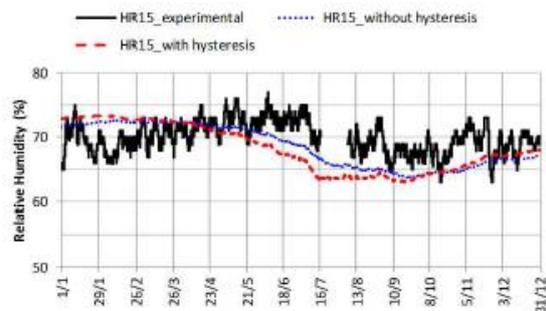


Figure I.39: Comparaison des humidités relatives avec et sans hystérésis au milieu de la paroi (Moujalled et al., 2018)

Les résultats numériques obtenus avec ou sans hystérésis sont équivalents. Dans ces conditions hygrothermiques, la pertinence à considérer le phénomène d'hystérésis est pauvre. En effet, les variations extérieures et intérieures des conditions hygrothermiques ne sont pas assez grandes pour observer une influence efficace de la considération de l'hystérésis.

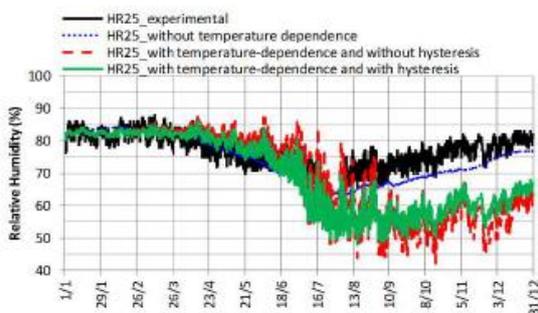


Figure I.40: Comparaison des humidités relatives avec et sans thermo-dépendance du côté extérieur (Moujalled et al., 2018)

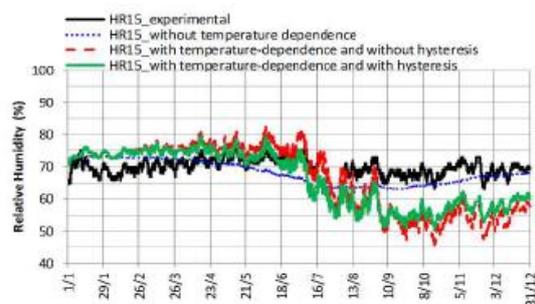


Figure I.41: Comparaison des humidités avec et sans thermo-dépendance au milieu de la paroi (Moujalled et al., 2018)

L'évolution de l'humidité relative est en accord avec les résultats expérimentaux jusqu'à fin juillet. Puis, de fin d'août à la fin de l'année, la teneur en humidité augmente légèrement avec la baisse des températures. Au cours de cette période, certaines divergences sont observées entre les résultats numériques et expérimentaux (jusqu'à 15%), même si la tendance globale est respectée. Ceci peut s'expliquer par la baisse des niveaux d'humidité dans la modélisation pour les températures élevées atteintes dans le mur. Ceci montre que la thermo-dépendance donne des résultats prometteurs qui nécessitent encore plus d'investigations.

D'ailleurs, Gourlay (2017) a suivi la réhabilitation de la Maison du Tourisme de Troyes, à structure en bois avec remplissage chanvre-chaux. La détermination des coefficients d'absorption acoustique du béton de chanvre est faite. La paroi du bâtiment étudié est instrumentée en capteurs de température et d'humidité relative. L'analyse des relevés expérimentaux permet de dire que les variations des températures et humidités relatives intérieures sont cohérentes. Les variations journalières d'humidité relative peuvent atteindre 10% au sein du matériau et le déphasage thermique au milieu du mur est de l'ordre de 6 heures avec un amortissement supérieur à 70% (Figure I.42).

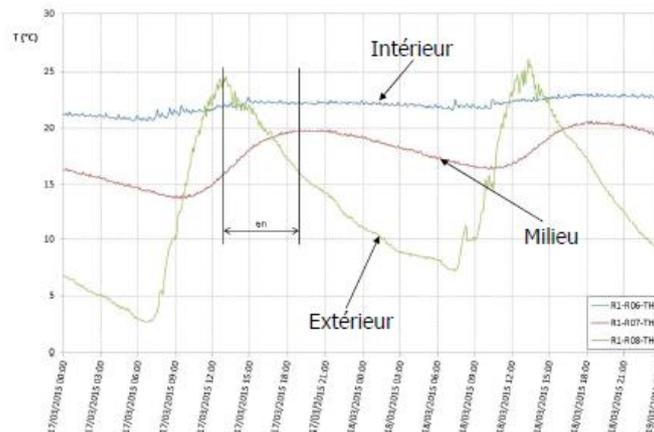


Figure I.42: Comparaison entre les températures mesurées aux différents endroits de l'enveloppe (Gourlay, 2017)

Le suivi de la qualité de l'air intérieur montre qu'il n'existe pas de dépassement significatif de valeurs réglementaires et sanitaires pour les polluants identifiés dans les bureaux et que les niveaux de CO<sub>2</sub> sont satisfaisants avec quelques dépassements très brefs de l'ordre de 1000 ppm. Par ailleurs, la modélisation des transferts hygrothermiques est faite sous le logiciel WUFI en 2D. Au moment où le modèle arrive à bien prédire les évolutions des températures intérieures, des écarts existent entre les humidités relatives mesurées et simulées en termes de valeurs et dynamique. Ceci peut être attribué à la sous-estimation de la célérité des transferts hydriques par convection et des changements de phase. Des travaux et des recherches sont toujours en cours sur ce bâtiment.

## **I.7. Conclusion**

Le déploiement des matériaux bio-sourcés dans la construction est l'une des solutions plausibles répondant aux nouvelles réglementations thermiques aux échelles nationale et européenne. Ainsi, les études sur le béton de chanvre sont en plein essor sur les plans expérimental et numérique.

La modélisation réussit à implémenter avec succès les phénomènes couplés de transfert de chaleur et de masse ayant lieu dans le béton de chanvre. L'étude de son comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi connaît des développements remarquables et plusieurs phénomènes sont mis en évidence.

Il a été prouvé que la présence des enduits réduit la capacité tampon hydrique du béton de chanvre et limite ses pouvoirs régulateurs d'humidité.

En ce qui concerne l'hystérésis, l'effet de sa prise en compte dans la modélisation est toujours controversé du fait que les améliorations qu'elle apporte dans la prédiction des températures et humidités relatives sont parfois restreintes. Vu la complexité de son implémentation, des études montrent que la courbe moyenne de sorption pourrait être bien représentative de l'identité hydrique du matériau.

D'un autre côté, la thermodépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre connaît de plus en plus de développement et les recherches en cours montrent son pouvoir prometteur dans la modélisation à condition de bien maîtriser les données expérimentales nécessaires comme principalement la chaleur isostérique de sorption.

En revanche, les études à l'échelle du bâtiment restent rares et surtout celles qui s'intéressent au confort ressenti à l'intérieur des logements construits en béton de chanvre. En fait, elles sont principalement menées sur la durabilité des parois en béton de chanvre et sur les phénomènes ayant lieu au sein des enveloppes en question.

---

## **Chapitre II : Etudes numériques du comportement hygrothermique du béton de chanvre à l'échelle de la paroi**

---

Dans ce chapitre, le comportement hygrothermique du béton de chanvre à l'échelle de la paroi est étudié. Les principaux phénomènes physiques qui y sont associés sont l'hystérésis dans le béton de chanvre et la dépendance de ses isothermes de sorption à la température. A cet égard, l'impact de la prise en compte de ces deux phénomènes dans la prédiction des évolutions de température et d'humidité relative au sein des parois en béton de chanvre est évalué. L'étude porte sur des parois simples et multicouches en béton de chanvre. Quatre modèles numériques sont ainsi développés et testés : un modèle standard de transfert de chaleur et d'humidité, un modèle qui tient compte de l'hystérésis dans le béton de chanvre, un troisième qui prend en considération la thermodépendance des isothermes de sorption et un dernier global comprenant tous ces aspects. La validation des modèles se fait en comparant les sorties numériques avec les données expérimentales et numériques de la littérature.

## **II.1. Introduction**

L'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments résidentiels et tertiaires, la durabilité des constructions et l'optimisation des performances énergétiques des habitats sont devenues les préoccupations les plus importantes des nouvelles réglementations à l'échelle nationale et mondiale. Ceci est en rapport direct avec les taux d'humidité ressentie, étant donné qu'un pourcentage d'humidité élevé dans les espaces occupés est un facteur principal encourageant le développement des moisissures et augmentant le risque d'allergies et maladies pulmonaires (Wolkoff, 2018) (Tran Le et al., 2010). De ce fait, prédire les évolutions des humidités relatives dans les enveloppes des bâtiments est d'une importance primordiale. Les transports d'humidité et transferts de chaleur dans les matériaux poreux sont inséparablement couplés, et nombreux sont les modèles qui traitent ces aspects en tenant compte des différentes formes de transport de masse (phase liquide ou vapeur). En outre, dans le béton de chanvre, les impacts des phénomènes d'hystérésis et de dépendance des isothermes de sorption à la température sur les évolutions des températures et humidité relatives au sein des parois sont toujours questionnés.

Dans ce chapitre, l'étude commence par un aperçu général sur les phénomènes de transport de masse et transferts de chaleurs dans les matériaux poreux, suivi de l'exposé de leur modélisation. La suite concerne l'implémentation et la validation de modèles numériques appliqués sur des parois en béton de chanvre en mettant l'accent sur l'hystérésis du béton de chanvre et sa thermodépendance. La modélisation de l'isotherme de sorption se fait suivant deux approches (Merakeb et Rode). Les modèles numériques qui traitent ces différents aspects sont développés et testés via le logiciel SPARK. La validité des résultats est obtenue en les comparant à ceux de la littérature : les cas expérimentaux retenus sont réalisés par Lelievre et al. (2014) et Ait Ouméziane (2013). Ensuite, des simulations numériques annuelles sont utilisées pour étudier le comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre sous les conditions météorologiques de la ville de Nancy. Enfin, une dernière partie est consacrée à l'étude de parois multicouches en béton de chanvre.

## **II.2. Phénomènes de transports dans les matériaux poreux**

### *II.2.1. Mode de transports de l'humidité dans les matériaux poreux*

Généralement, les transferts de chaleur et transports d'humidité dans les matériaux poreux sont fortement couplés mais non équivalents car le transfert thermique a une plus grande influence sur le transport de l'humidité (Min et al., 2017). Le terme « humidité » englobe en fait l'eau sous ses deux formes : liquide et vapeur. Le transport d'humidité en milieux poreux résulte d'une composition de plusieurs phénomènes à l'origine du mouvement de chacune des phases présentes (liquide et vapeur). La part de chacun de ces mécanismes sur la quantité d'eau fixée dépend particulièrement des propriétés du matériau (à savoir la porosité, la morphologie des pores, et l'état de surface des pores) et des conditions climatiques dans lesquelles il est placé. Les mécanismes de transfert de ces deux formes de l'eau sont différents. Dans le cas de la vapeur d'eau, la migration est réalisée par les gradients de la pression partielle de vapeur qui se présentent sous deux formes :

- Gradient de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment
- Différences de concentration au sein d'un matériau impliquant la variation des pressions partielles.

Dans un premier temps, il est important de définir la notion de « lpm » ou bien libre parcours moyen qui représente la distance statique parcourue par la molécule entre deux chocs moléculaires. Ainsi, suivant la taille des pores et la densité moléculaire, deux cas se présentent : dans les pores de rayon supérieur au libre parcours moyen, le transfert de vapeur sera principalement de la diffusion moléculaire. Dans les pores de rayon inférieur au libre parcours moyen, le transfert de vapeur sera de l'effusion ou ce qu'on appelle la diffusion de Knudsen (Wakao and Smith, 1962).

La diffusion moléculaire a lieu suite à une différence de concentration de la vapeur d'eau ou d'un gradient de pression partielle de la vapeur alors que la pression totale reste constante. A l'échelle d'un pore, ceci s'explique par le fait que la probabilité de chocs entre deux molécules est supérieure à celle du choc des molécules contre les parois du pore. Ce phénomène est alors prépondérant dans les pores de plus grands diamètres du matériau. La diffusion moléculaire est décrite par la loi de Fick (Fick, 1855) :

$$g_v = -D_v \nabla \rho_v \quad (\text{II.1})$$

$g_v$  étant le flux de vapeur, et  $D_v$  le coefficient de diffusion moléculaire proportionnel au libre parcours moyen. Le phénomène de diffusion moléculaire l'emporte sur l'essentiel des transferts de masse à travers des matériaux poreux du bâtiment à pression atmosphérique.

Dans le phénomène d'effusion (écoulement de Knudsen), les interactions entre les molécules disparaissent et leur vitesse est gouvernée par les collisions contre les parois du pore. La loi de transfert applicable à l'effusion est la même que pour la diffusion moléculaire à moins que le coefficient de diffusion ne soit plus proportionnel au libre parcours moyen mais au rayon du pore. Par ailleurs, les petits pores, siège de l'écoulement de Knudsen, jouent un rôle important aux fortes humidités relatives en raison de la condensation qui a lieu à ces taux d'humidité relative élevés. En effet, partant d'un état sec puis placé dans des ambiances d'humidité croissante, un matériau témoigne en premier lieu du transport d'humidité dans ses plus grands pores et de la condensation d'humidité dans ses pores les plus petits jusqu'à ce que tous les pores soient saturés d'eau pour une humidité relative égale à 100%.

D'autre part, l'eau liquide peut se transférer des manières suivantes :

- Sous l'effet d'un gradient de pression capillaire : différence de pression entre la phase liquide et la phase gazeuse dans les pores des matériaux provoquée par les ménisques des pores
- Sous l'effet d'adsorption-désorption
- Sous l'effet de la pesanteur.

L'écoulement de l'eau liquide est dû à un gradient de pression liquide au sein de l'eau. Celui-ci est dirigé dans le sens des pressions décroissantes. La densité de flux liquide est décrite par la loi de Darcy (Darcy, 1856) comme suit, avec  $K_l$  la conductivité hydraulique :

$$\mathbf{g}_l = -K_l \nabla p_l \quad (\text{II.2})$$

En introduisant la notion de pression capillaire ou pression de succion et le gradient de pression atmosphérique (Remki et al., 2012), l'équation devient :

$$\mathbf{g}_l = -K_l \nabla (p_c + p_0) \quad (\text{II.3})$$

$p_c$  étant la pression capillaire, et  $p_0$  la pression atmosphérique. Finalement, en supposant un gradient nul de pression atmosphérique, cette expression devient :

$$\mathbf{g}_l = -K_l \nabla p_c \quad (\text{II.4})$$

Elle peut également s'écrire de la manière suivante en choisissant pour potentiel moteur la teneur en eau :

$$\mathbf{g}_l = -D_w \nabla w \quad (\text{II.5})$$

### II.2.2. Transfert de chaleur dans les matériaux poreux

Le transfert de chaleur à travers le matériau est une combinaison de chaleur conductrice, convective et radiative entre les composants (Balaji et al., 2014). Une représentation schématique du mécanisme de transfert de chaleur à travers la microstructure du matériau de construction poreux est représentée sur la Figure II.1. La conduction implique un transfert de chaleur par excitation des atomes, tandis que la convection implique un transfert de chaleur à travers le mouvement de la molécule induit par une variation différentielle de température. Le transfert de chaleur par rayonnement consiste en un transfert de chaleur par échange d'énergie électromagnétique (Clyne et al., 2006).

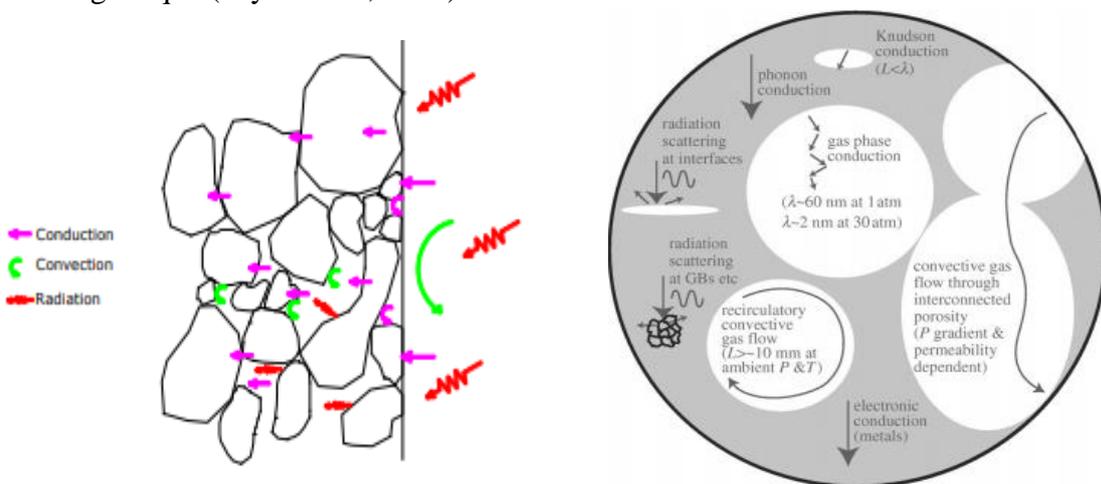


Figure II.1 : Mécanismes de transfert de chaleur à travers le matériau de construction poreux (Clyne et al., 2006)

La compréhension des transferts de chaleur à travers les matériaux de construction est un phénomène complexe dû à l'irrégularité dans la microstructure du matériau (Kaviany, 1991). Dans de tels matériaux, la chaleur se propage par conduction à travers les phases solide et fluide, par rayonnement entre les particules solides et par convection dans la phase fluide. Ces processus de transfert de chaleur complexes impliquent de nombreux composants tels que :

- La conduction thermique dans la matrice solide / particules,
- La conduction thermique à travers le fluide interstitiel (air ou eau),
- La conduction de la chaleur dans les micro-interstices existant entre les particules,
- La conduction de chaleur par contact de particules,
- Le transfert de chaleur à travers le fluide interstitiel,
- Le rayonnement à partir des surfaces solides des pores (rayonnement de particules à particules dans les pores)

### *II.2.3. Modélisation des transports de masse et de chaleur dans les matériaux poreux*

Les modèles couplés de transfert de chaleur et de masse dans les matériaux poreux de construction sont abordés dans plusieurs travaux de recherche de la littérature. La différence majeure entre ces modèles remonte aux variables d'états mises en question : généralement la température et la teneur en eau représentée par l'humidité relative, ou par la teneur massique ou volumique de l'eau, ou par la pression de saturation de vapeur dans le matériau. Ceci dépend de la théorie expliquant le potentiel de transport dans chacun de ces cas.

L'étude du couplage dans les milieux poreux multiphasiques et non isothermes a été initialement développée dans les milieux rigides, les phases étant le liquide et le gaz (Ghasemzadeh, 2006). Rollins (1954) a présenté un modèle en supposant que les transferts se produisent uniquement dans la vapeur d'eau. Philip and De Vries (1957) ont considéré les matériaux poreux comme une « boîte noire » dans laquelle les transferts ont lieu sous les gradients de température et de teneur en eau dans les phases liquide et vapeur. Cette technique de calcul, dérivée des méthodes de processus irréversibles de la thermodynamique, aboutit à l'équation de transport d'humidité comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla(k_u \nabla_u + k_T \nabla_T) \quad (\text{II.6})$$

$u$  étant la teneur massique en eau dans le matériau ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $T$  la température ( $^{\circ}\text{C}$ ) et  $k_U$  et  $k_T$  les coefficients de transport sous un gradient de teneur en eau et sous gradient de température respectivement. En 1958, De Vries (1958) l'a étendue en adoptant une approche mécanique basée sur l'interaction du liquide, de la vapeur d'eau et de la structure poreuse au niveau microscopique, dans laquelle le transfert sensible de chaleur ainsi que celui dégagé pendant l'adsorption sont modélisés.

Luikov (1966) s'est basé de son côté sur les méthodes phénoménologiques des processus thermodynamiques irréversibles pour développer des théories alternatives à celle de Philip et de Vries (1957) : le potentiel capillaire vient remplacer la teneur volumique en eau dans les

diverses formulations du fait que cette dernière est discontinue entre les matériaux. L'utilisation de la pression capillaire ou de succion dans le milieu non saturé comme une des variables d'état dans la modélisation a fait l'objet des travaux de recherche de Sophocleous (1979) et Milly (1982). L'approche de Philip and De Vries (1957) apparaît aussi dans les travaux de Crausse (1983) avec des efforts concentrés sur la détermination des coefficients de transports et une hypothèse de validité de l'approche pour les matériaux de construction homogènes ou à base de sable, excluant les composants en multicouches.

De plus, D.M Burch and W.C Thomas, (1991) ont développé un modèle de calcul utilisant la méthode des différences finies, capable d'estimer les transferts de chaleur et de masse à travers des parois composites dans des conditions non isothermes. Künzl Hartwig (1995) a étudié un modèle dans lequel les phénomènes de transports sont dus aux gradients de l'humidité relative et de la température en se basant sur la théorie de Kießl (1983).

Plus tard, Mendes (1997) a montré un modèle basé sur la théorie de Philip and De Vries (1957) avec des hypothèses similaires à celles de Künzl, mais cette fois le transfert d'humidité est régi par un gradient de teneur en humidité volumique. Ainsi, le modèle d'Umidus (Mendes et al., 1999) est créé: les régimes par diffusion de vapeur et capillarité sont pris en compte et le transfert d'eau dans les phases vapeur et liquide à travers le matériau peut être analysé pour tout type de climat. Ce même phénomène est abordé en 1989 par Kerestecioglu and Gu. (1989) à l'aide de la théorie de l'évaporation-condensation au niveau du flux liquide insaturé. De plus, le modèle développé par Ozaki et al. (2001) prend en compte les transferts d'humidité dans les phases liquide et vapeur couplés à la chaleur générée par le changement de phase dû au processus d'absorption de l'humidité.

## **II.3. Modélisation numérique**

### *II.3.1. Outil de simulation numérique SPARK*

Le logiciel SPARK « Simulation Problem Analysis and Research Kernel » est créé au laboratoire national Lawrence Berkeley en Californie depuis 1997 et développé à l'Université de La Rochelle et à l'Université de Reims. C'est un environnement orienté objet où la modélisation s'effectue sous forme des équations à la place des algorithmes, ce qui lui attribue une interface plus libre et pratique à gérer (Sowell and Haves, 2001).

Les composants sont indépendants des entrées et sorties, c'est-à-dire que les mêmes modèles de composants peuvent être utilisés pour différentes désignations d'entrée et de sortie. Ceci permet une séparation conceptuelle du modèle par rapport au problème : le modèle est général et un problème spécifique n'est défini que lorsqu'un ensemble d'entrées choisies est appliqué.

En outre, SPARK permet de décomposer le problème en composants solubles séparément dans lesquels les objets, les équations ou groupes d'équations sont définis d'une manière générale dans des classes. Les objets les plus élémentaires sont représentés par une seule équation et forment les classes microscopiques. Les classes macroscopiques contiennent les systèmes et sous-systèmes d'équations et font appel aux autres classes microscopiques. L'assemblage du système complet se fait par la connexion des classes correspondantes et le modèle est ensuite généré à travers un fichier d'extension « .pr ». SPARK parcourt ce fichier et crée un problème

en langage C++ qui sera compilé et lié à la librairie de résolution numérique pour produire un fichier exécutable d'extension « .exe ». Un schéma de la méthodologie de résolution sur SPARK est présenté sur la Figure II.2.

Dans chaque composant, si aucune séquence directe n'est possible, un petit « ensemble de coupures » est exécuté afin de minimiser le nombre de variables impliquées dans l'itération suivante en faisant appel à plusieurs méthodes de résolution parmi lesquelles la méthode de résolution itérative de Newton-Raphson. A la suite de ces réductions, la taille de la matrice jacobienne, et donc l'ensemble linéaire qui doit être résolu à chaque itération est réduite, souvent de façon significative. Par conséquent, la vitesse de la solution est considérablement augmentée. Sowell and Haves (2001) montrent l'efficacité de SPARK dans la résolution des systèmes d'équations différentielles complexes en utilisant la méthode des différences finies. Un exemple de discrétisation d'une paroi de deux couches A et B est détaillé dans la Figure II.3.

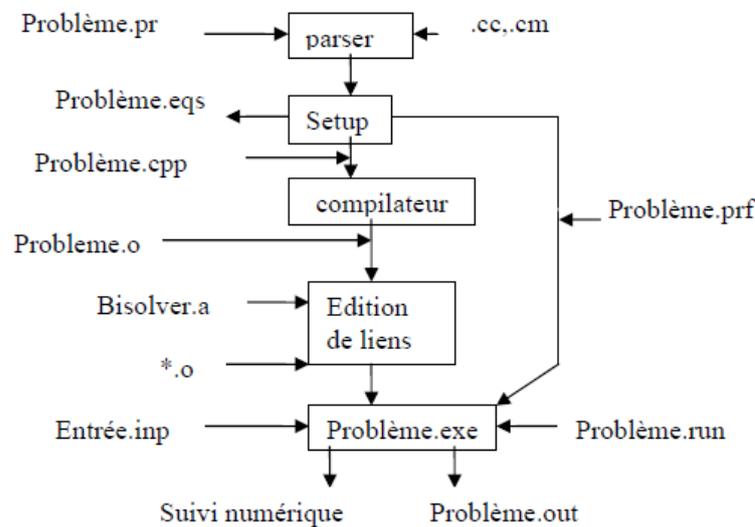


Figure II.2 : Construction d'un modèle numérique sous SPARK (Sowell and Haves, 2001)

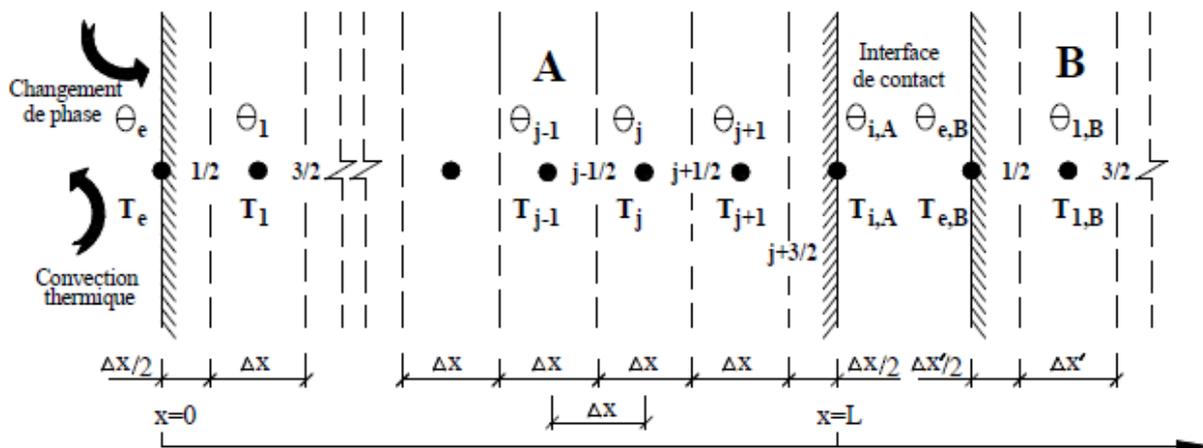


Figure II.3 : Exemple de discrétisation par la méthode des différences finies (Tran Le, 2010)

### II.3.2. Modélisation des transports de masse et de chaleur dans les matériaux poreux

Dans la suite, le modèle d'Umudus (Mendes et al., 1999) décrivant les mécanismes de transport de l'humidité au sein du béton de chanvre sous les formes liquides et vapeur, est utilisé. Ainsi, l'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (\text{II.7})$$

Avec les conditions aux limites suivantes ( $x = 0$  et  $x = L$ ,  $L$  étant la largeur de la paroi) :

$$-\rho_l \left( D_T \frac{\partial T}{\partial X} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \Big|_{x=0,e} = h_{M,e} (\rho_{v,a,e} - \rho_{v,s,e}) \quad (\text{II.8})$$

$$-\rho_l \left( D_T \frac{\partial T}{\partial X} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \Big|_{x=L,i} = h_{M,i} (\rho_{v,s,i} - \rho_{v,a,i}) \quad (\text{II.9})$$

« e » et « i » sont respectivement les côtés extérieur et intérieur des parois, « s » leur surface, « a » fait référence à l'air ambiant, « v » à la vapeur d'eau et « l » à l'eau en phase liquide

Tels que :

$$D_T = D_{Tl} + D_{Tv} \quad (\text{II.10})$$

$$D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta v} \quad (\text{II.11})$$

où  $D_{Tl}$  est le coefficient de transport liquide associé à un gradient de température,  $D_{Tv}$  est le coefficient de transport vapeur associé à un gradient de température,  $D_{\theta l}$  est le coefficient de transport liquide associé à un gradient d'humidité,  $D_{\theta v}$  est le coefficient de transport vapeur associé à un gradient d'humidité,  $D_T$ , est le coefficient de transport de masse associé à un gradient de température et  $D_\theta$ , le coefficient de transport de masse associé à un gradient d'humidité. Leur calcul se fait en se basant sur la démarche de Crausse et al. (1996) comme suit :

$$D_\theta = \frac{\delta_a P_{vs}}{\mu \rho_0} \frac{1}{\xi} \quad (\text{II.12})$$

$\xi$  étant la pente de la courbe de sorption.

Le coefficient de transport de vapeur sous gradient de température est donné par la relation :

$$D_{Tv} = \varphi \frac{\delta_a}{\rho_l \mu} \frac{dP_{vs}}{dT} \quad (\text{II.13})$$

Le transport de liquide sous gradient de température est négligé.

L'équation de conservation de l'énergie prend en considération la chaleur due aux phénomènes d'adsorption et de désorption comme suit :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \rho_l \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right) \quad (\text{II.14})$$

$$C_p = C_{p0} + C_{p1} \frac{\rho_l}{\rho_\theta} \theta \quad (\text{II.15})$$

$C_p$  est la capacité spécifique moyenne qui prend en considération la capacité thermique du matériau sec et la contribution de la capacité thermique de la phase liquide.  $\lambda$  est la conductivité thermique du matériau.

Les conditions aux limites comprennent les échanges convectifs, radiatifs, ainsi que la chaleur libérée par changement de phase :

$$\begin{aligned} & -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0,e} - L_v \rho_l \left( D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,e} \\ & = h_{T,e} (T_{a,e} - T_{s,e}) + L_v h_{M,e} (\rho_{ve,a,e} - \rho_{ve,s,e}) + \Phi_{ray,e} \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

### II.3.3. Modélisation des isothermes de sorption et de l'hystérésis du béton de chanvre

Comme indiqué dans le chapitre précédent, la courbe de sorption est d'une grande importance pour un matériau poreux car elle définit son identité hydrique. La littérature ne manque pas de modèles théoriques proposés afin de modéliser les courbes d'adsorption et de désorption relatives à ces matériaux (Zhang, 2014). De ce fait, et pour couvrir de larges plages d'humidités relatives et modéliser simultanément le phénomène d'hystérésis entre les courbes principales, deux approches empiriques de modélisation applicables pour le bois sont abordées : la première de Merakeb (Merakeb et al., 2009b) et la deuxième celle de Rode (Rode and Clorius, 2004).

#### II.3.2.1. Approche de Merakeb

Le modèle de Merakeb est bien adapté pour les matériaux cellulosiques et trouve plusieurs applications sur le bois. Dans son approche, Merakeb étudie la thermodynamique de l'équilibre de phase de l'eau avec sa pression de vapeur saturante. Cet équilibre est exprimé par la relation suivante :

$$\Delta H_s = R \times T \times \ln(\varphi) + H_s \quad (\text{II.17})$$

où  $H_s$  et  $\Delta H_s$  représentent l'enthalpie de référence et l'enthalpie molaire respectivement. L'adsorption des molécules d'eau est un phénomène exothermique (Brunauer et al., 1940) qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur  $\Delta H_s$  lié à la teneur en eau dans le matériau comme suit :

$$\Delta H_s = A \times \ln \left( \frac{u}{u_s} \right) \quad (\text{II.18})$$

où  $u_s$  est la teneur en eau à saturation dans le matériau et  $A$  une constante thermodynamique. A partir de l'égalité entre les équations (II.17) et (II.18), une expression entre la teneur en eau

dans le matériau et l'humidité relative de l'ambiance pourrait être déduite. Cette corrélation est régie par une loi linéaire pondérée par une exponentielle.

$$\ln\left(\frac{\mathbf{u}}{\mathbf{u}_s}\right) = \mathbf{a} \times \ln(\boldsymbol{\varphi}) \times \exp(\mathbf{b}\boldsymbol{\varphi}) \quad (\text{II.19})$$

La teneur massique  $\mathbf{u}$  en eau dans le matériau ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) et sa teneur volumique  $\boldsymbol{\theta}$  ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ) sont reliées par la corrélation suivante :

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{u} \times \frac{\rho_0}{\rho_1} \quad (\text{II.20})$$

Ainsi, le modèle de Merakeb pourrait être régi par l'équation (II.21) ci-dessous :

$$\ln\left(\frac{\boldsymbol{\theta}}{\boldsymbol{\theta}_s}\right) = \mathbf{a} \times \ln(\boldsymbol{\varphi}) \times \exp(\mathbf{b}\boldsymbol{\varphi}) \quad (\text{II.21})$$

Cependant, les équations précédentes ne tiennent pas compte des phénomènes cycliques de variations aléatoires de l'humidité relative de l'ambiance. Ainsi, la modélisation de l'hystérésis entre les deux courbes principales d'adsorption et de désorption est nécessaire. Afin de décrire les courbes de sorption sur n'importe quelle plage d'humidité relative, il est nécessaire d'ajouter un terme de raccord (Merakeb et al., 2009) entre les isothermes d'adsorption et de désorption. L'équation (II.19) est donc modifiée et devient :

$$\ln\left(\frac{\mathbf{u}}{\mathbf{u}_s}\right) = \mathbf{a} \cdot \ln(\boldsymbol{\varphi}) \cdot \exp(\mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\varphi}) + \Delta\mathbf{a} \cdot \ln(\boldsymbol{\varphi}) \cdot \exp(\Delta\mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\varphi}) \quad (\text{II.22})$$

$\Delta\mathbf{a}$  et  $\Delta\mathbf{b}$  sont définis selon les phases d'adsorption (s) et de désorption (d). Soit  $(\varphi_0 ; u_0)$  l'état correspondant au point d'équilibre lors d'une inversion de sens de variation de  $\varphi$ , les coefficients  $\Delta\mathbf{a}$  et  $\Delta\mathbf{b}$  sont alors définis comme suit :

$$\Delta\mathbf{a}_s = \frac{\ln\left(\frac{u_0}{u_s}\right) - \mathbf{a}_s \times \ln(\varphi_0) \times \exp(\mathbf{b} \cdot \varphi_0)}{\ln(\varphi_0) \times \exp(\Delta\mathbf{b}_s \cdot \varphi_0)} \quad (\text{II.23})$$

$$\Delta\mathbf{b}_s = \ln\left(\frac{\ln\left(\frac{u_0}{u_s}\right)}{\mathbf{a}_s \times \ln\varphi_0}\right) \times \frac{1}{\varphi_0} \quad (\text{II.24})$$

$$\Delta\mathbf{a}_d = \frac{\ln\left(\frac{u_0}{u_s}\right) - \mathbf{a}_d \times \ln(\varphi_0) \times \exp(\mathbf{b} \cdot \varphi_0)}{\ln(\varphi_0) \times \exp(\Delta\mathbf{b}_d \cdot \varphi_0)} \quad (\text{II.25})$$

$$\Delta\mathbf{b}_d = \ln\left(\frac{\ln\left(\frac{(u_{0d} - u_{0s})}{u_s}\right)}{\mathbf{a}_d \times \ln\varphi_0}\right) \times \frac{1}{\varphi_0} \quad (\text{II.26})$$

### II.3.2.2. Approche de Rode

La modélisation des isothermes de sorption d'après Rode s'appuie sur une approche empirique qui a fait l'objet des travaux de Hansen (1986). L'équation générale des courbes en question est donnée par :

$$\frac{u}{u_s} = \left(1 - \frac{\ln \varphi}{A}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad (\text{II.27})$$

La corrélation (II.20) permet de passer aux teneurs volumiques en eau pour donner :

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left(1 - \frac{\ln \varphi}{A}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad (\text{II.28})$$

L'approche empirique de Pedersen (Pedersen, 1990) sert à décrire le phénomène d'hystérésis rencontré entre l'adsorption et la désorption du bois. Elle se base sur les valeurs pondérées de la capacité hydrique, autrement dit, sur les pentes des courbes d'adsorption et de désorption données par :

$$\xi_a = \frac{\partial u_a}{\partial \varphi} \quad (\text{II.29})$$

$$\xi_d = \frac{\partial u_d}{\partial \varphi} \quad (\text{II.30})$$

Où a et d représentent respectivement l'adsorption et la désorption,  $\varphi$  l'humidité relative en %, et  $u_a$  et  $u_d$  les teneurs massiques en eau ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ). Avec cette approche et compte tenu de l'équation (II.20), les pentes des courbes intermédiaires entre adsorption et désorption sont calculées à partir des isothermes de sorption principales comme suit,  $\gamma_a$  et  $\gamma_d$  étant deux constantes de calibration :

$$\xi_{\text{hys,a}} = \frac{\gamma_a(\theta - \theta_a)^2 \xi_d + (\theta - \theta_d)^2 \xi_a}{(\theta_d - \theta_a)^2} \quad (\text{II.31})$$

$$\xi_{\text{hys,d}} = \frac{(\theta - \theta_a)^2 \xi_d + \gamma_d(\theta - \theta_d)^2 \xi_a}{(\theta_d - \theta_a)^2} \quad (\text{II.32})$$

Le phénomène d'hystérésis dans le bois est illustré dans la Figure II.4 suivante (Carmeliet et al., 2005) :

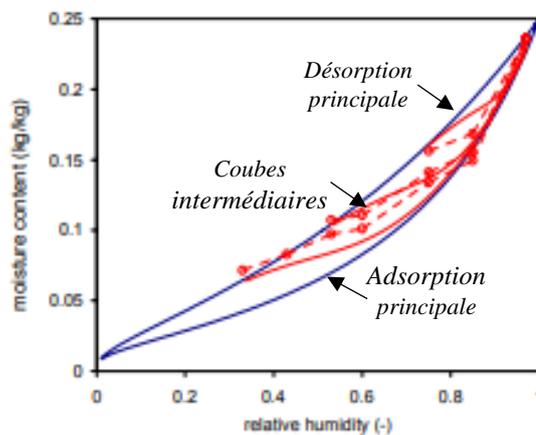


Figure II.4 : Schématisation de l'hystérésis dans le bois (Carmeliet et al., 2005)

### II.3.2.3. Identification de l'hystérésis dans la modélisation

Quelle que soit l'approche utilisée (Merakeb ou Rode), la modélisation de l'hystérésis du béton de chanvre ne se limite pas à implémenter les classes atomiques relatives aux équations d'adsorption, de désorption et aux courbes intermédiaires de sorption, mais à tenir compte de l'historique du comportement hydrique du matériau pour identifier le passage d'un cycle d'adsorption à un autre de désorption. Ainsi, cette identification est effectuée en analysant les signes mathématiques de la variation de la teneur en eau aux pas de temps « i », « i - 1 », « i - 2 » et « i - 3 » comme suit :

- Si  $\theta_i > \theta_{i-1}$  et  $\theta_{i-1} < \theta_{i-2}$  et  $\theta_{i-2} < \theta_{i-3}$  et on est en mode de désorption, alors le passage aura lieu de la désorption en adsorption
- Si  $\theta_i < \theta_{i-1}$  et  $\theta_{i-1} > \theta_{i-2}$  et  $\theta_{i-2} > \theta_{i-3}$  et on est en mode d'adsorption, alors le passage aura lieu de l'adsorption en désorption.
- Sinon, le même mode sera gardé.

Pour l'approche de Rode, une condition supplémentaire s'ajoute sur la pente de la courbe intermédiaire en désorption pour garantir l'évolution des courbes secondaires entre les courbes d'adsorption et de désorption principales.

### II.3.4. Modélisation de la thermodépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre

La dépendance des isothermes de sorption à la température est évaluée en mesurant au moins deux séries de données à deux températures différentes et en extrapolant les allures expérimentales avec un modèle de thermodépendance ou une approche thermodynamique. La limitation principale rencontrée est le temps relativement long mis pour mesurer les isothermes de sorption à chaque température. Surpasser ce problème est possible en mesurant la chaleur isostérique de sorption du béton de chanvre et en l'utilisant pour évaluer l'isotherme de sorption à une autre température à partir de celle mesurée à une température de référence donnée. C'est le principe de base de l'approche de Poyet et Charles (Poyet and Charles, 2009) utilisée dans la suite. Elle fait introduire l'équation de Clausius-Clapeyron suivante :

$$\varphi_2(T_2, \theta) = \varphi_1(T_1, \theta) \frac{P_{\text{sat}}(T_1)}{P_{\text{sat}}(T_2)} e^{q_{\text{st}}(\theta) \frac{M_1}{R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)} \quad (\text{II.33})$$

avec  $M_1$  la masse molaire de l'eau ( $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $R$  la constante des gaz parfaits ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), et  $P_{\text{sat}}$  la pression de saturation de la vapeur d'eau (Pa). La chaleur isostérique de sorption est déterminée expérimentalement par Aït Oumeziane et al. (2016). Le modèle proposé par Poyet ainsi qu'un modèle exponentiel de corrélation sont montrés sur la Figure II.6. L'implémentation du modèle de la thermodépendance se fait suivant deux approches différentes en partant de l'équation de Clausius-Clapeyron de base (II.33) :

- Les humidités relatives à 5°C, 15°C et 30°C sont calculées à partir des valeurs de référence données à 23°C par l'équation (II.33). De nouvelles courbes de sorption sont ainsi obtenues pour les trois températures choisies. Par conséquent, pour chacune des

températures, les coefficients des courbes de sorption sont calés par la méthode des moindres carrées, que ce soit pour l'approche de Merakeb ou celle de Rode. Ayant ces coefficients pour des températures différentes, des corrélations en fonction de la température sont déduites et implémentées dans les équations des courbes de sorption. Cette approche est détaillée pour Merakeb et Rode en annexe 1.

- La deuxième approche consiste à implémenter directement l'équation de Clausius-Clapeyron (II.33) dans une classe atomique du logiciel SPARK en utilisant le modèle exponentiel de corrélation pour la chaleur isostérique de sorption et donné en  $\text{MJ.kg}^{-1}$  par l'équation (II.34) (voir Figure II.5). Son avantage par rapport à l'approche précédente est qu'elle est capable de couvrir une plage de température plus large et qui n'est pas limitée à la plage ( $5^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ ).

$$q_{st}(\theta) = 1,2384 \times e^{(-8,1405\theta)} + 2,45 \quad (\text{II.34})$$

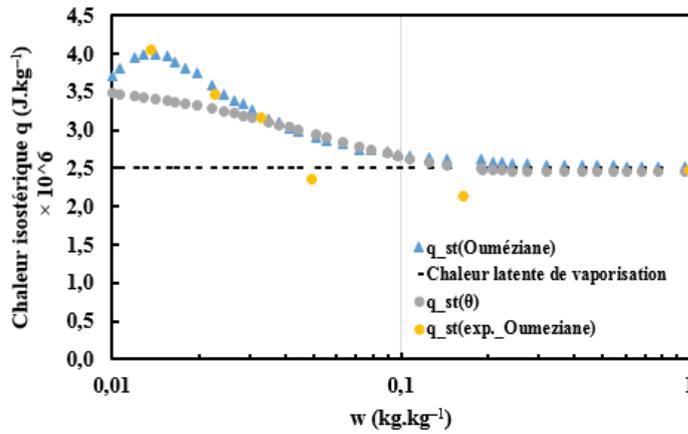


Figure II.5 : Chaleur isostérique de sorption

L'implémentation du modèle de thermodépendance nécessite la création d'une nouvelle classe atomique qui calcule les pentes des courbes de sorption en fonction de la température ainsi que la modification du coefficient de transport de vapeur sous gradient de la teneur en eau qui sera calculé comme suit (Crausse, 1983 ; Dubois, 2014) :

$$D_{\theta v} = \frac{1}{\xi} \times \frac{D_{Tv} \times P_{vs}}{\varphi \times \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} + P_{vs} \times \frac{1}{\xi} \times \xi_T} \quad (\text{II.35})$$

$\xi$  et  $\xi_T$  étant respectivement les pentes des courbes de sorption principales et en fonction de la température.

#### II.4. Application au béton de chanvre

Les isothermes de sorption du béton de chanvre sont mesurées expérimentalement à une température de  $23^{\circ}\text{C}$  dans les travaux de Lelievre et al. (2014) et Lelievre (2015) par la méthode gravimétrique en se basant sur la norme ISO 12571. Sauf indications contraires, les propriétés

du béton de chanvre utilisées dans les simulations sont résumées dans le Tableau II.1 (Lelievre et al., 2014) :

Propriétés	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	Capacité thermique (J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Emissivité (-)	Coefficient de résistance à la vapeur (-)
Béton de chanvre	$\rho = 450$	$C_p = 1000$	$\lambda = 0,00818 + 2,76 \times 10^{-4}T + 0,0024w$	$\varepsilon = 0,8$	$\mu = 5$

Tableau II.1 : Propriétés du béton de chanvre (Lelievre et al., 2014)

Quatre modèles numériques sont créés et implémentés sous le logiciel SPARK, dont chacun traite un aspect physique de modélisation. Le Tableau II.2 suivant représente les caractéristiques des modèles numériques testés.

Modèle	Caractéristiques
Mod_1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modèle standard de transferts de chaleur et masse</li> <li>▪ Utilisation de la courbe moyenne de sorption</li> <li>▪ Initialisation à 23°C et 50% d'humidité relative</li> </ul>
Mod_2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prise en compte de l'hystérésis</li> <li>▪ Implémentation des courbes principales et intermédiaires de sorption</li> <li>▪ Initialisation à 23°C et 50% d'humidité relative</li> </ul>
Mod_3	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prise en compte de la thermodépendance des isothermes de sorption</li> <li>▪ Utilisation de la courbe moyenne de sorption modifiée (en fonction de la température)</li> <li>▪ Initialisation à 23°C et 50% d'humidité relative</li> </ul>
Mod_4	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modèle complet qui tient compte de l'hystérésis et de la thermodépendance des courbes de sorption</li> <li>▪ Initialisation à 23°C et 50% d'humidité relative</li> </ul>

Tableau II.2 : Caractéristiques des modèles numériques testés

#### II.4.1. Approche de Merakeb

En considérant l'approche de Merakeb, les coefficients  $\theta_s$ , a, et b sont tout d'abord calculés par la méthode des moindres carrés sur la courbe d'adsorption. En fixant  $\theta_s$  et b, la courbe de désorption est déterminée.  $\theta_s$  est alors fixée à 0,081 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> ce qui correspond à une teneur en eau à saturation de 0,18 kg.kg<sup>-1</sup>. Avec cette valeur, les coefficients a et b sont de nouveau calés sur la courbe moyenne de sorption. Le Tableau II.3 et la Figure II.6 montrent le calage des isothermes de sorption selon l'approche de Merakeb.

Isotherme	a	b	$\theta_s$
Adsorption	1,135	1,775	0,081
Désorption	0,399	1,775	0,081
Moyenne	0,615	1,915	0,081

Tableau II.3 : Coefficients des équations des isothermes suivant l'équation de Merakeb

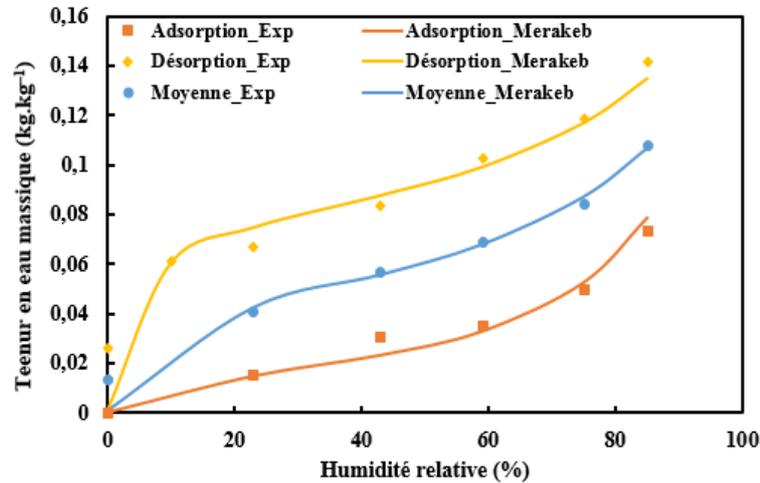


Figure II.6 : Calage des isothermes de sorption selon le modèle de Merakeb

Ayant été validé pour le bois, le modèle à hystérésis (Mod\_2) avec l'approche de Merakeb est calibré à travers un nouveau coefficient de calibrage  $k = 1,48$  qui divise les équations (II.24) et (II.26) afin de l'adapter au béton de chanvre. Ceci se fait suivant la comparaison des variations de masse expérimentale ( $\Delta m_{exp}$ ) et numérique ( $\Delta m_{Mod\_2}$ ) d'un échantillon en béton de chanvre soumis aux conditions de NordTest Protocol comme le montre la Figure II.7.

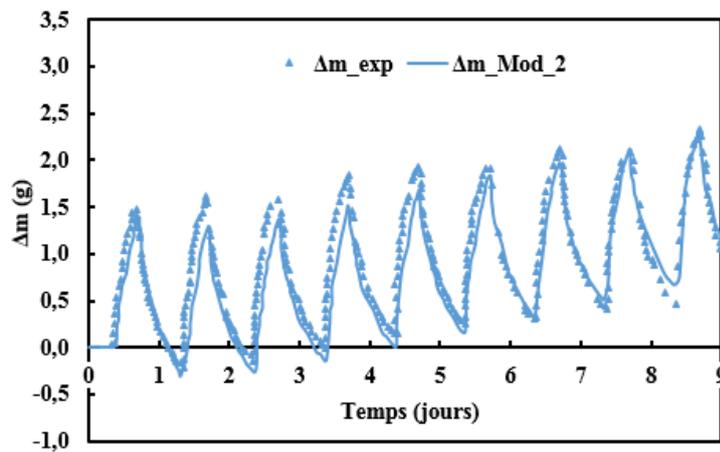


Figure II.7 : Calibrage du modèle à hystérésis (Mod\_2) avec l'approche de Merakeb

La modélisation des isothermes de sorption à différentes températures pour tenir compte de leur thermodépendance utilisant la première approche de Merakeb permet de dresser les courbes à quatre températures choisies (Figure II.8). Les étapes de calcul et les corrélations obtenues en fonction de la température sont détaillées en annexe 1. L'observation que les courbes de sorption sont déplacées vers le bas à des températures plus élevées est validée.

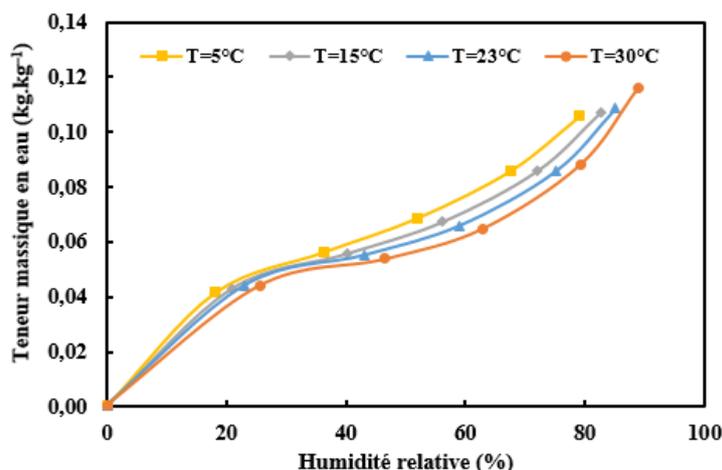


Figure II.8 : Thermodépendance des isothermes avec l'approche de Merakeb

#### II.4.2. Approche de Rode

Pour l'approche de Rode, en appliquant de même la méthode des moindres carrées, les coefficients  $\theta_s$ , A et n sont déterminés et les équations des isothermes de sorption sont calées comme montré dans le Tableau II.4 et Figure II. 9 suivants.

Isotherme	A	n	$\theta_s$
Adsorption	0,129	1,155	0,065
Désorption	0,647	1,623	0,065
Moyenne	0,176	1,670	0,070

Tableau II.4 : Coefficients des équations des isothermes suivant l'approche de Rode

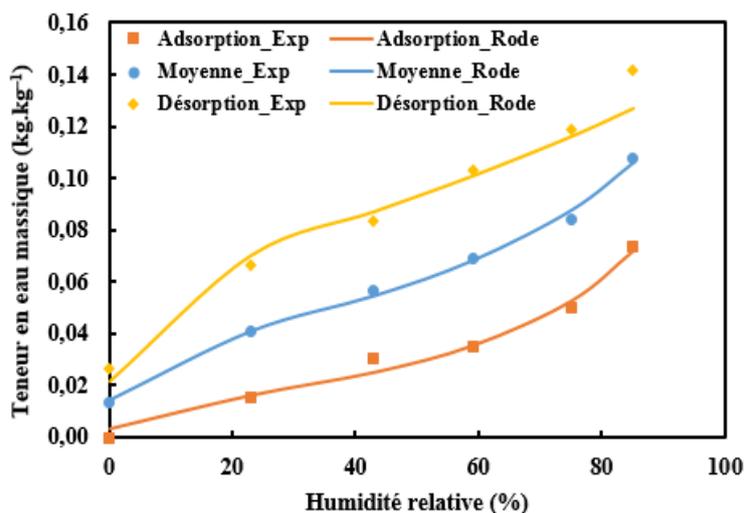


Figure II. 9 : Calage des isothermes de sorption selon le modèle de Rode

Le calage du modèle à hystérésis (Mod\_2) avec l'approche de Rode est fait pour le bois en prenant  $\gamma_a = \gamma_d = 0,1$  (Rode and Clorius, 2004). Dans le cas du béton de chanvre, il est effectué de manière identique à celle du modèle de Merakeb à l'aide des variations de masse

expérimentale ( $\Delta m_{exp}$ ) et numérique ( $\Delta m_{Mod\_2}$ ) d'un échantillon en béton de chanvre et suivant le même NordTest Protocol de Lelievre et al. (2014). Les résultats montrent une grande sensibilité au paramètre  $\gamma_d$ , et finalement les valeurs  $\gamma_a = 0,85$  et  $\gamma_d = 0,97$  sont retenues dans la suite (Figure II.10).

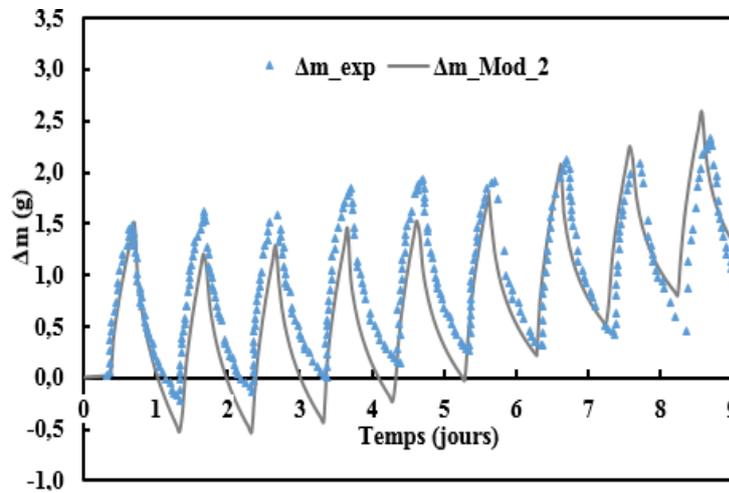


Figure II.10 : Calibration du modèle à hystérésis (Mod\_2) avec l'approche de Rode

La prise en compte de la dépendance à la température avec l'approche de Rode est effectuée suivant le même principe de la section II.4.2 et qui est aussi détaillée en annexe 1. Les nouvelles courbes de sorption à plusieurs températures sont montrées sur la Figure II.11.

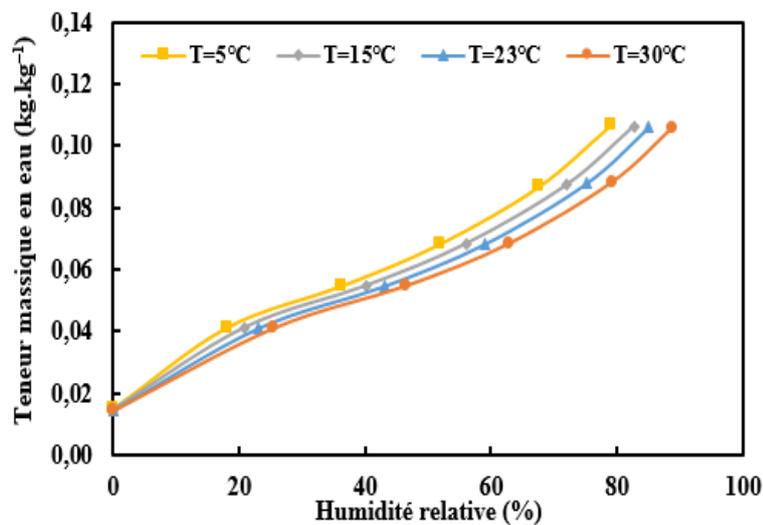


Figure II.11 : Thermodépendance des isothermes avec l'approche de Rode

L'observation préliminaire de la Figure II.11 confirme la translation des courbes de sorption vers le bas en passant à une température plus élevée.

## II.5. Applications numériques (Costantine et al., 2016)

### II.5.1. Application de l'approche de Merakeb avec le protocole NordTest :

Suite au protocole NordTest appliqué sur un échantillon en béton de chanvre de dimensions  $148 \times 148 \times 100 \text{ mm}^3$  (Lelievre, 2015), les températures et humidités relatives à deux endroits de l'éprouvette ( $x = 14 \text{ mm}$  et  $x = 50 \text{ mm}$ ) sont exploitées. La comparaison s'établit entre les données expérimentales et numériques de COMSOL (Figures II.12 et II.14) et celles fournies par le modèle à hystérésis (Mod\_2) sous SPARK (Figures II.13 et II.15).

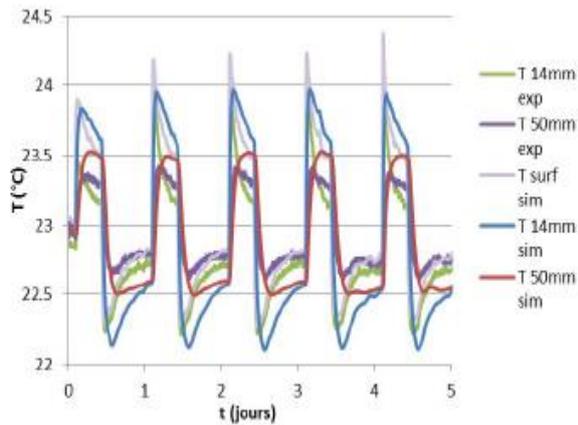


Figure II.12 : Températures mesurées et simulées (COMSOL)(Lelievre, 2015)

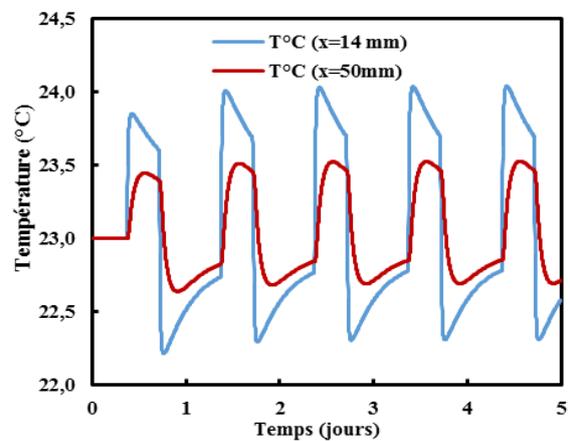


Figure II.13 : Températures simulées (SPARK)

Les observations montrent que les sorties de températures de SPARK collent bien avec les sorties de COMSOL surtout du côté intérieur ( $x = 50 \text{ mm}$ ) avec un léger écart qui ne dépasse pas  $0,2^\circ\text{C}$  en  $x = 14 \text{ mm}$ . Cependant, les deux logiciels n'arrivent pas à reproduire à l'identique les variations expérimentales des températures avec un écart qui reste dans les limites de la précisions des capteurs ( $\leq 0,5^\circ\text{C}$ ).

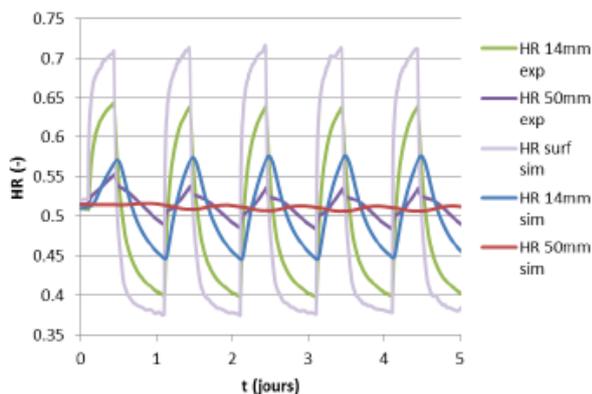


Figure II.14 : Humidités relatives mesurées et simulées (COMSOL)(Lelievre, 2015)

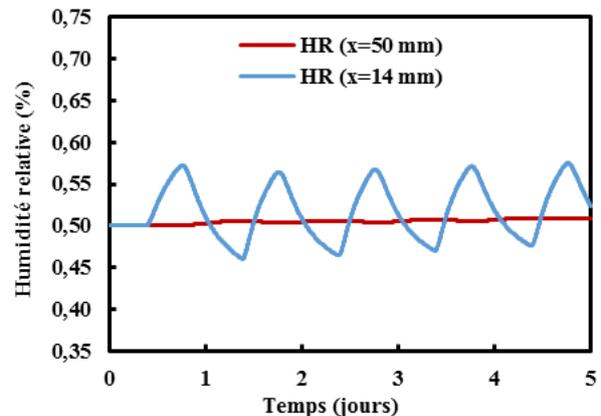


Figure II.15 : Humidités relatives simulées (SPARK)

Des remarques similaires sont constatées pour les humidités relatives à ces deux endroits examinés, l'écart avec l'expérimental atteignant un pourcentage de 8% (supérieur à 5%, seuil de la précision des capteurs). L'amplitude des variations est amortie dans les cas numériques autour d'une valeur moyenne compatible à l'expérimental.

### II.5.2. Validation à l'échelle de la paroi en utilisant l'approche de Merakeb

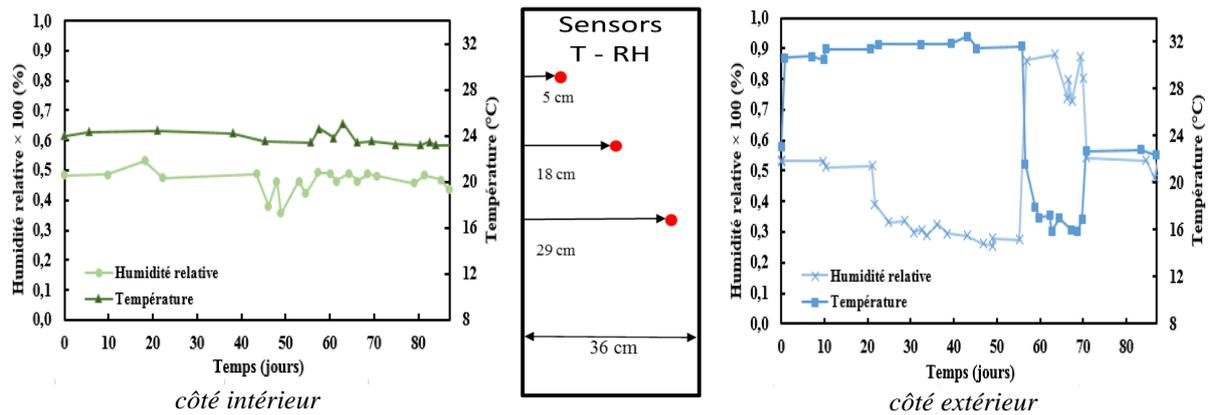


Figure II.16 : Conditions expérimentales et emplacement des sondes dans la paroi (Lelievre et al., 2014)

Dans cette section, l'étude se base sur une paroi simple de 36 cm d'épaisseur en béton de chanvre, assujettie pendant 87 jours à des conditions de température et d'humidité relative des deux côtés intérieur et extérieur comme montré sur la Figure II.16. Des sondes spécifiques relèvent les températures et humidités relatives à trois emplacements de la paroi :  $x=5$  cm (côté intérieur),  $x=18$  cm (au milieu) et  $x=29$  cm (côté extérieur) (Lelievre et al., 2014). Les conditions expérimentales ainsi que la paroi et les capteurs mis en œuvre sont schématisés dans la Figure II.16. Le comportement hygrothermique du béton de chanvre est questionné en comparant ces relevés aux résultats de la simulation numérique en utilisant les quatre modèles différents du Tableau II.2. A noter que pour le modèle à hystérésis (Mod\_2), l'initialisation se fait à 50% d'humidité relative à partir de la courbe d'adsorption principale.

### II.5.2.1. Impact du maillage

L'impact du maillage sur les résultats numériques est testé. Généralement, la paroi en question, d'épaisseur  $e$  cm, est discrétisée en  $n$  nœuds, et ainsi en  $(n - 1)$  couches. L'épaisseur élémentaire «  $dx$  » de chacune des couches vaut alors :

$$dx = \frac{e}{n - 1} \quad (\text{II.36})$$

Le choix du maillage repose sur plusieurs critères, à savoir la précision du calcul, la convergence des résultats et le temps de calcul nécessaire. Trois types de maillages sont examinés : 10 nœuds, 25 nœuds et 50 nœuds pour les quatre modèles Mod\_1, Mod\_2, Mod\_3 et Mod\_4. Les résultats sont présentés du côté extérieur de la paroi étudiée ( $x=29$  cm) dans les figures suivantes, sachant qu'au milieu et du côté intérieur de la paroi, les fluctuations sont plus faibles. Des divergences de calcul sont rencontrées avec les maillages 10 et 50\_nœuds pour Mod\_4, et seul le maillage à 25\_nœuds est présenté avec ce modèle dans la section II.5.2.2.

Maillage	Mod_1 (Merakeb)	Mod_2 (Merakeb)	Mod_3 (Merakeb)	Mod_4 (Merakeb)
10_nœuds	34 sec	1 min 35 sec	55 sec	Divergence
25_nœuds	1 min 53 sec	7 min 07 sec	2 min 41 sec	10 min 25 sec
50_nœuds	08 min 52 sec	35 min 49 sec	11 min 10 sec	Divergence

Tableau II.5 : Temps de calcul nécessaire selon le maillage et le modèle (Approche de Merakeb)

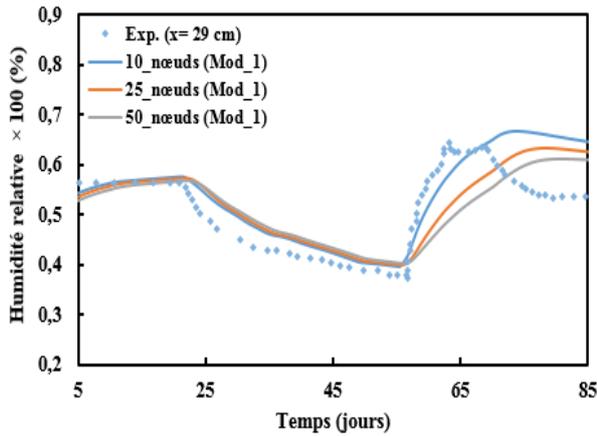


Figure II.17 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod\_1 (Merakeb)

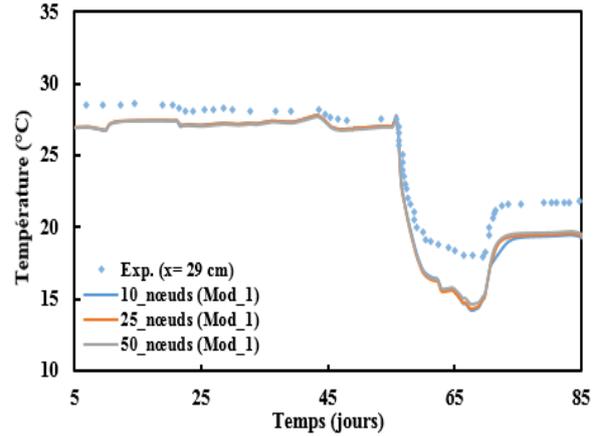


Figure II.18 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod\_1 (Merakeb)

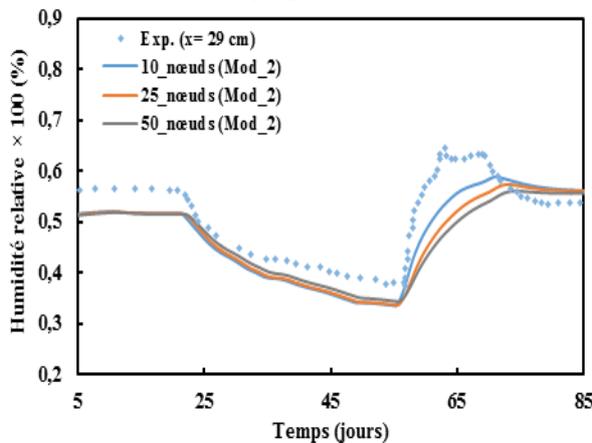


Figure II.19 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod\_2 (Merakeb)

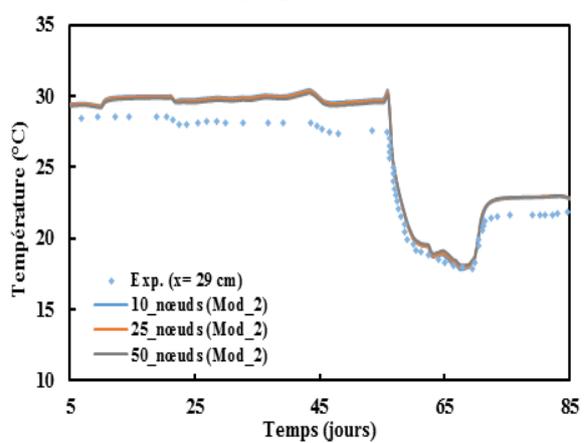


Figure II.20 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod\_2 (Merakeb)

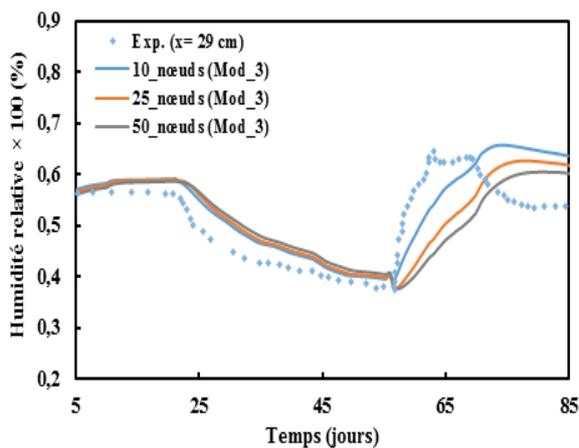


Figure II.21 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod\_3 (Merakeb)

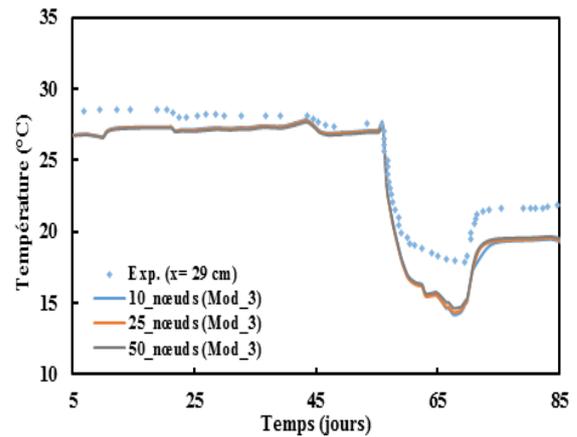


Figure II.22 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod\_3 (Merakeb)

La comparaison entre les Figures II.18, II.20 et II.22 pour les trois types de maillage montre que les températures sont très proches pour les trois modèles. Cependant, en examinant les profils d'humidité relative (Figures II.17, II.19 et II.21), les écarts sont plus remarquables. Le maillage à 10\_nœuds est adapté pour les trois modèles. De même, le maillage 25\_nœuds

présente des résultats acceptables pour les trois modèles, que ce soit en température ou bien en humidité relative. Tandis que les résultats du maillage de 50\_nœuds sont plus détériorés. Ceci s'explique par le fait que le matériau utilisé n'est pas homogène donc un maillage raffiné (50\_nœuds) n'est pas nécessaire. D'autre part, en raison du temps de calcul relativement long pour le maillage de 50\_nœuds (Tableau II.5) et vu qu'un maillage de 10\_nœuds n'est pas trop affiné pour de telles modélisations en dépit de ces bons résultats, la discrétisation de la paroi en 25 nœuds ou 24 couches semble la plus adéquate et est abordée dans la suite.

#### II.5.2.2. Comparaison des modèles numériques : conditions de (Lelievre et al. 2014)

Les simulations sont alors effectuées pour les quatre modèles numériques avec un maillage de 25 nœuds pour les conditions expérimentales de la Figure II.16. Les résultats aux trois endroits de la paroi ( $x = 5$  cm,  $x = 18$  cm et  $x = 29$  cm) sont montrés ci-dessous à partir du 5<sup>ème</sup> jour pour éliminer les effets des conditions initiales.

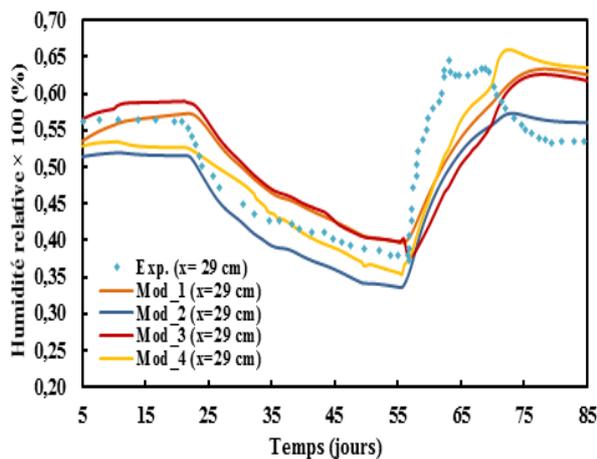


Figure II.23 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 29$  cm

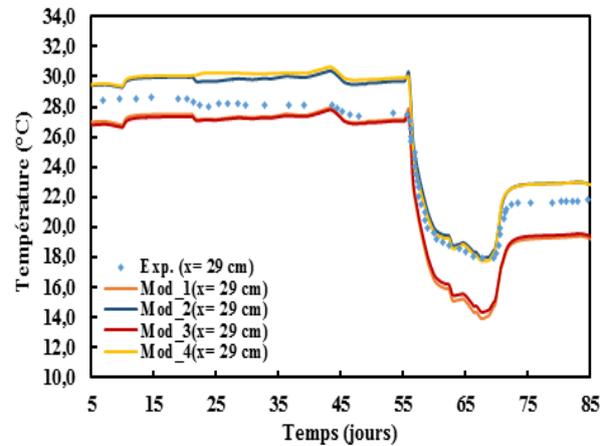


Figure II.24 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 29$  cm

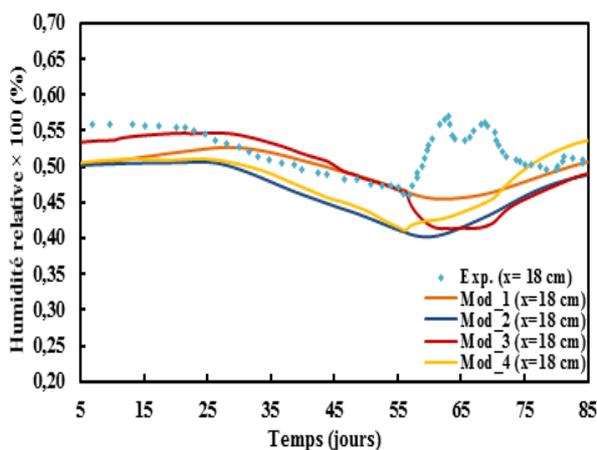


Figure II.25 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 18$  cm

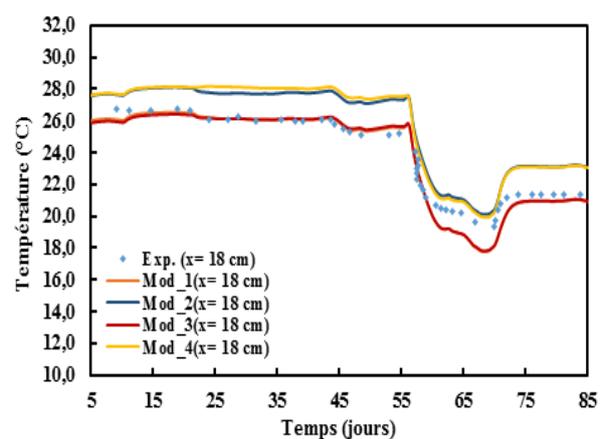


Figure II.26 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 18$  cm

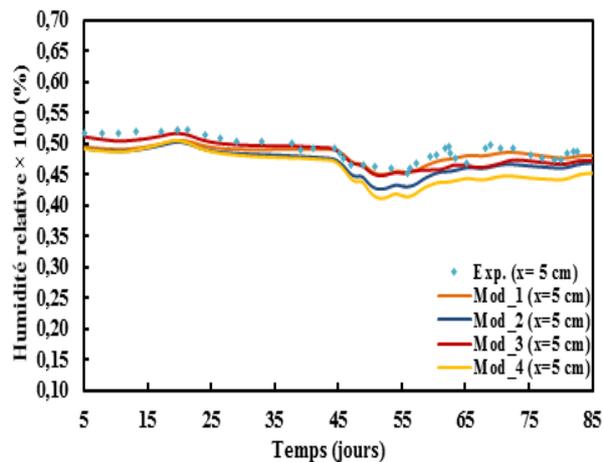


Figure II.27 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 5$  cm

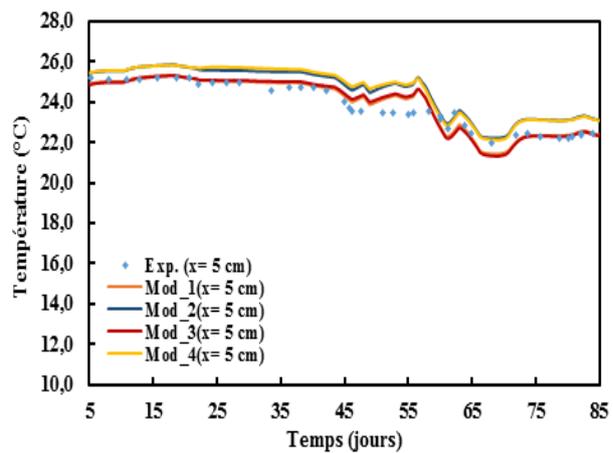


Figure II.28 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 5$  cm

Du côté extérieur (Figure II.23), durant les premiers 57 jours, l'humidité relative est globalement sous-estimée avec des écarts de 5% pour le modèle Mod\_2 et surestimée de 2 à 3% pour les modèles Mod\_1 et Mod\_3. Pour Mod\_4, elle est bien prédite pendant cette période. Au-delà, la montée en humidité relative est réduite par rapport à l'expérimental avec un avantage pour le Mod\_4, ce qui fait retarder le pic pour les quatre modèles. L'avantage est accordé à l'hystérésis (Mod\_2) durant les dix derniers jours. Les résultats pour la température (Figure II.24) sont acceptables au bout de 57 jours avec une surestimation de  $1,5^{\circ}\text{C}$  pour les modèles à hystérésis Mod\_2 et Mod\_4 et une sous-estimation de  $1^{\circ}\text{C}$  pour Mod\_1 et Mod\_3. Cependant, pour les trente jours restants, l'avantage va pour les modèles Mod\_2 et Mod\_4 tandis que des écarts de l'ordre de  $3^{\circ}\text{C}$  sont perçus pour Mod\_1 et Mod\_3.

Au milieu de la paroi, la prédiction de l'allure dynamique de l'humidité relative (Figure II.25) est réussie pour les quatre modèles pendant les 57 jours. Au-delà, les profils sont altérés. A noter que les simulations de COMSOL effectuées par (Lelievre et al., 2014) ont échoué aussi dans ce cas. Par contre, les températures sont bien prédites pour les quatre modèles (Figure II.26) avec des écarts relativement acceptables ( $1,8^{\circ}\text{C}$ ). Un privilège particulier est accordé aux modèles Mod\_1 et Mod\_3 au bout de 57 jours et aux Mod\_2 et Mod\_4 au-delà.

Les prédictions des humidités relatives du côté intérieur sont satisfaisantes pour les quatre modèles numériques, en particulier Mod\_1 et Mod\_3. Les modèles à hystérésis (Mod\_2 et Mod\_4) semblent bien prédire la dynamique des variations avec des écarts maximaux de 6% pour Mod\_4 (Figure II.27). Concernant la température (Figure II.28), les résultats sont acceptables pour les quatre modèles et les écarts obtenus restent dans les limites d'imprécision des capteurs (de l'ordre de  $1^{\circ}\text{C}$ ).

En résumé, Mod\_1 et Mod\_3, ne tenant pas compte de l'hystérésis, donnent de bons résultats jusqu'aux 57 premiers jours car l'histoire de la paroi n'est pas bien maîtrisée, alors que les autres modèles supposent une paroi initialement sèche. Lorsque la paroi est sollicitée par des cycles d'adsorption et de désorption, la prise en compte de l'hystérésis (Mod\_2 et Mod\_4) améliore les variations d'humidité relative dans la paroi. Concernant les variations de la température, il semble que la prise en compte de la thermodépendance (Mod\_3) n'améliore pas

les résultats du modèle simple (Mod\_1) tandis que celle de l'hystérésis (Mod\_2 et Mod\_4) apporte des améliorations lorsque la paroi est sollicitée (au-delà de 57 jours).

### II.5.2.3. Comparaison des modèles numériques à travers les simulations annuelles de la ville de Nancy

Afin de contribuer à évaluer l'apport de chaque aspect séparément (modèle standard, hystérésis et thermodépendance), les trois modèles Mod\_1, Mod\_2, et Mod\_3 sont testés pour des simulations annuelles sur la même paroi en béton de chanvre mais avec les conditions météorologiques extérieures de la ville de Nancy comme entrées (température, humidité relative et rayonnement solaire). Du côté intérieur, la paroi est en contact avec une ambiance de 23°C et 50% d'humidité relative. La prise en compte du rayonnement solaire cause des divergences dans le Mod\_4. La comparaison s'établit sur les températures et teneurs en eau à la surface intérieure, ainsi que sur les flux de chaleur au sein de la paroi. Les simulations sont réalisées pour deux années. Seuls les résultats de la deuxième année sont présentés. Pour des raisons de clarification et de compréhension des graphiques, deux périodes sont sélectionnées pour montrer les résultats : la première s'étend de février à mi-avril pour couvrir les conditions hivernales et la seconde de mi-mai à juillet pour les conditions estivales.

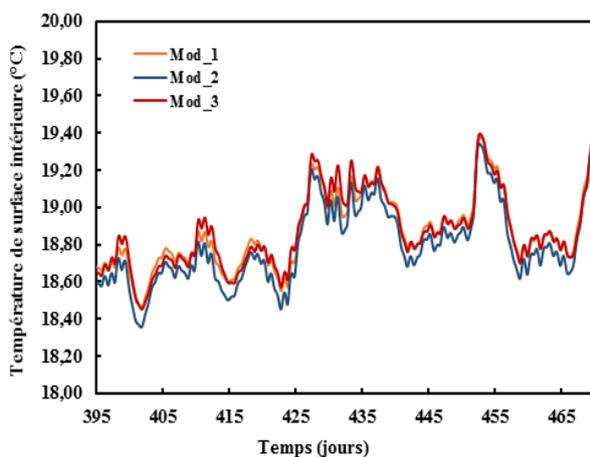


Figure II.29 : Température de surface intérieure pour la période hivernale

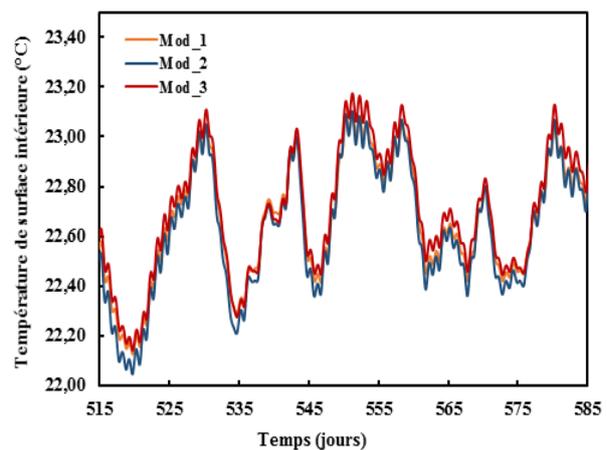


Figure II.30 : Température de surface intérieure pour la période estivale

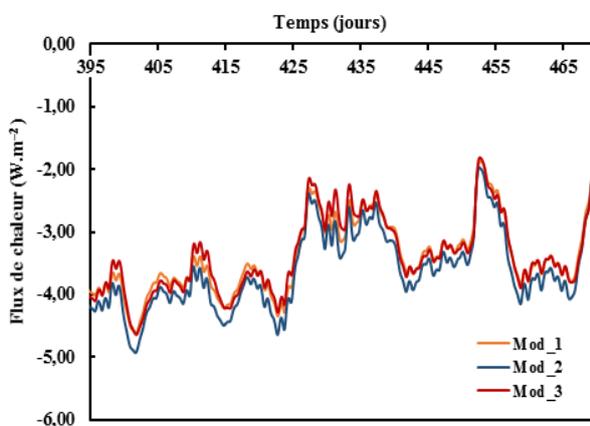


Figure II.31 : Flux de chaleur dans la paroi pour la période hivernale

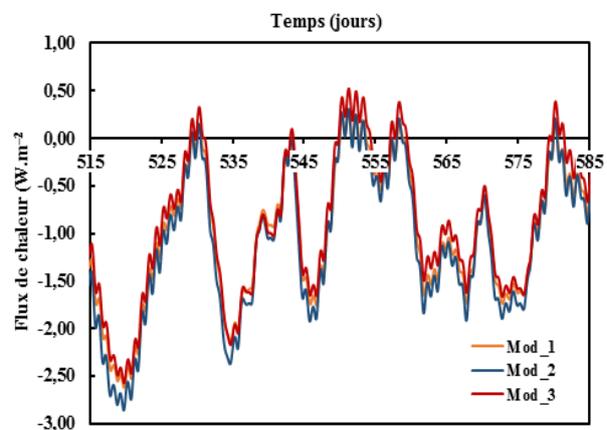


Figure II.32 : Flux de chaleur dans la paroi pour la période estivale

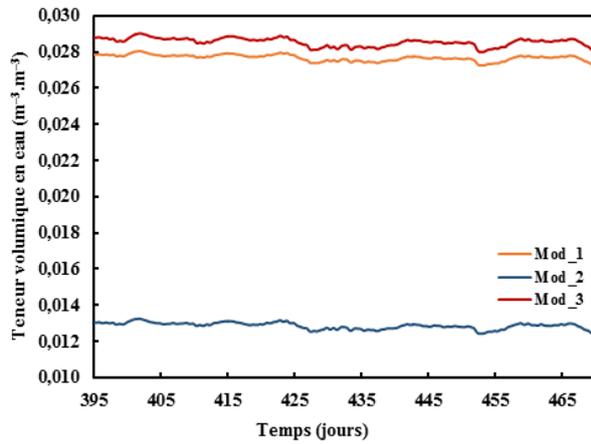


Figure II.33 : Teneur volumique en eau à la surface intérieure pour la période hivernale

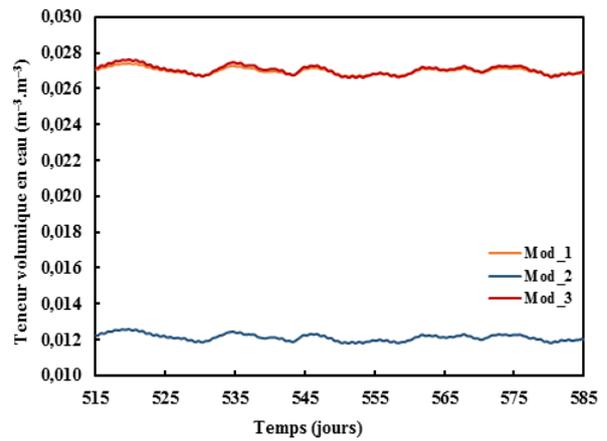
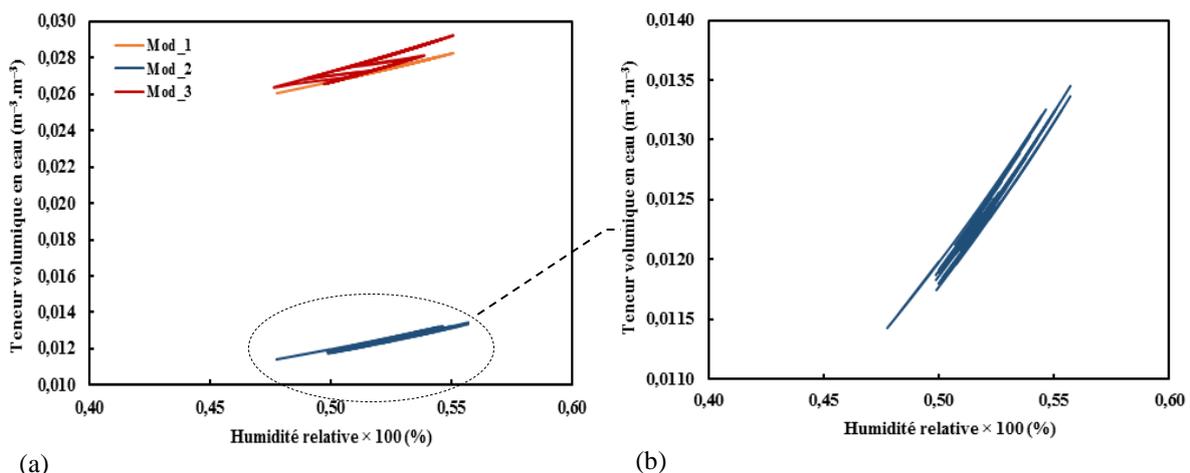


Figure II.34 : Teneur volumique en eau à la surface intérieure pour la période estivale

Les observations préliminaires montrent que les températures de surface intérieure sont plus élevées en été (Figure II.30) qu'en hiver (Figure II.29) pour les trois modèles, ce qui est cohérent. En outre, les variations des déperditions thermiques suivent bien l'allure dynamique de celles de la température de surface intérieure des trois cas, ce qui est cohérent de même étant donné que les flux de chaleur sont proportionnels au gradient de température entre l'ambiance du côté intérieur et la surface intérieure (Figure II.31 et Figure II.32).

Le modèle avec hystérésis (Mod\_2) montre la température de surface la moins élevée en hiver (Figure II.29) et en été (Figure II.30), accompagnée de la teneur en eau de la surface intérieure la plus faible. En effet, cette baisse en teneur volumique à la surface montre que l'évolution de l'hystérésis reste proche de la courbe d'adsorption au moment où Mod\_1 et Mod\_3 sont basés sur les courbes moyennes de sorption. Cette observation est validée en traçant les diagrammes représentant les variations de la teneur en eau dans la paroi en fonction de l'humidité relative tout au long de l'année comme montré dans la Figure II.35-(a).



(a)

(b)

Figure II.35 : Variations de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour les trois modèles (Merakeb)

Le phénomène d'hystérésis présenté en « zoom » dans la Figure II.35-(b) montre les variations de la teneur volumique en eau dans le matériau qui varie entre 0,0115 et 0,0135  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , ce qui correspond à des teneurs massiques en eau comprises entre 0,0255 et 0,030  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  suivant

l'équation (II.20). Cet ordre de grandeur est comparable à celui obtenu par Lelievre et al. (2014) (Figure II.36) avec une hystérésis basée sur le modèle de Mualem (1974).

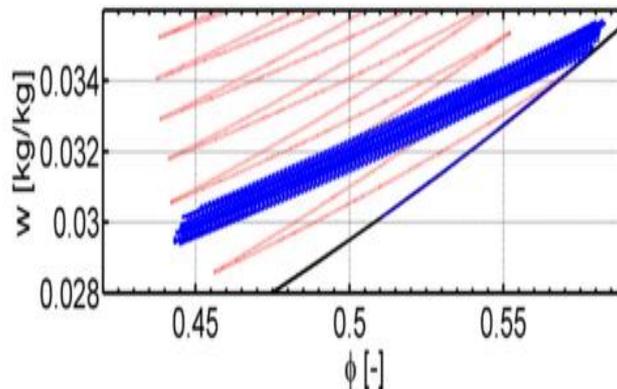


Figure II.36 : Illustration de l'hystérésis obtenue par Lelievre et al. (2014) suivant l'approche de Mualem

Par ailleurs, le modèle à thermodépendance (Mod\_3) montre les teneurs en eau à la surface les plus élevées en hiver. En effet, du fait qu'en hiver les températures sont moins élevées, la courbe de sorption du béton de chanvre est décalée vers le haut ce qui fait augmenter les teneurs en eau dans ce cas (Figure II.33). En été, les températures, augmentant de nouveau et se rapprochant de la température de référence de 23°C (Figure II.30), les écarts des teneurs volumiques en eau entre Mod\_1 et Mod\_3 sont limités (Figure II.34).

D'autre part, en considérant les flux de chaleur, prendre en compte l'hystérésis contribue à augmenter les pertes de chaleur à travers la paroi. Le calcul de l'énergie nécessaire de chauffage pour les trois modèles est montré dans le Tableau II.6 ci-après.

Modèle	Consommation de Chauffage (Kwh.m <sup>-2</sup> )
Mod_1	16,41
Mod_2	17,40
Mod_3	16,01

Tableau II.6 : Consommation de chauffage par unité de surface pour les trois modèles (Approche de Merakeb)

Ainsi, Mod\_2, ayant la température de surface la moins élevée, nécessite l'énergie de chauffage la plus grande (augmentation de 6% par rapport à Mod\_1). La température de surface la plus élevée attribuée à Mod\_3 résulte en une consommation de chauffage plus faible (diminution de 2,5% par rapport au cas standard). D'où l'impact de la prise en compte de l'hystérésis du béton de chanvre et sa thermodépendance sur la prédiction des consommations énergétiques.

### II.5.3. Validation à l'échelle de la paroi en utilisant l'approche de Rode

#### II.5.3.1. Impact du maillage

L'impact du maillage (10, 25, ou 50\_nœuds) est tout d'abord testé suivant les conditions expérimentales de la Figure II.16 (Lelievre et al. 2014) avec l'approche de Rode. Les comparaisons sont présentées ci-dessous du côté extérieur de la paroi ( $x = 29$  cm) à partir du 5<sup>ème</sup> jour de simulation. Dans cette section, pour les Mod\_2 et Mod\_4, une variante

supplémentaire est ajoutée : l'initialisation des simulations se fait toujours à 23°C et 50% d'humidité relative mais cette fois-ci à partir de la courbe de désorption (l'approche de Merakeb nécessite toujours un démarrage à partir de la courbe d'adsorption principale). Mod\_2 et Mod\_4 sont ainsi présentés sous deux formes : Mod\_2\_ads et Mod\_4\_ads initialisés à partir de la courbe d'adsorption principale et Mod\_2\_des et Mod\_4\_des initialisés à partir de la courbe de désorption principale.

Maillage	Mod_1 (Rode)	Mod_2_ads (Rode)	Mod_2_des (Rode)	Mod_3 (Rode)	Mod_4_ads (Rode)	Mod_4_des (Rode)
10_nœuds	17 sec	3 min 45 sec	1 min 06 sec	33 sec	1 min 50 sec	1 min 35 sec
25_nœuds	36 sec	4 min 06 sec	4 min 35 sec	1 min 04 sec	5 min 57 sec	4 min 38 sec
50_nœuds	1 min 41 sec	15 min 41 sec	21 min 31 sec	2 min 42 sec	24 min 46 sec	14 min 48 sec

Tableau II.7 : Temps de calcul nécessaire selon le maillage et le type de modèle (Approche de Rode)

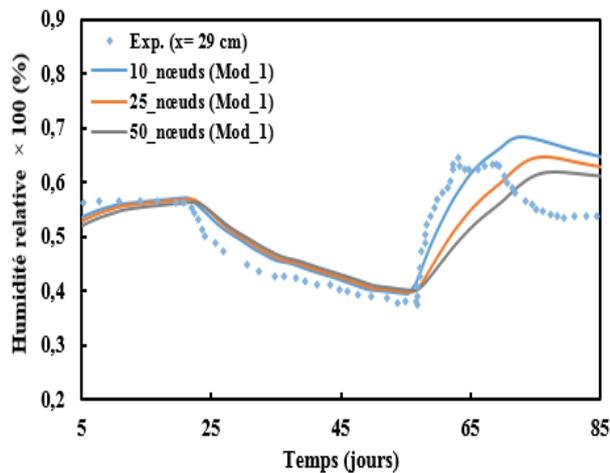


Figure II.37 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod\_1 (Rode)

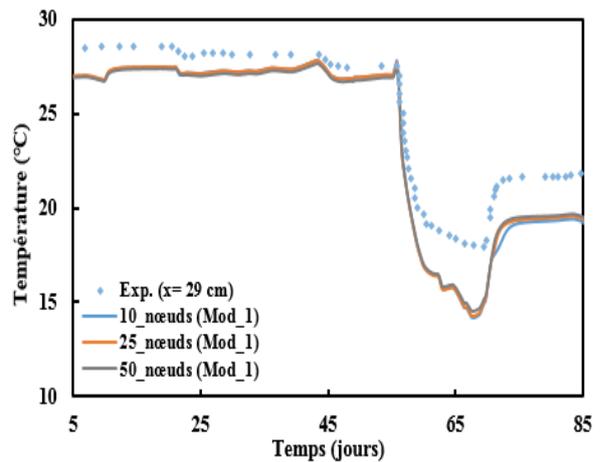


Figure II.38 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod\_1 (Rode)

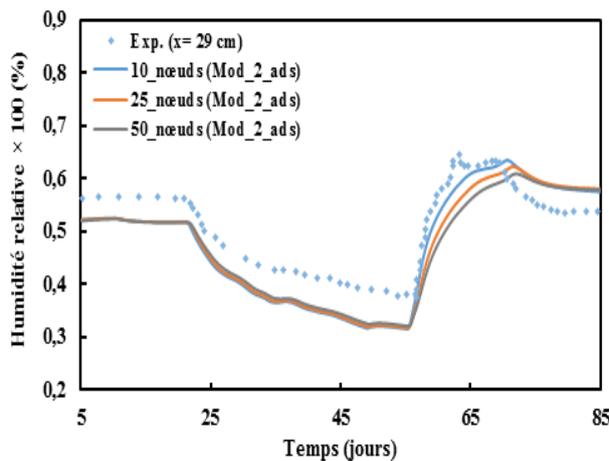


Figure II.39 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod\_2\_ads (Rode)

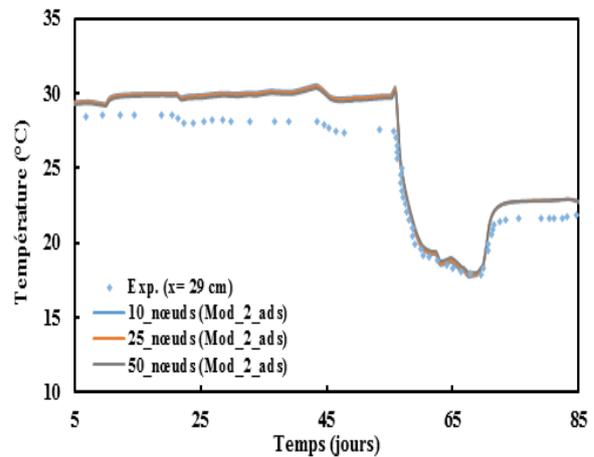


Figure II.40 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod\_2\_ads (Rode)

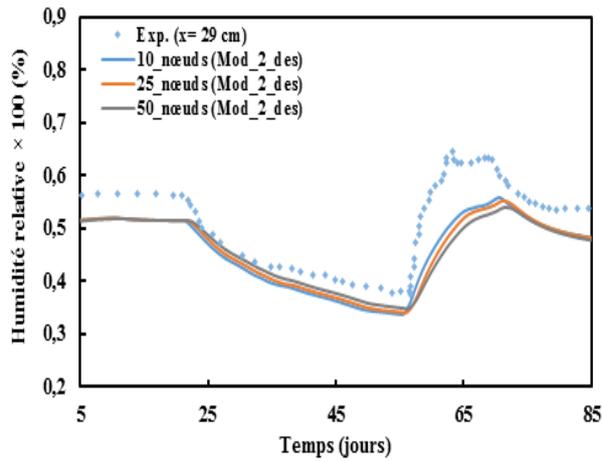


Figure II.41 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod\_2\_des (Rode)

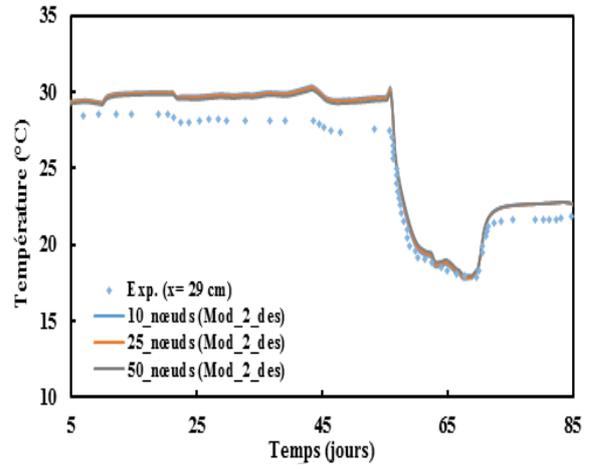


Figure II.42 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod\_2\_des (Rode)

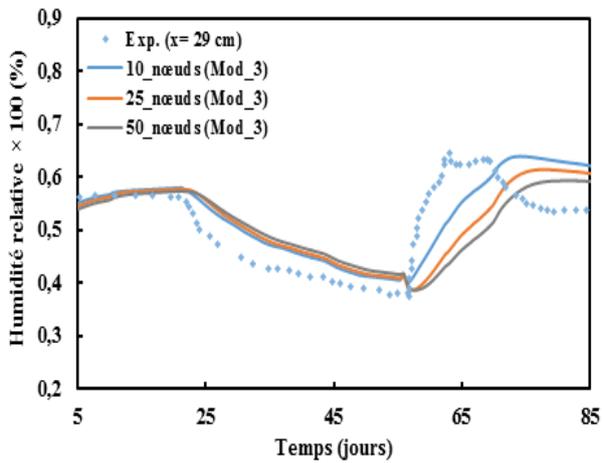


Figure II.43 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod\_3 (Rode)

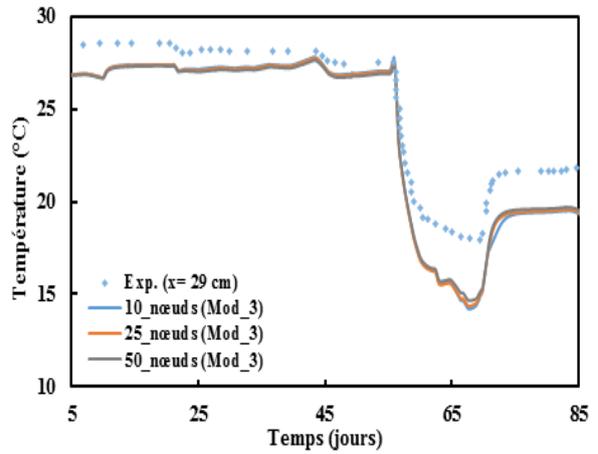


Figure II.44 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod\_3 (Rode)

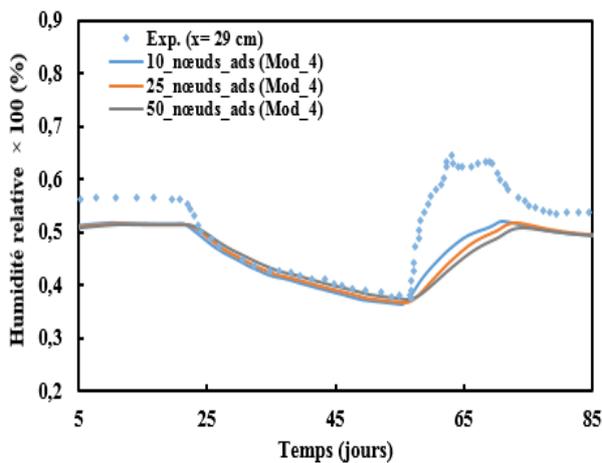


Figure II.45 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod\_4\_ads (Rode)

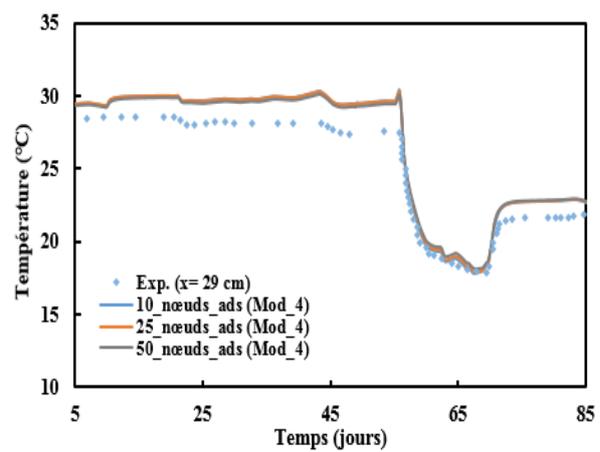


Figure II.46 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod\_4\_ads (Rode)

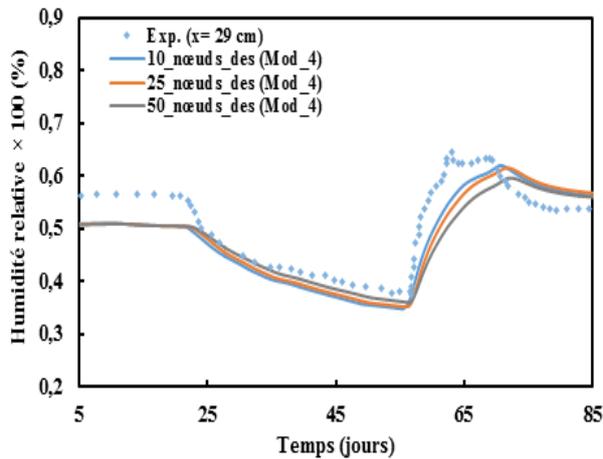


Figure II.47 : Comparaison des humidités relatives suivant les maillages pour Mod\_4\_des (Rode)

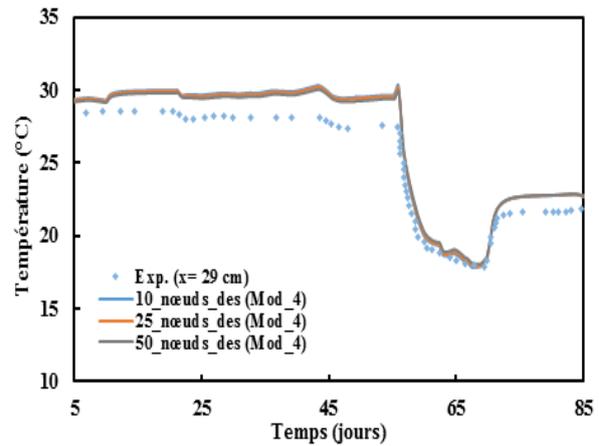


Figure II.48 : Comparaison des températures suivant les maillages pour Mod\_4\_des (Rode)

La prédiction des températures (Figures II.38, II.40, II.42, II.44, II.46 et II.48) est presque non affectée par le choix du maillage quelque soit le modèle choisi. Concernant les humidités relatives, Pour les Mod\_1 et Mod\_3 (Figures II.37 et II.43 respectivement), les maillages à 10 et 25\_nœuds présentent des résultats acceptables au moment où celui de 50\_nœuds retarde la montée de l'humidité relative. Pour les modèles avec hystérésis (Mod\_2), le type de maillage choisi affecte légèrement les évolutions des humidités relatives (Figures II.39 et II.41). Cependant les meilleures évolutions sont assurées par les maillage de 25 et 50\_nœuds. Les mêmes tendances sont visualisées entre les trois maillages pour les deux initialisations testées. Des observations pareilles sont remarquées avec le modèle complet (Mod\_4) dans les Figures II.45 et II.47. Par ailleurs, le temps de calcul est relativement long pour le maillage de 50\_nœuds (Tableau II.7) sans amélioration perceptible. Par conséquent, considérant les bons résultats donnés par les maillages 10 et 25\_nœuds d'un côté et visant une affinité plus adaptée dans le maillage, celui à 24 couches est choisi pour la suite de l'étude.

L'initialisation à partir de la courbe d'adsorption principale est retenue pour Mod\_2 et celle à partir de la désorption principale pour Mod\_4. La différence entre les deux modèles réside dans la prise en compte de la thermodépendance des isothermes de sorption pour Mod\_4. En effet, cette thermodépendance fait décaler la boucle (adsorption – désorption) vers la bas en démarrant à des températures supérieures à la température de référence de 23°C (dans ce cas, la température initiale du côté extérieur est de l'ordre de 32°C, Figure II.16). Ainsi, la courbe de désorption pour Mod\_4 tend à glisser vers le bas et s'approcher de la courbe d'adsorption à 23°C à partir de laquelle Mod\_2 est initialisé.

#### II.5.3.2. Comparaison des modèles numériques : conditions de Lelievre et al. (2014)

De la même manière, l'approche de modélisation de Rode est testée sous les conditions expérimentales de Lelievre et al. (2014) précédentes (Figure II.16). Les résultats pour les quatre modèles numériques Mod\_1, Mod\_2, Mod\_3 et Mod\_4 sont présentés ci-dessous et toujours à partir du 5<sup>ème</sup> jour en raison de l'effet des conditions initiales.

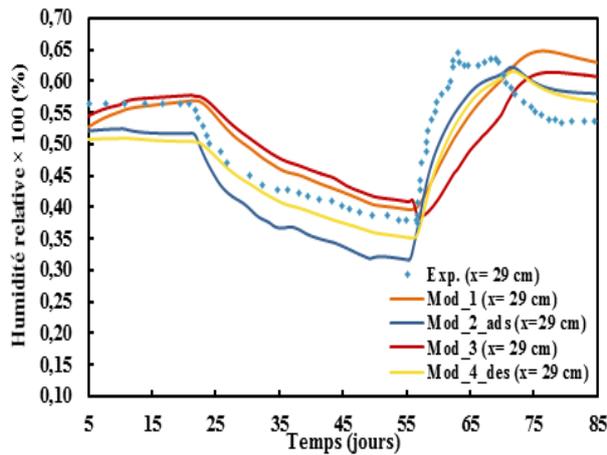


Figure II.49 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 29$  cm

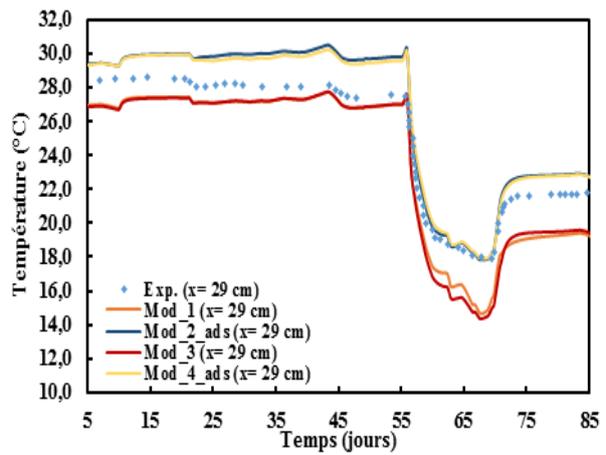


Figure II.50 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 29$  cm

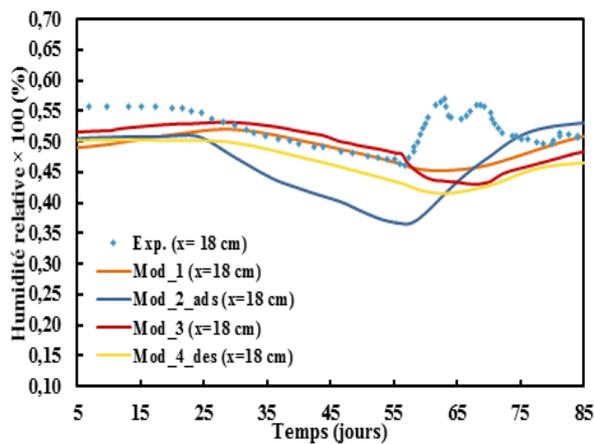


Figure II.51 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 18$  cm

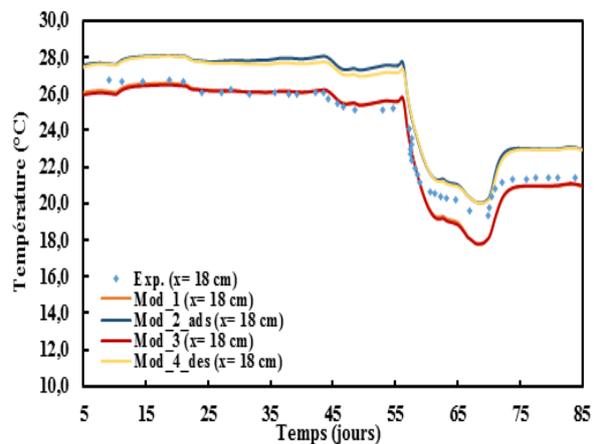


Figure II.52 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 18$  cm

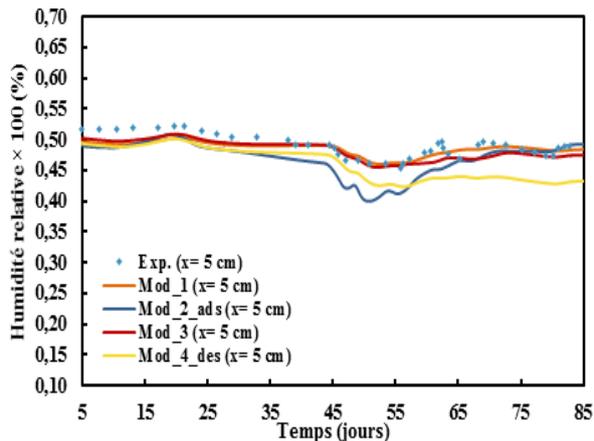


Figure II.53 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 5$  cm

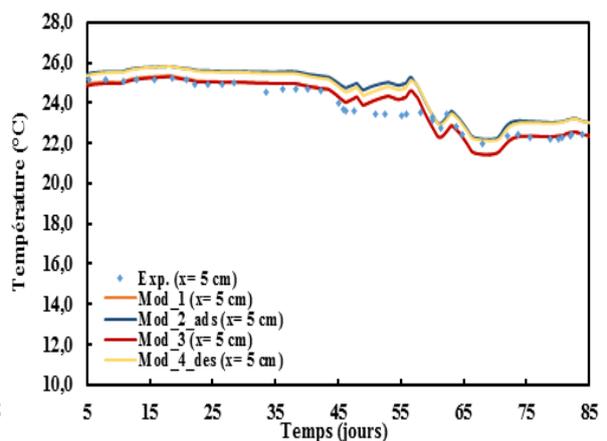


Figure II.54 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 5$  cm

A  $x = 29$  cm de la paroi, les profils de températures obtenus (Figure II.50) sont acceptables pour les quatre modèles jusqu'au 57<sup>ème</sup> jour avec une sous-estimation (entre 0,5°C et 2°C) pour le Mod\_1 et Mod\_3 et une surestimation (de 1,5 à 2°C) de la température pour le Mod\_2 et

Mod\_4. Au-delà, la température est avantageuse pour Mod\_2 et Mod\_4 et détériorée pour Mod\_1 et Mod\_3 avec des écarts qui atteignent 4°C. La Figure II.49 montre que lorsque la température est surestimée au bout des premiers 57 jours, l'humidité relative est sous-estimée et vice versa, avec des avantages remarquables pour Mod\_4 dont les écarts avec l'expérimental ne dépassent pas 5%. A partir de 57 jours, Mod\_2 et Mod\_4 représentent bien l'allure dynamique des variations tandis que Mod\_1 et Mod\_3 montrent des pentes de montée réduites et des pics d'humidité relative retardés.

Au milieu de la paroi (Figure II.51), la prédiction de l'allure dynamique de l'humidité relative est acceptable jusqu'au jour 57 surtout pour Mod\_1 et Mod\_4. Au-delà, les profils ne collent pas bien avec les relevés expérimentaux pour les quatre modèles. Pour les profils de températures (Figure II.52), les courbes obtenues collent bien avec les valeurs expérimentales pour Mod\_1 et Mod\_3 au bout de 57 jours, au moment où elles sont surestimées de 2°C pour Mod\_2 et Mod\_4. Aux derniers vingt jours, les résultats restent favorables pour Mod\_1 et Mod\_3 (écarts maximaux de 1,5°C).

La Figure II.53 montre que les modèles sont fiables pour la prédiction des évolutions des températures du côté intérieur de la paroi étant donné que les écarts avec les relevés expérimentaux ne dépassent pas 1°C en  $x = 5$  cm. La Figure II.54 donne l'avantage aux Mod\_1 et Mod\_3, et surtout Mod\_1, avec des écarts maximaux de l'ordre de 2% avec l'expérimental au moment où Mod\_2 réussit à bien prédire la dynamique des variations et Mod\_4 présente des résultats acceptables mais un peu plus écartés à la fin (7% d'écart avec l'expérimental).

Ainsi, la prise en compte de l'hystérésis améliore la prédiction des variations dynamiques de la température et de l'humidité relative lorsque la paroi est sollicitée par ces conditions variables. De plus, des améliorations supplémentaires sont apportées en couplant l'hystérésis et la thermodépendance suite aux résultats obtenus par le Mod\_4.

Précédemment, la perméabilité à la vapeur d'eau dans le béton de chanvre était considérée constante ( $\pi = 0,4 \times 10^{-10}$  kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>) calculée comme étant le rapport entre la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air ( $\pi_{\text{air}} = 2 \times 10^{-10}$  kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>) et le coefficient de résistance à la vapeur du matériau ( $\mu = 5$ ). Dans ce cadre, un cas supplémentaire est effectué sur Mod\_2 et Mod\_4 en prenant une perméabilité variable du béton de chanvre projeté en fonction de l'humidité relative dans le matériau (Collet et al., 2013) :

$$\pi = 0,32E \times 10^{-10} + 5,18 \times 10^{-10} \times \varphi^{8,38} \quad (\text{II.37})$$

Les résultats sont présentés ci-dessous du côté extérieur de la paroi ( $x = 29$  cm) en comparant Mod\_2\_ads et Mod\_4\_des initiaux à perméabilité constante ( $\pi = 0,4 \times 10^{-10}$  kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>) avec Mod\_2\_ads\_perméabilité et Mod\_4\_des\_perméabilité à perméabilité variable.

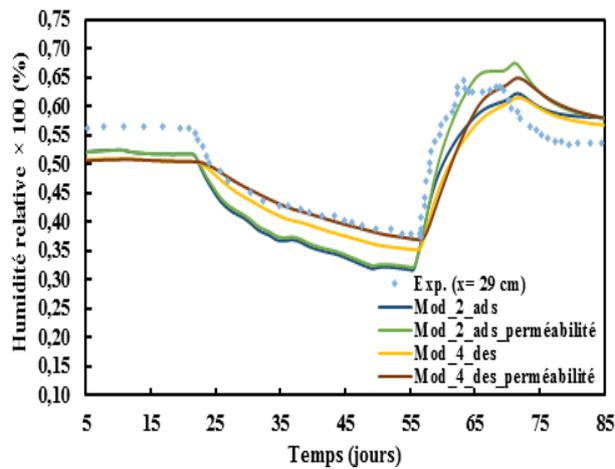


Figure II.55 : Comparaison des humidités relatives entre perméabilité constante et variable

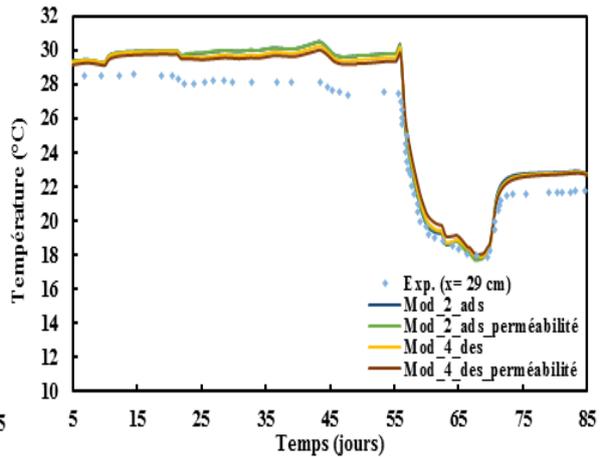


Figure II.56 : Comparaison des températures entre perméabilité constante et variable

La Figure II.55 montre que les humidités relatives dans la paroi sont sensibles à la perméabilité du béton de chanvre utilisé. Une perméabilité variable contribue à améliorer la prédiction de la dynamique de l'humidité relative, principalement les pentes en montée et en descente. Son influence sur la température est peu significative (Figure II.56) mais réduit sa surestimation de l'ordre de 0,3°C au début de l'expérience. Ainsi, les propriétés du béton de chanvre mesurées expérimentalement influent énormément sur les résultats numériques.

### II.5.3.3. Comparaison des modèles numériques à travers les simulations annuelles de la ville de Nancy

Les modèles Mod\_1, Mod\_2 et Mod\_3 suivant l'approche de Rode sont examinés sur deux ans avec les conditions climatiques de la ville de Nancy. Des divergences dans le Mod\_4 apparaissent en introduisant le rayonnement solaire extérieur. Mod\_2 est initialisé en premier lieu de la courbe d'adsorption principale (Mod\_2\_ads) et en deuxième lieu de la courbe de désorption principale (Mod\_2\_des). A l'instar de l'approche de Merakeb (section II.5.2.3), les mêmes périodes hivernale et estivale sont choisies pour les comparaisons.

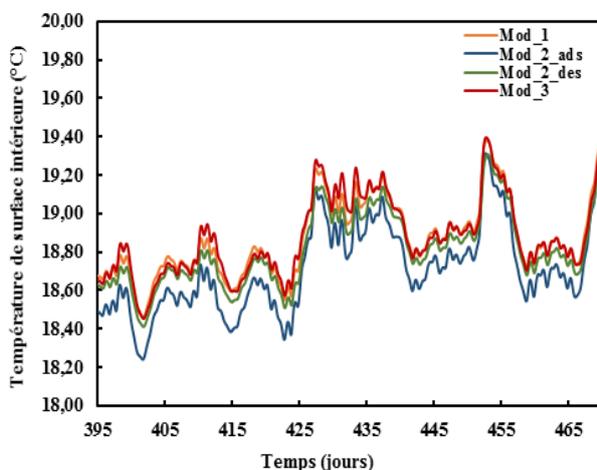


Figure II.57 : Température de surface intérieure pour la période hivernale

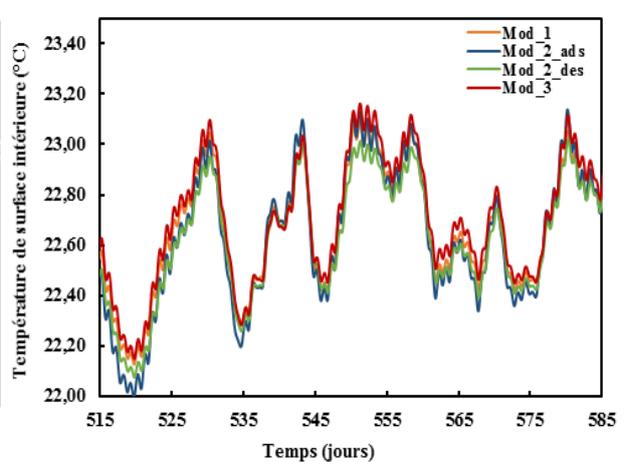


Figure II.58 : Température de surface intérieure pour la période estivale

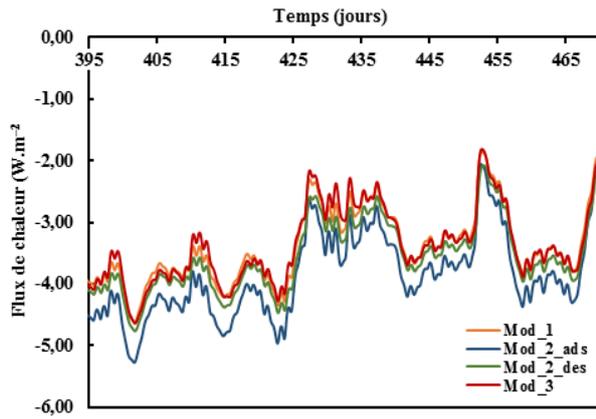


Figure II.59 : Flux de chaleur dans la paroi pour la période hivernale

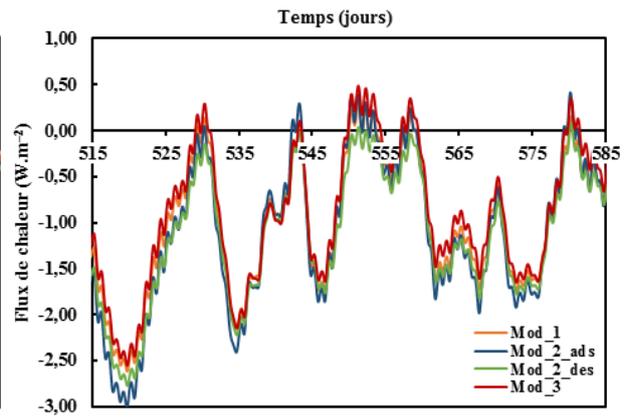


Figure II.60 : Flux de chaleur dans la paroi pour la période estivale

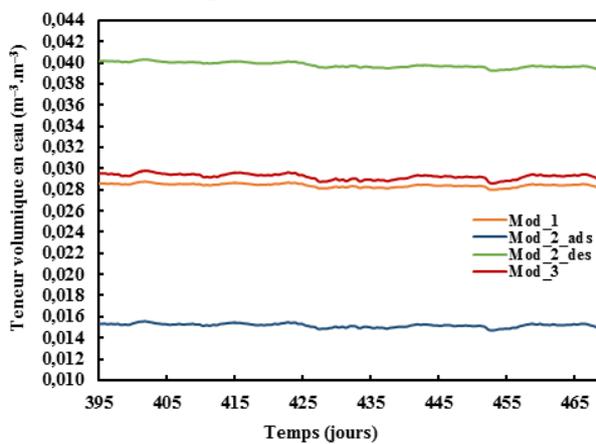


Figure II.61 : Teneur volumique en eau à la surface intérieure pour la période hivernale

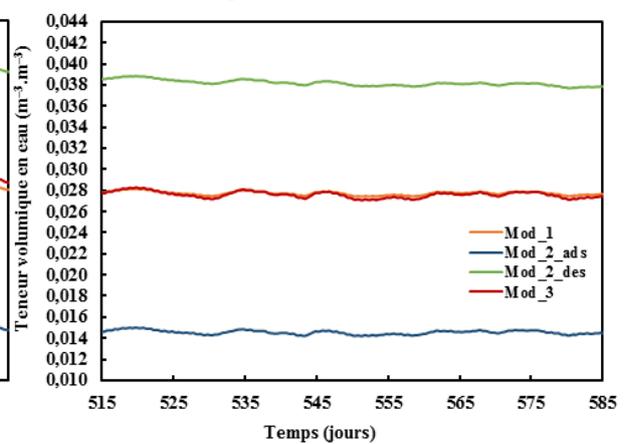


Figure II.62 : Teneur volumique en eau à la surface intérieure pour la période estivale

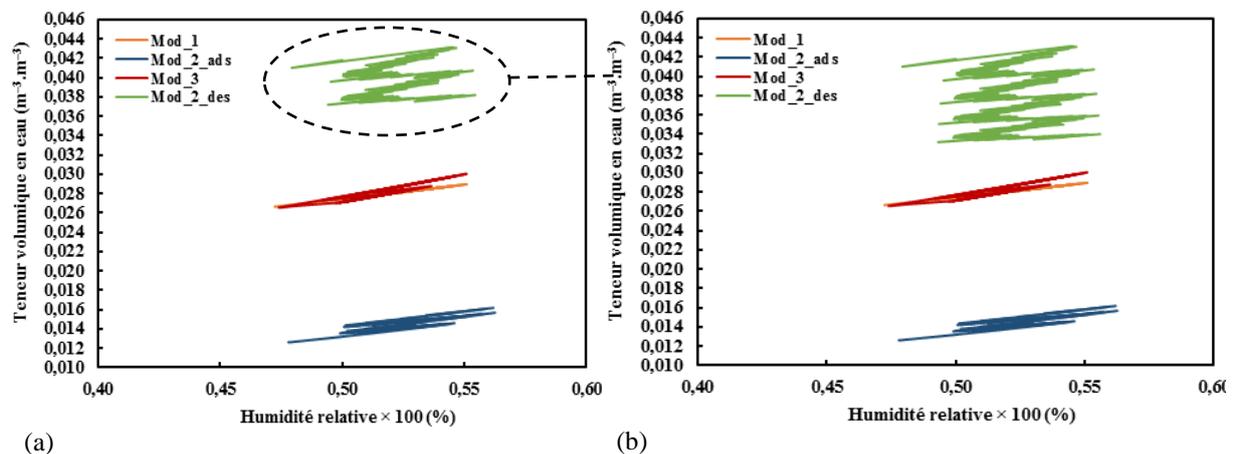
Les tendances générales entre les trois modèles Mod\_1, Mod\_2 et Mod\_3 pour les températures de surface intérieure (Figures II.57 et II.58) et les flux de chaleur dans la paroi (Figures II.59 et II.60) sont semblables à celles de Merakeb (section II.5.2.3). Mod\_2 présente la température de surface la moins élevée en hiver et la plupart du temps en été (et ainsi les flux de chaleur les plus grands), mais cette fois-ci avec des écarts plus prononcés avec Mod\_1 lorsque Mod\_2 est initialisé de la courbe d'adsorption. Mod\_3 montre majoritairement la plus grande température de surface pendant les deux saisons. Cette observation est remarquée en calculant les besoins de chauffage dans le Tableau II.8 : Mod\_2 présentant la température de surface la moins élevée exige les consommations de chauffage les plus grandes, au contraire du Mod\_3.

Modèle	Consommation de Chauffage (Kwh.m <sup>-2</sup> )
Mod_1	16,42
Mod_2_ads	18,46
Mod_2_des	17,11
Mod_3	16,03

Tableau II.8 : Consommation de chauffage par unité de surface pour les trois modèles (Approche de Rode)

Il faut souligner la convergence obtenue dans les résultats du Mod\_1 et Mod\_3 que ce soit avec l'approche de Merakeb ou celle de Rode, clairement visible dans le calcul des consommations énergétiques par les deux approches (16,41 Kwh.m<sup>-2</sup> et 16,42 Kwh.m<sup>-2</sup> pour Mod\_1 (Merakeb) et Mod\_1 (Rode) respectivement face à 16,01 Kwh.m<sup>-2</sup> et 16,03 Kwh.m<sup>-2</sup> pour Mod\_3 (Merakeb) et Mod\_3 (Rode) respectivement).

D'ailleurs, à noter l'énorme impact des conditions initiales sur les résultats vu les écarts relevés entre Mod\_2\_ads et Mod\_2\_des, ce qui augmente les besoins de chauffage de 12,36% dans le 1<sup>er</sup> cas et de 4,20% dans le second. Le comportement de la paroi sollicitée diffère aussi car dans le cas du Mod\_2\_des, l'évolution de l'hystérésis a lieu près de la courbe de désorption (Figures II.61, II.62 et II.63-(a)). Pour essayer d'examiner le comportement de la paroi avec hystérésis, Mod\_2\_des est testé pour quatre ans et présenté avec Mod\_1, Mod\_2\_ads et Mod\_3 pour deux ans (Figure II.63-(b)). En effet, dans ces conditions, l'initialisation à partir de la courbe de désorption est plus réaliste car le béton de chanvre est initialement dans des conditions humides et sèche à température ambiante et la variation du diagramme ( $\theta, \varphi$ ) est plus rapide en partant de la désorption.



(a) (b)  
Figure II.63 : Variations de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour les trois modèles (Rode)

A long terme, l'effet de l'hystérésis tend à s'approcher de celui des modèles à courbe moyenne de sorption vu que le diagramme ( $\theta, \varphi$ ) du Mod\_2\_des rejoint celui du Mod\_1 et Mod\_3 après plusieurs simulations. Ce résultat est cohérent avec ceux de Kwiatkowski et al. (2009). La consommation de chauffage relevée pendant les quatre ans pour le modèle Mod\_2\_des est résumée dans le Tableau II.9.

Mod_2_des	Consommation de Chauffage (Kwh.m <sup>-2</sup> )
1 <sup>ère</sup> année	16,75
2 <sup>ème</sup> année	17,11
3 <sup>ème</sup> année	17,20
4 <sup>ème</sup> année	17,22

Tableau II.9 : Consommation de chauffage par unité de surface du Mod\_2\_des pour 4 ans (Approche de Rode)

A la lumière du Tableau II.9, la constatation à déduire est que la consommation de chauffage requise calculée pour Mod\_2\_des tend à converger à long terme : en fait, les écarts obtenus entre deux années successives diminuent progressivement. Ainsi, prédire les consommations énergétiques avec des modèles à hystérésis revient à ne pas s'arrêter au bout d'une ou deux ans, mais solliciter la paroi pendant au moins plusieurs années.

Pour essayer d'expliquer les écarts de consommation dus à l'hystérésis, les diagrammes  $(\theta, \varphi)$  du côté extérieur sont tracés pour les deux cas d'initialisation Mod\_2\_ads et Mod\_2\_des pendant les deux premières années dans les Figures II.64 et II.65 respectivement.

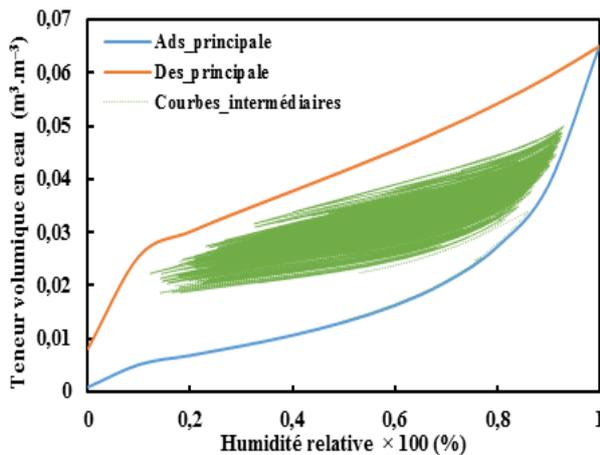


Figure II.64 : Schématisation de l'hystérésis en initialisation de l'adsorption principale

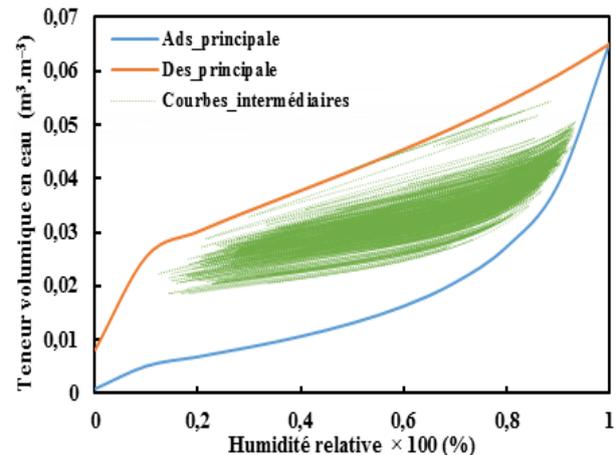


Figure II.65 : Schématisation de l'hystérésis en initialisation de la désorption principale

La teneur en eau dans le cas de l'initialisation de l'adsorption augmente rapidement de  $0,0135 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  jusqu'à atteindre  $0,043 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  puis elle fluctue en s'approchant des valeurs moyennes (Figure II.64). Dans le cas de l'initialisation de la désorption (Figure II.65), la teneur en eau diminue de  $0,0418 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  vers  $0,017 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  en s'approchant des valeurs moyennes. Ce qui explique que les pertes dans le 1<sup>er</sup> cas sont plus importantes car la conductivité thermique du matériau est plus importante ayant des teneurs en eau plus grandes.

#### II.5.4. Contribution à l'étude de la thermodépendance des isothermes de sorption à travers l'implémentation directe de l'équation de Clausius–Clapeyron

La section précédente a présenté l'impact de la prise en compte de l'hystérésis et de la thermodépendance des courbes de sorption dans la modélisation. Il s'avère que l'hystérésis contribue à améliorer la dynamique de la prédiction du comportement hygrothermique du béton de chanvre. Cependant, son implémentation est compliquée et surtout en imposant les conditions adéquates afin de passer de l'adsorption en désorption pour les courbes de sorption intermédiaires, ce qui engendre des temps de calcul relativement longs. D'un autre côté, les modèles à thermodépendance sont prometteurs et pratiques à gérer. De ce fait, cette partie vise à étudier l'effet de la thermodépendance des isothermes de sorption en mettant en œuvre directement l'équation de Clausius-Clapeyron (II.33) dans le calcul des courbes de sorption correspondantes, sans passer par les corrélations en fonction de la température présentés dans section II.4. La chaleur isostérique de sorption est calculée tout d'abord en utilisant la

corrélation exponentielle de l'équation (II.34), dans laquelle elle s'exprime en fonction de la teneur volumique en eau dans le matériau. Cependant, Colinart and Glouanec (2017) et Colinart et al. (2017) mettent l'accent dans leurs travaux sur l'importance d'exprimer cette chaleur isostérique en fonction de l'humidité relative dans le matériau comme suit :

$$q_{st.(\varphi)} = \frac{k \times R \times T^2}{\varphi} + L_v \quad (II.38)$$

$L_v$  est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, et  $k$  le coefficient hygrométrique défini pour le béton de chanvre pour une plage d'humidité relative comprise entre 50 et 100 % par :

$$k = -2,687 \times 10^{-4} \varphi^2 + 3,026 \times 10^{-2} \varphi - 0,34439 \quad (II.39)$$

Le Mod\_3 présente ainsi deux nouvelles variantes : Mod\_3( $q_{st}(\theta)$ ) et Mod\_3( $q_{st}(\varphi)$ ) comparées entre elles et avec le Mod\_3 initial (Merakeb ou Rode).

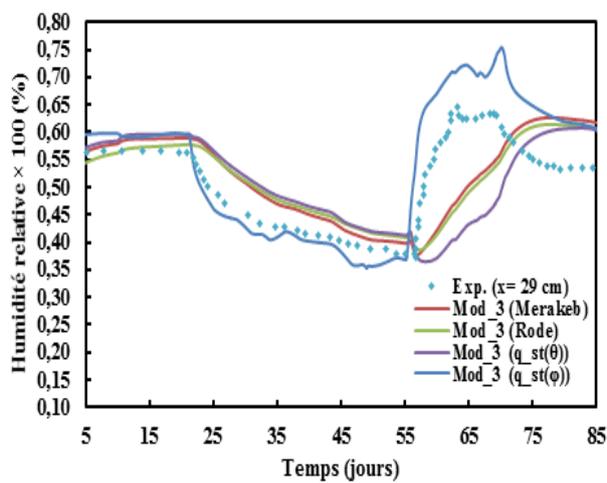


Figure II.66 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 29$  cm

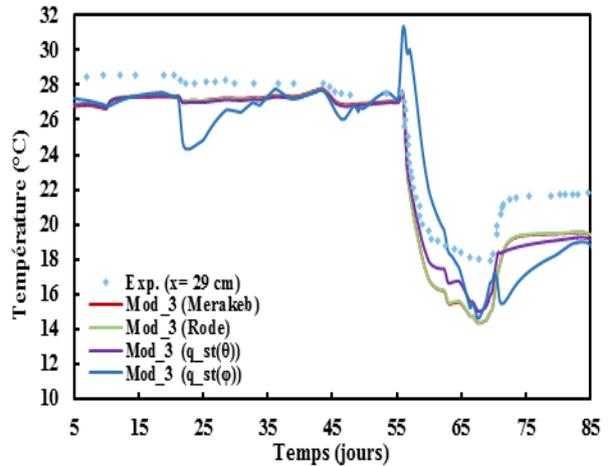


Figure II.67 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 29$  cm

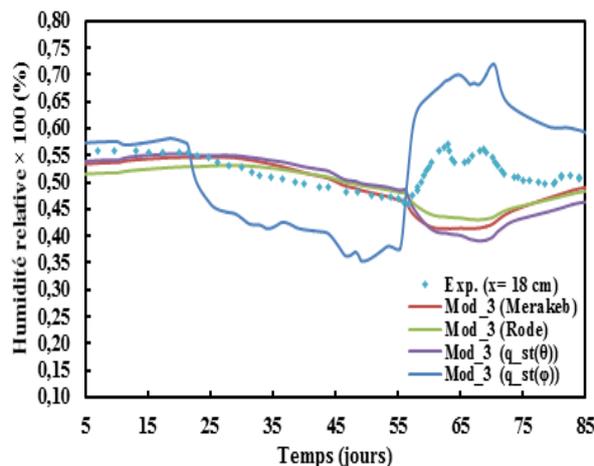


Figure II.68 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 18$  cm

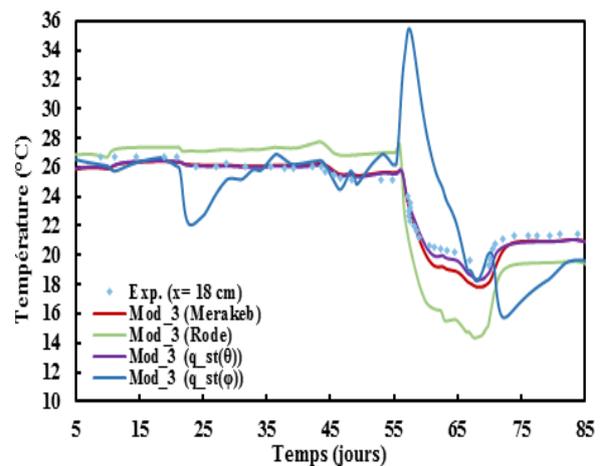


Figure II.69 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 18$  cm

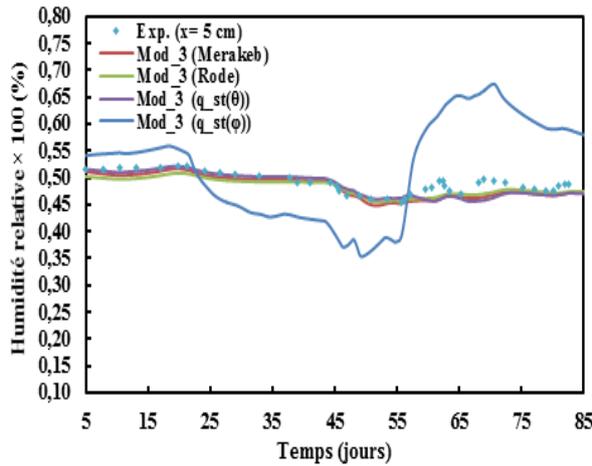


Figure II.70 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 5$  cm

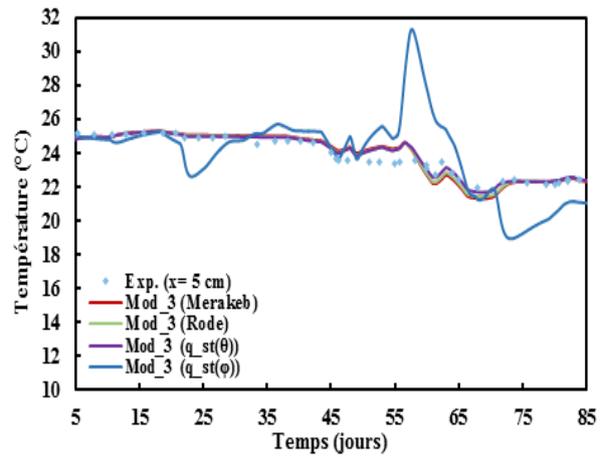


Figure II.71 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 5$  cm

Ce qui est indéniablement vrai c'est la grande sensibilité des résultats par rapport au calcul de la chaleur isostérique de sorption utilisée dans la modélisation. Cependant, et contrairement à ce qui est attendu, exprimer la chaleur isostérique en fonction de l'humidité relative dans le matériau altère complètement les profils de température et d'humidité relative au milieu (Figures II.68 et II.69) et du côté intérieur (Figure II.70 et II.71) de la paroi. Toutefois, du côté extérieur il présente la meilleure prédiction dynamique de l'humidité relative (Figure II.66), avec un profil acceptable de la température au même endroit (Figure II.67). Il apparaît aussi qu'avec cette corrélation de la chaleur isostérique (Mod\_3( $q_{st}(\varphi)$ )) l'humidité relative est légèrement amortie tout au long de la paroi. D'un autre côté, le Mod\_3( $q_{st}(\theta)$ ) montre que la chaleur isostérique approximée en fonction de la teneur volumique en eau présente des résultats plus adéquats aux trois positions indiquées, sans forcément améliorer les résultats préliminaires obtenus avec Mod\_3 (Merakeb) et Mod\_3 (Rode) surtout du côté extérieur (Figures II.66 et II.67). Mais, au milieu de la paroi (Figures II.68 et II.69) et du côté intérieur (Figures II.70 et II.71), les profils de température et humidité sont améliorés par rapport aux approches de Merakeb et Rode. Pour essayer d'aller un peu plus loin, la chaleur isostérique de sorption est tracée par chacune de ces deux corrélations :  $q_{st}(\varphi)$  et  $q_{st}(\theta)$ .

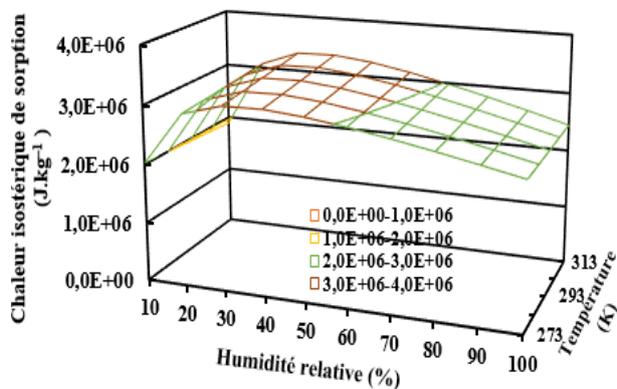


Figure II.72 : Chaleur isostérique de sorption calculée en fonction de la température et l'humidité relative

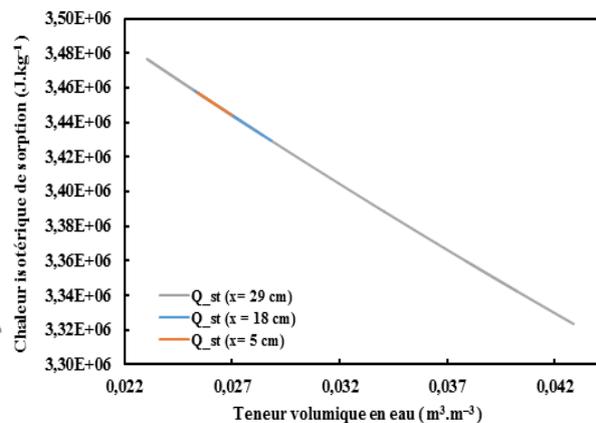


Figure II.73 : Chaleur isostérique de sorption calculée en fonction de la teneur en eau

Dans les Figures II.72 et II.73, la chaleur isostérique de sorption est comparable en ordre de grandeurs à celle présentée par Colinart et al. (2017) et Aït Oumeziane et al. (2016) et ceci pour les deux corrélations. Elle présente une allure plus stable en la calculant à partir de la teneur en eau volumique dans le matériau (Figure II.73). Cependant, sur la Figure II.72, une grande partie de l'humidité relative tombe au-dessous de 50%, seuil minimal pour le calcul du coefficient hygrométrique (équation (II.39)). D'où la divergence des résultats dans ce cas.

### II.5.5. Application de la prise en compte de l'hystérésis sur les conditions de Ait Oumeziane (2013)

Cette partie est dédiée à l'étude de l'impact de l'hystérésis sur la prédiction du comportement hygrothermique d'une paroi simple en béton de chanvre d'épaisseur 30 cm soumise à une séquence de température et d'humidité relative du côté intérieur et extérieur (Figure II.74) selon les travaux de thèse de Ait Oumeziane (2013). Les propriétés du béton de chanvre étudié (Easy P) sont listées dans le Tableau II.10.

Propriétés	Densité ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Capacité thermique ( $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	Conductivité thermique ( $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	Emissivité (-)	Coefficient de résistance à la vapeur (-)
Béton de chanvre	$\rho = 320$	$C_p = 1250$	$\lambda$ $= 0,091$ $+ 2,21304w$	$\varepsilon = 0,8$	$\mu = 10$

Tableau II.10 : Propriétés du béton de chanvre selon les travaux de (Ait Oumeziane, 2013)

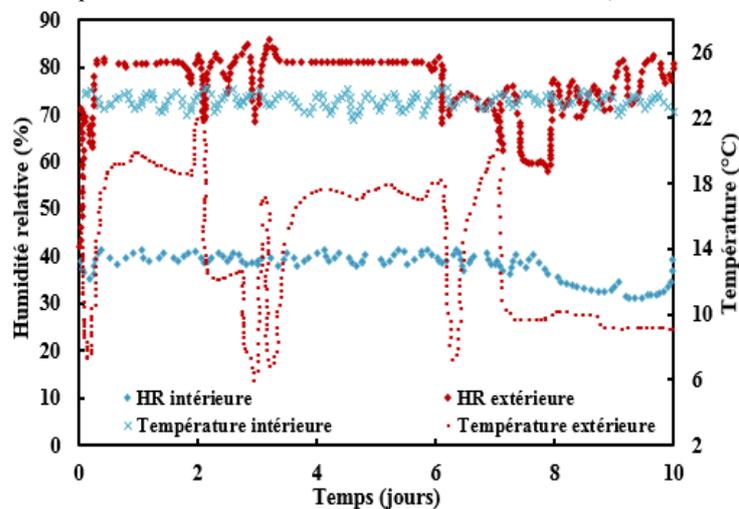


Figure II.74 : Conditions expérimentales de Ait Oumeziane (2013)

Les courbes de sorption sont calées par la méthode des moindres carrés selon les courbes de sorption expérimentales fournies dans la thèse de (Ait Oumeziane, 2013). Les températures et humidités relatives sont suivies à deux endroits de l'échantillon :  $x = 7,5$  cm et  $x = 22,5$  cm. Les simulations sont initialisées à 23°C et 41% d'humidité relative, ensuite tournées et comparées pour 10 jours avec les modèles Mod\_1 et Mod\_2 selon les approches de Merakeb et Rode pour analyser l'influence de l'hystérésis sur l'ensemble des résultats.

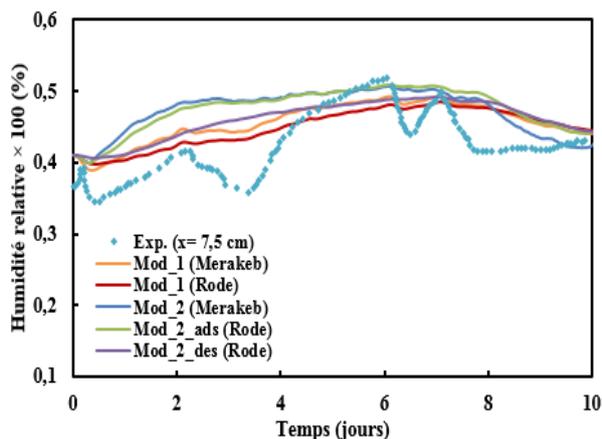


Figure II.75 : Comparaison des humidités relatives pour  $x = 7,5$  cm

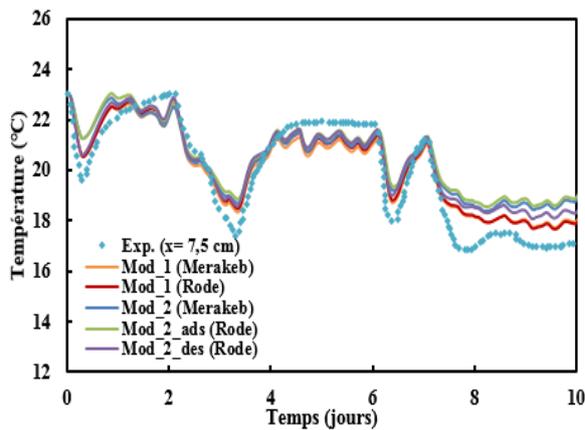


Figure II.76 : Comparaison des températures pour  $x = 7,5$  cm

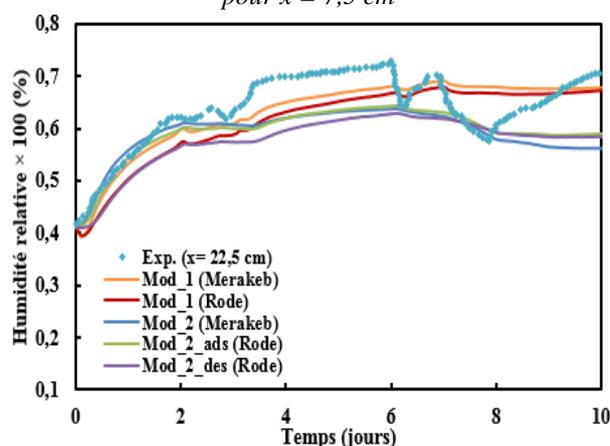


Figure II.77 : Comparaison des humidités relatives pour  $x = 22,5$  cm

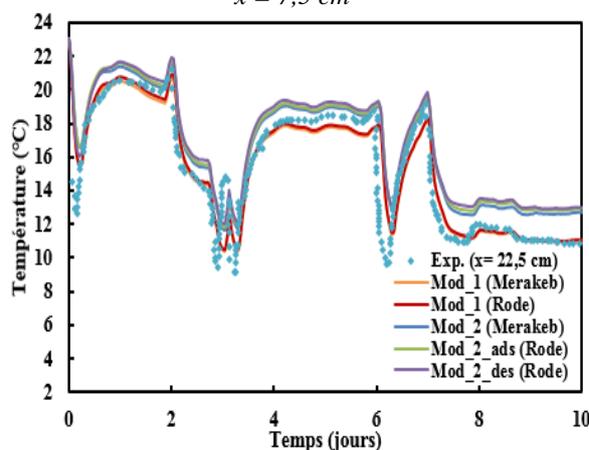


Figure II.78 : Comparaison des températures pour  $x = 22,5$  cm

Les Figures II.76 et II.78 montrent que les Mod\_1 et Mod\_2 arrivent à bien prédire les températures des deux côtés intérieur et extérieur de la paroi avec des privilèges pour les modèles standards Mod\_1 (Merakeb) et Mod\_1 (Rode) surtout aux deux premiers et derniers jours. Les écarts maximaux de température avec les valeurs expérimentales ne dépassent pas 2°C. L'initialisation à partir de la courbe de désorption du Mod\_2 (Rode) a un faible impact sur les résultats. Par contre, les Figures II.75 et II.77 montrent que la dynamique de l'humidité relative prédite pour ces cinq variantes de modèles n'est pas respectée avec des résultats plus convaincants donnés par Mod\_1 (Merakeb), Mod\_1 (Rode) et dont les marges de variations tombent bien dans la zone de prédiction des résultats expérimentaux. L'hystérésis améliore la montée dynamique de l'humidité relative en  $x = 22,5$  cm (Figure II.77) et rapproche les résultats des modèles standards une fois le modèle initialisé de la courbe de désorption principale en  $x = 7,5$  cm (Figure II.75). La limitation du Mod\_2 à hystérésis revient au fait que le modèle nécessite une nouvelle adaptation pour les équations (II.24), (II.26), (II.31) et (II.32) car les propriétés du béton de chanvre utilisé diffèrent de celles utilisées par Lelievre et al. (2014). Ce calage est difficile à réaliser dans cette section vu le déficit de données expérimentales nécessaires dans les travaux de Ait Oumeziane (2013) concernant les variations de masse d'un échantillon de ce matériau soumis aux conditions du protocole NordTest.

## II.6. Applications numériques sur une paroi multicouches en béton de chanvre

Dans cette section, le travail est effectué sur des parois contenant plusieurs couches de matériaux, y compris le béton de chanvre. Dans la modélisation de telles parois, une attention particulière est portée à l'interface entre les différentes couches de matériaux (Tran Le et al., 2010). Ainsi, plusieurs hypothèses sont prises en compte. Premièrement, le contact entre les couches est supposé parfait. Deuxièmement, les résistances aux transferts de chaleur et transports d'humidité aux interfaces sont négligées. Enfin, la température  $T$  et la pression capillaire  $P_c$  sont considérées continues aux interfaces. Ainsi, ayant deux matériaux A et B dans une paroi multicouches, les hypothèses précédentes se traduisent par :

$$\begin{cases} T_A = T_B \\ P_{c_A} = P_{c_B} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

D'après la loi de Kelvin :

$$\varphi = \exp\left(\frac{P_c g}{R_v T}\right) \quad (\text{II.41})$$

Il en résulte, par un simple calcul mathématique, que :

$$\varphi_A = \varphi_B \quad (\text{II.42})$$

Ce qui signifie que l'humidité relative est continue entre les couches contrairement à la teneur volumique en humidité qui dépend des propriétés du matériau et de sa structure poreuse.

### II.6.1. Protocol expérimental non-isotherme appliqué sur une paroi multicouches en béton de chanvre

Dans les travaux de Colinart et al. (2016), une paroi multicouches en béton de chanvre de 40 cm d'épaisseur est étudiée. Elle consiste en 5 couches (Tableau II.12) comprenant le béton de chanvre de 36 cm au milieu de la paroi, l'enduit chanvre-chaux de 1 cm du côté intérieur et trois couches de sable-chaux de 1 cm chacune réparties de part et d'autre du béton de chanvre comme montré sur la Figure II.79. Les températures et humidités relatives sont suivies au milieu ( $x = 18$  cm) de la paroi en béton de chanvre, du côté extérieur ( $x = 29$  cm) et à l'interface extérieure béton de chanvre/ sable-chaux ( $x = 36$  cm). Pendant 45 jours, la paroi est soumise aux conditions de température et d'humidité relative comme montré dans le Tableau II.11.

Séquence	Côté intérieur		Côté extérieur	
	Température (°C)	Humidité relative (%)	Température (°C)	Humidité relative (%)
<b>t &lt; 2 jours</b>	23	50	23	50
<b>2 &lt; t &lt; 20 jours</b>	23	50	32	30
<b>20 &lt; t &lt; 34 jours</b>	23	50	16	85
<b>34 &lt; t &lt; 45 jours</b>	23	50	23	50

Tableau II.11 : Protocole expérimental appliqué (Colinart et al., 2016)

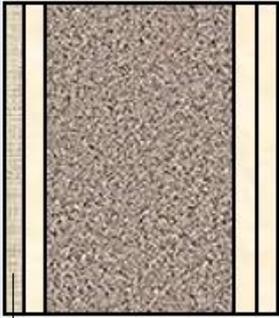
 <p>Figure II.79 : Coupe transversale de la paroi testée</p> <p>Enduit chanvre-chaux</p>	Propriétés	Densité ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Capacité thermique ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	Conductivité thermique ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	Coefficient de résistance à la vapeur (-)
	Béton de chanvre	$\rho = 450$	$C_p = 1000$	$\lambda = 0,10$	$\mu = 5$
	Sable-chaux	$\rho = 1650$	$C_p = 830$	$\lambda = 0,4$	$\mu = 16$
	Chanvre-chaux	$\rho = 930$	$C_p = 1000$	$\lambda = 0,20$	$\mu = 10$

Tableau II.12 : Propriétés des matériaux de la paroi testée (Colinart et al., 2016)

Les courbes moyennes de sorption relatives au chanvre-chaux et sable-chaux sont calées par la méthode des moindres carrés selon l'approche de Merakeb en se basant sur les données expérimentales de Colinart et al. (2016).

Pour le béton de chanvre, les deux approches de Merakeb et Rode sont testées pour le modèle standard de transferts de chaleur et masse (Mod\_1) et celui de thermodépendance (Mod\_3). A noter que l'implémentation du modèle avec hystérésis se trouve confrontée à des limitations dans les parois multicouches en béton de chanvre au niveau de la connexion entre les interfaces. C'est pourquoi Mod\_2 et Mod\_4 ne figurent pas parmi les modèles appliqués à cette paroi. Les résultats sont présentés à partir du 3<sup>ème</sup> jour pour minimiser les effets des conditions initiales.

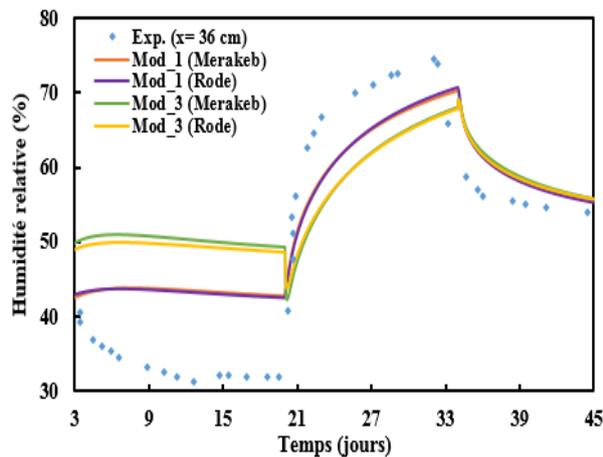


Figure II.80 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 36 \text{ cm}$

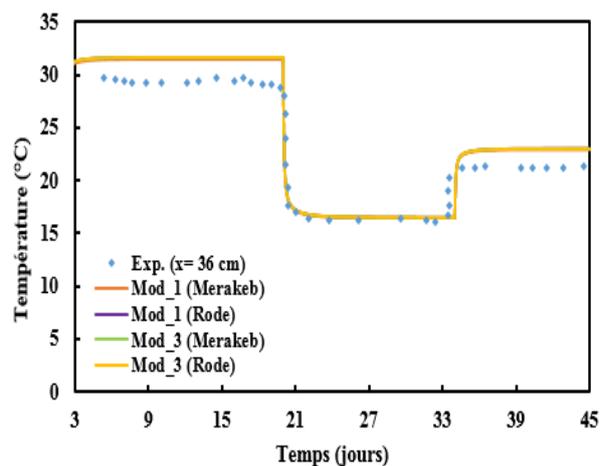


Figure II.81 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 36 \text{ cm}$

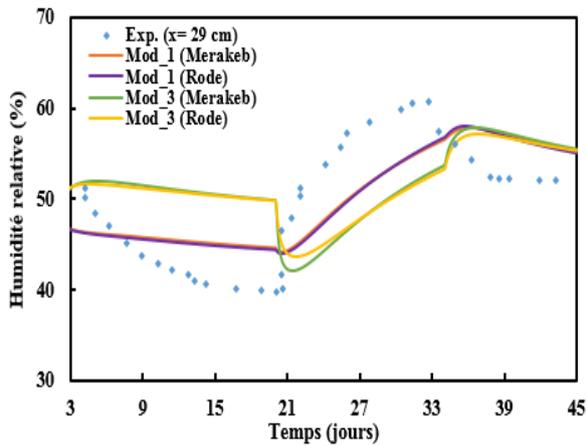


Figure II.82 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 29$  cm

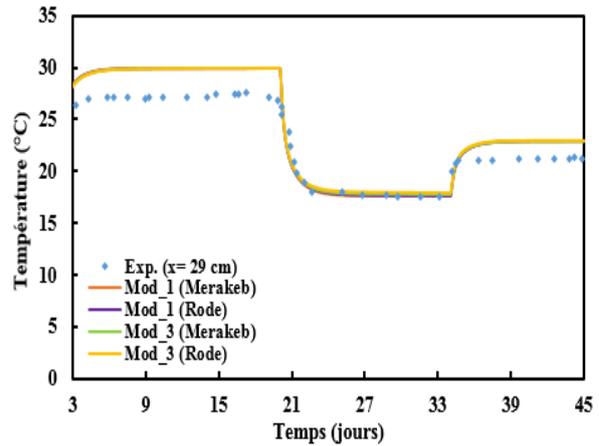


Figure II.83 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 29$  cm

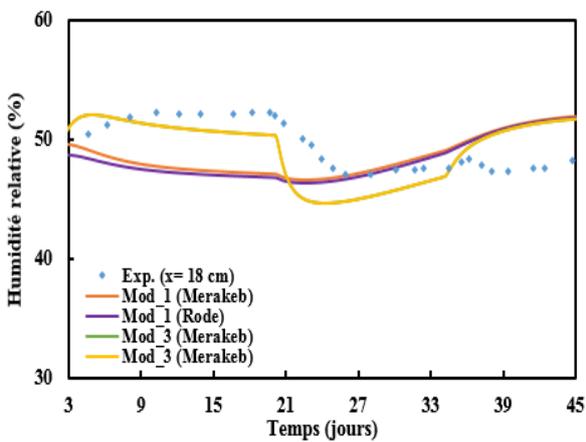


Figure II.84 : Comparaison des humidités relatives expérimentales et numériques en  $x = 18$  cm

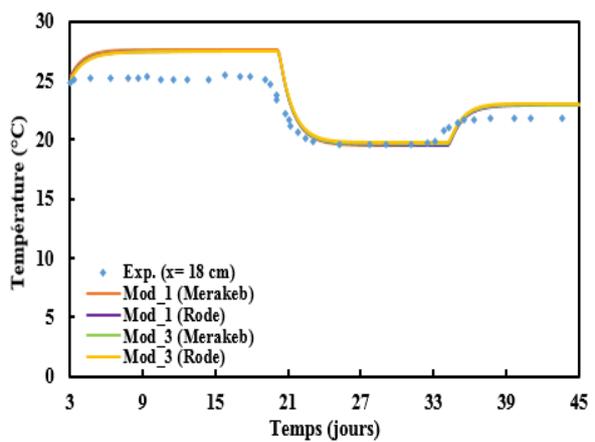


Figure II.85 : Comparaison des températures expérimentales et numériques en  $x = 18$  cm

Les résultats des Figures II.81, II.83 et II.85 montrent que les profils de températures sont presque confondus pour les quatre versions de modèles testés avec une bonne prédiction de l'allure dynamique des variations surtout pour la troisième séquence. Les températures sont majorées de 1 à 2 °C pour les deuxième et quatrième séquences mais restent dans les limites acceptables des précisions des mesures. Toutefois, les résultats pour l'humidité relative montrent des limitations surtout pendant la deuxième séquence de l'essai : A l'interface béton de chanvre/enduit ( $x = 36$  cm) (Figure II.80), des écarts remarquables (de l'ordre de 15%) sont observés pendant la deuxième séquence. Les troisième et quatrième séquences sont mieux prédites dans les variations de l'allure dynamique avec des avantages pour les modèles standards Mod\_1 (Merakeb) et Mod\_1 (Rode). A noter que les résultats sont très proches entre les deux variantes du même modèle.

A  $x = 29$  cm, des observations identiques sont constatées pour les humidités relatives (Figure II.82) et températures (Figure II.83), toujours avec des avantages pour les modèles standards.

Au milieu de la paroi, seuls les modèles à thermodépendance Mod\_3 (Rode) et Mod\_3 (Merakeb) sont capables de reproduire au mieux l'allure dynamique de l'humidité relative

(Figure II.84) avec des résultats quasi-superposés entre eux. Les températures sont très bien prédites, surtout aux troisième et quatrième séquences (Figure II.85).

En résumé, les écarts obtenus à la deuxième séquence de conditions reviennent au fait de ne pas maîtriser totalement l'histoire du matériau à l'initialisation avant les deux premiers jours. Une fois simulée avec les sollicitations, la paroi présente des améliorations dans les prédictions de l'humidité relative. En outre, considérer la thermodépendance seule du béton de chanvre n'est pas suffisante, et ainsi une autre piste envisagée c'est de considérer la thermodépendance dans toutes les couches de la paroi, difficile à réaliser dans ce cas vu le manque de données expérimentales (chaleur isostérique de chaque matériau). De plus, considérer l'impact de l'hystérésis dans le béton de chanvre et les autres couches également est l'une des perspectives à tester.

### II.6.2. Impact du béton de chanvre en tant qu'isolant intérieur ou extérieur

Le but de cette partie c'est d'évaluer l'impact du béton de chanvre utilisé du côté intérieur ou extérieur. Pour ce faire, une paroi multicouches en béton de chanvre est créée. Elle est composée de quatre couches comme montré dans le Tableau II.13. Le chanvre-chaux est utilisé comme enduit intérieur et le sable-chaux en tant qu'enduit extérieur. Les épaisseurs de la paroi sont choisies de façon à avoir une paroi règlementaire dont la résistance thermique est conforme à celle de la (RT, 2012) et supérieure à  $3,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Dans cette position (Figure II.86), le béton de chanvre est l'isolant placé du côté extérieur. Les conditions climatiques extérieures de la ville de Nancy servent de données d'entrée pour les simulations annuelles basées sur un modèle standard de transferts de chaleur et masse selon l'approche de Merakeb. Du côté intérieur, la température est fixée à  $23^\circ\text{C}$  entre Mai et Septembre et  $20^\circ\text{C}$  ailleurs. La densité de vapeur générée dans l'ambiance intérieure est donnée d'après Perier-Muzet et al. (2015) par :

$$\rho_{\text{int}} = \rho_{\text{ext}} + 0.003 \quad (\text{II.43})$$

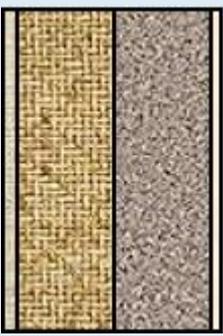
 A B C D Figure II.86 : Coupe transversale de la paroi A : côté intérieur	Propriétés	Epaisseur (m)	Densité ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Capacité thermique ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Conductivité thermique ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
	<b>A : Chanvre-chaux</b>	$e = 0,02$	$\rho = 930$	$C_p = 1000$	$\lambda = 0,20$
	<b>B : Brique</b>	$e = 0,20$	$\rho = 700$	$C_p = 850$	$\lambda = 0,1869$
	<b>C : Béton de chanvre</b>	$e = 0,20$	$\rho = 450$	$C_p = 1000$	$\lambda = 0,00818 + 2,76 \times 10^{-4}T + 0,0024w$
	<b>D : Sable-chaux</b>	$e = 0,015$	$\rho = 1650$	$C_p = 830$	$\lambda = 0,4$

Tableau II.13 : Constitution et propriétés des matériaux de la paroi

Les différentes configurations de parois testées sont détaillées dans le Tableau II.14. Les températures de surface intérieure ainsi que les déperditions thermiques au sein des parois sont exploitées pour chacune des configurations. Deux périodes (hivernale et estivale) de 20 jours chacune sont sélectionnées pour la comparaison.

Configurations	Caractéristiques
BC_ext	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation du béton de chanvre comme isolant extérieur</li> </ul>
BC_int	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation du béton de chanvre comme isolant intérieur</li> </ul>
BC_sandwich	<ul style="list-style-type: none"> <li>Division de la couche de 20 cm de béton de chanvre en deux sous-couches de 10 cm chacune placées de part et d'autre de la brique avec les mêmes types d'enduits que précédemment</li> </ul>
BC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation de la couche de béton de chanvre avec les deux couches d'enduits uniquement</li> </ul>

Tableau II.14 : Différentes configurations testées pour la paroi multicouches

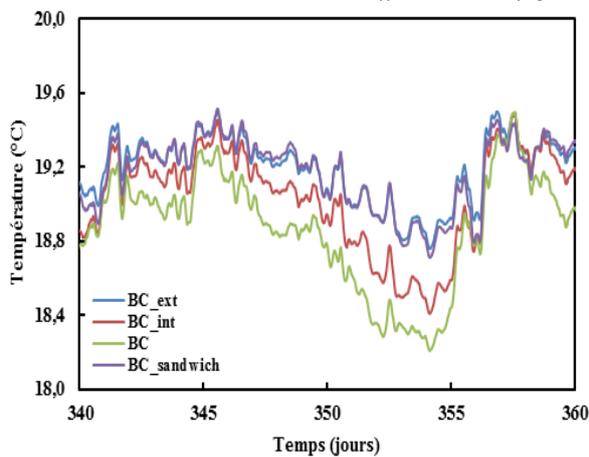


Figure II.87 : Température de surface intérieure en hiver (20 jours en Décembre)

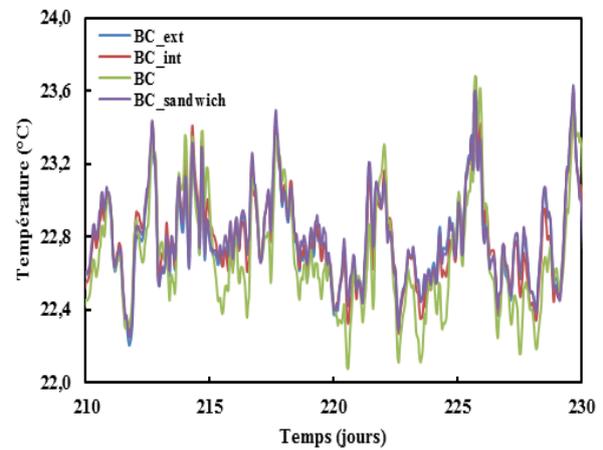


Figure II.88 : Température de surface intérieure en été (20 jours en Aout)

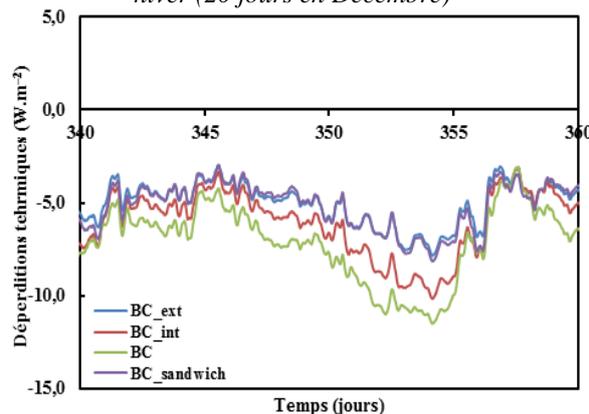


Figure II.89 : Déperditions thermiques en hiver (20 jours en Décembre)

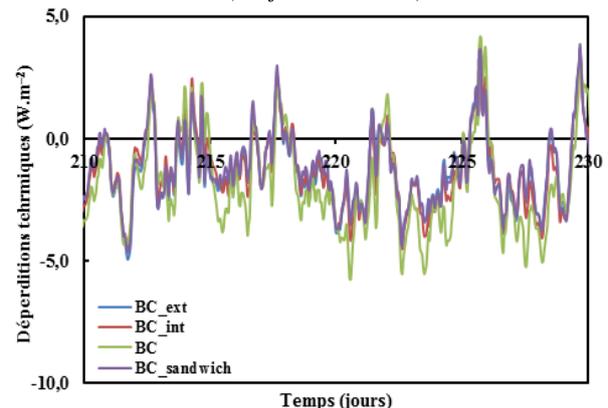


Figure II.90 : Déperditions thermiques en été (20 jours en Aout)

Les Figures II.87 et II.88 montrent que la paroi ayant l'inertie thermique et ainsi la résistance thermique les plus faibles (BC) présente la température de surface la moins élevée en hiver et la plus fluctuante en été avec des pics maximaux à plusieurs reprises. Le comportement de la

paroi est différent entre la saison hivernale et estivale selon la position du béton de chanvre. En effet, le béton de chanvre placé du côté extérieur fait augmenter légèrement (de l'ordre de 0,5°C) la température de surface intérieure en hiver par rapport au béton de chanvre placé du côté intérieur. Ceci se voit clairement pour les configurations BC\_ext et BC\_sandwich (où une partie du béton de chanvre est à l'extérieur). Par contre, pour la saison estivale, la température de surface intérieure est légèrement plus élevée avec le béton de chanvre du côté intérieur. Cette différence pourrait être attribuée à l'effusivité du béton de chanvre, qui étant inférieure à celle de la brique, fait chauffer la couche de béton de chanvre en été en emmagasinant progressivement de la chaleur sans la restituer rapidement, augmentant ainsi la température de surface intérieure lorsqu'il est placé du côté intérieur. Pour valider cette hypothèse, les températures aux interfaces Brique/BC et Chanvre-chaux/Brique ou Chanvre-chaux/BC sont tracées pour les trois configurations (BC\_ext, BC\_int et BC\_sandwich) tout au long de l'année dans les Figures II.91 et II.92 .

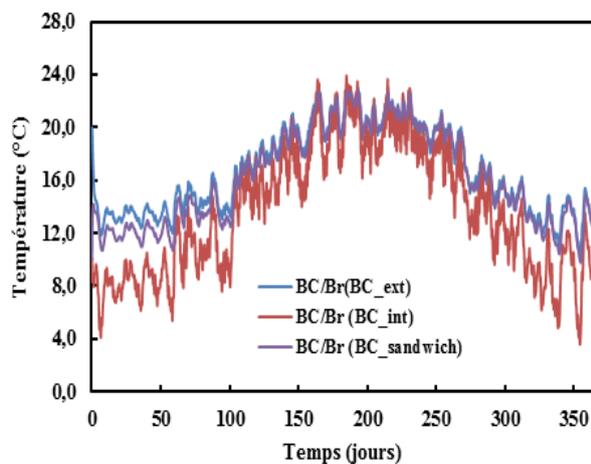


Figure II.91 : Températures aux interfaces Brique/Béton de chanvre

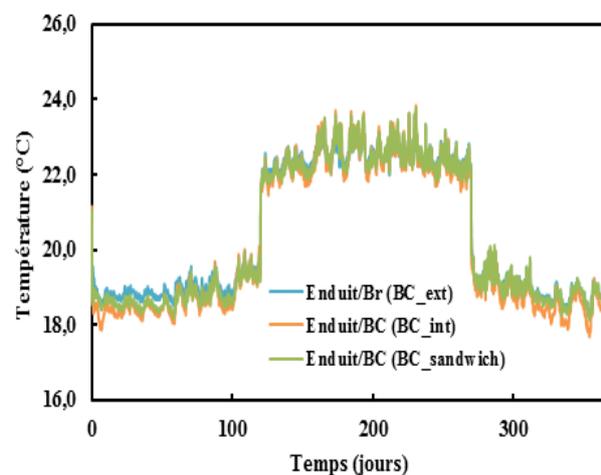


Figure II.92 : Températures aux interfaces Chanvre-chaux/Brique ou Chanvre-chaux/Béton de chanvre

La température de l'interface BC/Br (Figure II.91) est la plus élevée en hiver lorsque le béton de chanvre est placé du côté extérieur (BC\_ext ou BC\_sandwich). En été, elle augmente dans le cas du béton de chanvre placé du côté intérieur (BC\_int). Cette même tendance est remarquée aux températures des interfaces entre l'enduit Chanvre-Chaux et la couche adjacente du côté intérieur (Figure II.92), ce qui confirme les résultats.

D'autre part, les phénomènes thermodynamiques de dégagement ou d'absorption de chaleur qui accompagnent respectivement l'adsorption exothermique et la désorption endothermique dans la paroi contribuent en partie à expliquer ces résultats.

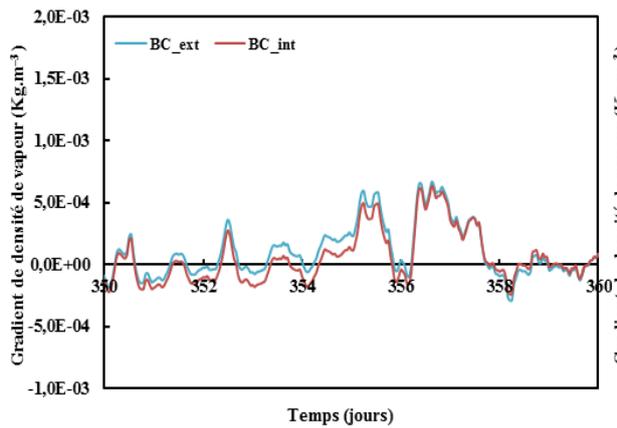


Figure II.93 : Gradient de densité de vapeur à la surface intérieure en hiver (10 jours en décembre)

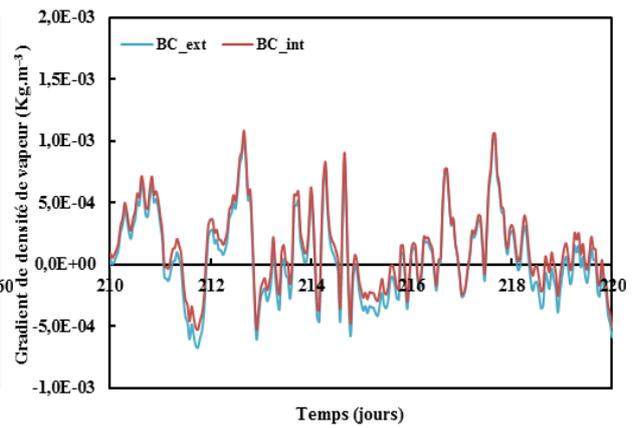


Figure II.94 : Gradient de densité de vapeur à la surface intérieure en été (10 jours en été)

Les Figures II.93 et II.94 représentent les gradients de densité de vapeur entre l'ambiance intérieure à la paroi et la surface intérieure. Tant que ce gradient est positif, ceci signifie que la paroi est en cours d'adsorption. En hiver (Figure II.93), l'adsorption dans la paroi est favorisée lorsque le béton de chanvre est placé du côté extérieur. Accompagnée d'un dégagement de chaleur, cette adsorption fait ainsi élever la température de la surface de la paroi. Par contre, en été (Figure II.94) l'adsorption est favorisée en journée pour le béton de chanvre du côté intérieur et la désorption pendant la nuit pour le béton de chanvre placé du côté extérieur, ce qui réchauffe la paroi pour le premier cas et permet de la refroidir pour le second. Ainsi, la température de surface intérieure est plus élevée pour le béton de chanvre du côté intérieur durant cette période.

Parallèlement, les profils des déperditions thermiques collent bien avec les variations de la température de surface intérieure (Figures II.89 et II.90), étant donné que la température de surface la plus faible engendre les pertes les plus élevées dans la paroi (BC) et vice-versa. Ainsi, l'optimisation d'une telle paroi consiste à minimiser les déperditions thermiques qui influent principalement sur les consommations de chauffage et de climatisation en passant à l'échelle réelle d'un local ou d'un bâtiment.

## II.7. Conclusion

Ce chapitre contribue à étudier plusieurs aspects et phénomènes physiques dans une paroi en béton de chanvre et leur impact sur la prédiction de son comportement hygrothermique. A cette fin, plusieurs modèles numériques sont créés, implémentés et testés sous diverses conditions.

Des résultats satisfaisants pour la prédiction de température sont obtenus. Pour les humidités relatives, des résultats controversés sont observés. En effet, la prise en compte de l'hystérésis permet de prendre en compte l'âge du matériau et d'améliorer le plus la dynamique de l'évolution de son comportement hygrothermique mais elle ne peut pas, à elle seule, assurer l'amélioration totale des prédictions de température et d'humidité au sein d'une paroi en béton de chanvre. Ensuite, le modèle à thermodépendance est prometteur de son côté mais reste limité et ne permet pas de reproduire en totalité les profils et dynamiques expérimentaux. Chacun de ces deux aspects contribue à améliorer les résultats dans des séquences de mesures particulières et pas forcément dans les autres avec des avantages pour la prise en compte de l'hystérésis dans la modélisation. L'approche du modèle complet est capable de combler plusieurs lacunes et d'apporter des améliorations dans les prédictions, mais elle nécessite des efforts particuliers dans l'implémentation des modèles ainsi que des données expérimentales comme la chaleur isostérique de sorption qui ne sont pas forcément disponibles dans la littérature. Par conséquent, le choix d'un modèle définitif de prédiction du comportement hygrothermique n'est pas facile à effectuer, tout en mettant l'accent sur les performances acceptables du modèle standard de transferts du côté intérieur de la paroi et des modèles à hystérésis lorsque la paroi est sollicitée.

Dans cette vision, et dans le but d'aller plus loin dans l'étude de ces aspects, le travail effectué dans ce chapitre sera abordé mais cette fois à une échelle plus étendue, celle du local, qui fera l'objet du chapitre suivant.

---

---

## **Chapitre III : Etudes numériques du béton de chanvre à l'échelle du local**

---

---

Les recherches dans la littérature sur le béton de chanvre à l'échelle du local ou du bâtiment sont limitées tant sur le plan expérimental que numérique. Aussi, ce chapitre contribue à combler ces lacunes en étudiant numériquement un local en béton de chanvre. Les aspects liés aux conditions intérieures de température et d'humidité relative ainsi qu'aux besoins de consommation énergétiques du local sont abordés à l'aide de plusieurs modèles numériques. La comparaison de la prise en compte de l'hystérésis et de la thermodépendance des courbes de sorption face au modèle standard de transfert est établie. Par manque de données expérimentales, les interprétations et comparaisons se basent sur la compréhension des phénomènes physiques qui contrôlent les phénomènes de transfert dans les enveloppes du local.

### III.1. Introduction

Généralement, le but du passage des échelles du matériau et de la paroi à l'échelle d'un bâtiment est de faire le lien entre les propriétés des matériaux en question et les performances énergétiques des bâtiments. Les études à l'échelle du bâtiment sont donc d'une ampleur significative pour étendre l'application des matériaux à une échelle plus grande. Des situations complémentaires sont prises en considération comme la ventilation adoptée, la présence des occupants, les sources de chaleur et vapeur intérieures. Concernant le béton de chanvre, la littérature présente un déficit de travaux réalisés à l'échelle du bâtiment sur les deux volets expérimental et numérique. C'est dans ce cadre que ce chapitre s'inscrit en développant des modèles numériques à l'échelle d'un local fictif en béton de chanvre et prenant en compte les aspects traités à l'échelle de la paroi, comme l'hystérésis et la thermodépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre. Deux stratégies de ventilation sont testées, l'une autoréglable et l'autre hygroréglable, ainsi que différentes variantes du scénario d'occupation de la pièce. L'influence du climat étudié ainsi que des propriétés du béton de chanvre est abordée.

### III.2. Modélisation à l'échelle du local

#### III.2.1. Approches de modélisation à l'échelle du local

Selon Mora (2003), Il existe quatre niveaux de finesse dans la modélisation lorsque le transfert hygrométrique au niveau d'un bâtiment est traité :

- Modélisation monozone (Figure III.1) : cette modélisation considère que le bâtiment est une enceinte dont les caractéristiques sont parfaitement uniformes et ne fait donc l'objet que d'un jeu de données.
- Modélisation multizones (Figure III.2) : le bâtiment est considéré comme un ensemble de zones idéalisées par un nœud de calcul avec une hypothèse de mélange parfait et instantané.
- Modélisation intermédiaire (Figure III.3) : le bâtiment au sein d'une même zone est partitionné afin d'affiner le modèle.
- Modélisation par code de champ (Figure III.4) : les techniques de CFD sont utilisées pour mettre en évidence différentes variantes des équations de Navier Stokes.

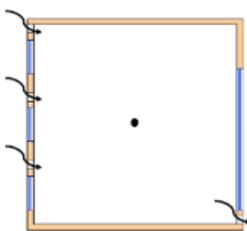


Figure III.1: Approche monozone (Mora, 2003)

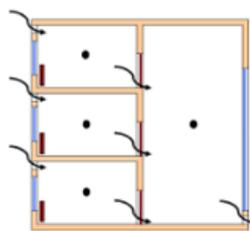


Figure III.2: Approche multizones (Mora, 2003)

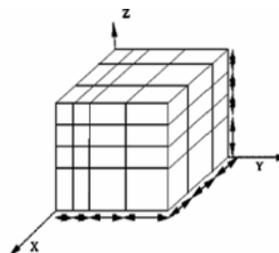


Figure III.3: Approche intermédiaire (Mora, 2003)

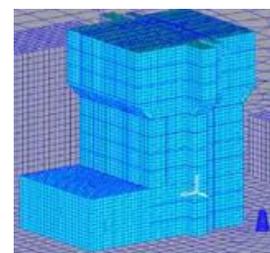


Figure III.4: Approche par CFD (Mora, 2003)

Dans ce qui suit, l'approche monozonale est retenue dans la modélisation du local étudié.

### III.2.2. Modèle de l'ambiance intérieure

La modélisation à l'échelle du local se base sur l'approche de Philip et De Vries (Philip and De Vries, 1957 ; De Vries, 1958), et sur celle de Mendes (Mendes, 1997) utilisée dans le chapitre précédent au niveau de la paroi. A cela s'ajoutent les équations de conservation de l'énergie et de la masse de l'air intérieur considéré comme un gaz parfait ayant des propriétés uniformes. La zone intérieure est représentée sur le schéma de la Figure III.5.

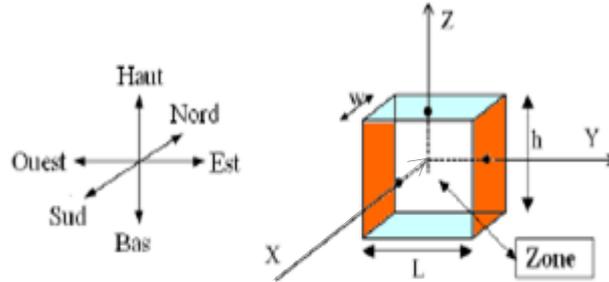


Figure III.5 : Représentation schématique de la zone intérieure du local

En supposant que l'air parvient au local des côtés Ouest, Sud et Bas et sort par les côtés Est, Nord et Haut, le bilan massique de l'air sec à l'intérieur s'écrit :

$$\sum_{i=1}^n Q_s = 0 \quad (\text{III.1})$$

$$Q_{s,\text{Ouest}} - Q_{s,\text{Est}} + Q_{s,\text{Sud}} - Q_{s,\text{Nord}} + Q_{s,\text{Bas}} - Q_{s,\text{Haut}} = 0 \quad (\text{III.2})$$

$Q_s$  est le débit d'air sec entrant ou sortant. Suivant le même principe, la variation de l'humidité contenue dans l'air intérieur est due aux transferts d'humidité et de flux de vapeur d'eau avec les locaux adjacents, aux gains ou pertes dus à l'infiltration d'air ou à la ventilation dans la pièce ainsi qu'aux sources de génération d'humidité relatives aux habitants. Ainsi, le bilan massique de l'air humide s'énonce comme suit :

$$V \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = Q_{m,\text{Ouest}} - Q_{m,\text{Est}} + Q_{m,\text{Sud}} - Q_{m,\text{Nord}} + Q_{m,\text{Bas}} - Q_{m,\text{Haut}} + Q_{m,\text{sources}} \quad (\text{III.3})$$

Où  $\rho_v$  représente la masse volumique de la vapeur d'eau et  $Q_m$  le débit de flux de vapeur entrant ou sortant. De ce fait, l'énergie contenue dans le local est conservée et la variation temporelle de la température de l'air intérieur est calculée par :

$$(\rho_s C_{p,s} + I) V \frac{\partial T}{\partial t} = \phi_{\text{Ouest}} - \phi_{\text{Est}} + \phi_{\text{Sud}} - \phi_{\text{Nord}} + \phi_{\text{Bas}} - \phi_{\text{Haut}} + \phi_{\text{sources}} \quad (\text{III.4})$$

Avec  $\rho_s$  la masse volumique de l'air sec,  $C_{p,s}$  sa capacité calorifique,  $\phi$  le flux de chaleur transféré et  $I$  l'inertie thermique de la zone. En d'autres termes, la chaleur nette transférée dans la pièce à travers ses faces doit être égale à la chaleur emmagasinée dans le volume d'air à l'intérieur. Ceci englobe les flux de chaleur à travers l'enveloppe (rayonnement à grandes et

courtes longueur d'ondes), les sources de charges thermiques additionnelles, les échanges d'air dus à la convection naturelle ou HVAC et les pertes thermiques dues aux ponts thermiques.

### III.2.3. Modélisation des transferts entre les parois et les environnements interne et externe

La section III.2.2 précédente signale les différents échanges thermiques et massiques qui ont lieu entre l'air à l'intérieur, les faces du local et l'ambiance extérieure. Ces échanges sont régis par des coefficients de transferts thermiques  $h_T$  et massiques  $h_m$  liés par la relation de Lewis suivante :

$$Le = \frac{h_T}{h_m \times \rho_a \times C_{p_a}} \quad (\text{III.5})$$

où  $\rho_a$  et  $C_{p_a}$  sont respectivement la masse volumique et la chaleur spécifique de l'air. Les flux thermiques radiatifs représentent la somme des flux radiatifs de courte longueur d'onde CLO et de grande longueur d'onde GLO. Quant aux flux GLO, ils sont dus aux échanges radiatifs entre une surface considérée et le sol, le ciel et les surfaces voisines. Les densités de flux échangés entre la surface et le sol sont données par (Mendonça, 2004):

$$\phi_{\text{GLO,sol}} = \sigma(\epsilon_i T_i^4 - \epsilon_{\text{sol}} T_{a,e}^4) \left( \frac{1 - \cos\alpha}{2} \right) \quad (\text{III.6})$$

La température du sol (en K) est supposée égale à celle de l'environnement  $T_{a,e}$ , et  $\alpha$  est l'angle que fait la surface étudiée avec l'horizontale. Les flux radiatifs entre la surface et le ciel sont quantifiés par :

$$\phi_{\text{GLO,ciel}} = \sigma(\epsilon_i T_i^4 - T_{\text{ciel}}^4) \left( \frac{1 + \cos\alpha}{2} \right) \quad (\text{III.7})$$

La température fictive  $T_{\text{ciel}}$  (K) est déduite de la température de l'air extérieur  $T_{a,e}$  (K), de la température du ciel clair  $T_{cc}$  (K) et d'un coefficient de dégagement du ciel  $\delta$ :

$$T_{\text{ciel}}^4 = \delta T_{cc}^4 - (1 - \delta) T_{a,e}^4 \quad (\text{III.8})$$

$$T_{cc}^4 = 0,0552 \times T_{a,e}^{\frac{3}{2}} \quad (\text{III.9})$$

En ce qui concerne les rayonnements CLO, ils proviennent principalement du soleil et sont évalués par l'addition des flux diffus, directs et réfléchis par le sol. Le flux transmis par les parois vitrées est supposé réparti de manière homogène sur le plancher. Un pourcentage de ce rayonnement (60%) est absorbé et le reste est réfléchi vers les autres parois. Le flux radiatif CLO entre une surface intérieure  $i$  et les autres parois est calculé par :

$$\phi_{\text{CLO}}^{\text{int}} = h_r \times S_i (T_{s_i} - T_{r_m}) \quad (\text{III.10})$$

$S_i$  représente l'aire de la surface intérieure en  $m^2$ ,  $T_{s_i}$  la température de surface intérieure en K,  $T_{r_m}$  la température rayonnante moyenne en K calculée par la corrélation suivante :

$$T_{r_m} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times T_{s_i}^4}{\sum_{i=1}^n S_i} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{III.11})$$

Et  $h_r$  le coefficient de transfert radiatif linéarisé donné par :

$$h_r = 4\varepsilon\sigma_0 T_{r_m}^3 \quad (\text{III.12})$$

#### III.2.4. Présentation du local étudié

Un local fictif de  $6 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$  destiné à usage de bureau est étudié. Sa façade Sud ( $6 \times 3 \text{ m}^2$ ) est constituée d'une simple couche de 36 cm de béton de chanvre et contient une fenêtre à double vitrage couvrant 40% de sa surface ( $7,2 \text{ m}^2$ ). Les autres parois verticales sont des partitions intérieures considérées comme adiabatiques avec un revêtement en gypse des deux côtés. Les sources de chaleur dans la pièce sont dues à deux ordinateurs de 130W chacun et à une source de lumière LED de 90W. Le bureau est censé être occupé par deux personnes pendant 6 jours par semaine (du lundi au samedi de 8h à 13h et de 14h à 18h). La température interne est conditionnée selon deux stratégies : de novembre à avril, elle est fixée à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  pendant la période d'occupation et à  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  ailleurs. Et pour la période Avril-Novembre, elle est autorisée à fluctuer entre  $17^\circ\text{C}$  et  $26^\circ\text{C}$ . Les besoins de chauffage et de climatisation sont calculés à l'aide d'un régulateur PI proportionnel-intégrateur. L'approche nodale est considérée, impliquant un local limité à un seul nœud et une température et une pression uniformes de l'air intérieur. Un schéma du local étudié est présenté sur la Figure III.6. Les propriétés du béton de chanvre utilisé sont résumées dans le Tableau III.1. Deux stratégies de ventilation sont testées (Figure III.7) : tout d'abord, l'autoréglable avec un renouvellement d'air constant ( $36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) qui prend en compte la ventilation mécanique ( $0,5 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ ) et le taux d'infiltration ( $0,2 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ ) basé sur la norme NF EN 12831. Ensuite, l'hygroréglable est envisagée avec un débit d'air variable selon l'humidité relative intérieure.



Figure III.6 : Schéma du local étudié

Propriétés	Densité (kg.m <sup>-3</sup> )	Capacité thermique (J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Emissivité (-)	Perméabilité (kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .Pa <sup>-1</sup> )
Béton de chanvre	$\rho = 450$	$C_p = 1000$	$\lambda = 0,00818 + 2,76 \times 10^{-4}T + 0,0024w$	$\varepsilon = 0,8$	$\pi = 0,32 \times 10^{-10} + 5,18 \times 10^{-10} \times \varphi^{8,38}$

Tableau III.1: Propriétés du béton de chanvre

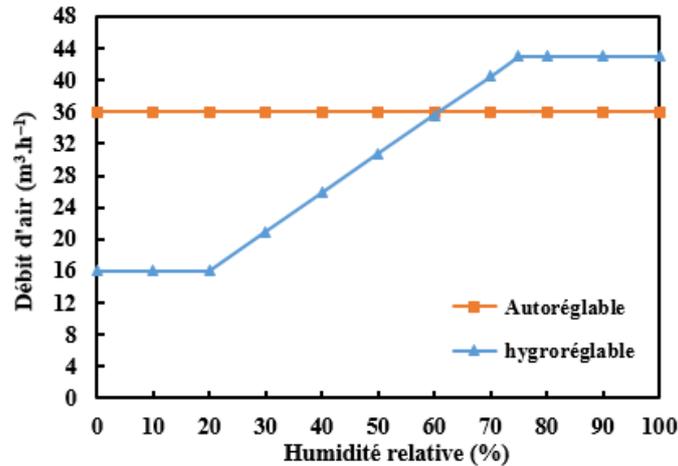


Figure III.7 : Variations du débit de ventilation suivant la stratégie

### III.3. Validation du modèle à l'échelle du local

Le modèle numérique implémenté sous SPARK est validé en premier lieu en comparant ses sorties avec celles données par le logiciel CoDyBa, Code de simulation Dynamique des Bâtiments (Noël and Roux, 2004) développé par le laboratoire de recherche CETHIL à Lyon. Les températures et humidités relatives de l'air intérieur sont exploitées, ainsi que les besoins énergétiques en chauffage et en climatisation.

#### III.3.1. Aperçu général de CoDyBa

CoDyBa est un outil de prévision du comportement thermique d'un bâtiment. Il permet d'établir un bilan énergétique et d'analyser l'influence de nombreux paramètres, à savoir, la régulation, les vitrages, les protections solaires, l'inertie ou l'orientation d'un bâtiment. Les données de base sont géométriques (parois, fenêtres, volumes intérieurs ...). Les paramètres principaux sont les conditions climatiques, les charges internes et les caractéristiques des appareils de régulation. En sortie figurent les évolutions temporelles des températures d'air, des puissances fournies et cédées, ainsi que le cumul des puissances sensibles et latentes. Le confort thermique peut également être évalué. Sa particularité est que les entités de saisie sont celles utilisées couramment par les thermiciens, tandis que les modèles de calcul sont traités de façon transparente avec une interface qui associe à chaque « entité » une icône (Figure III.8).

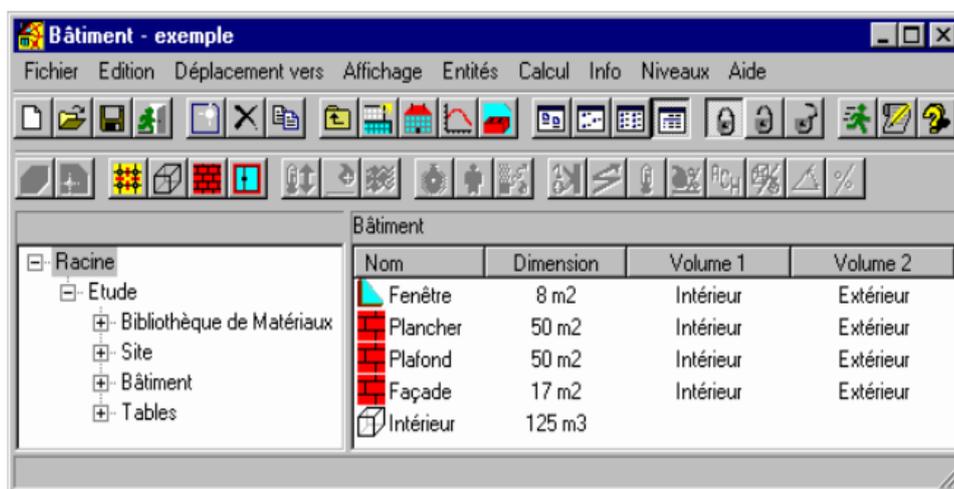


Figure III.8 : Interface de CoDyBa (Noël and Roux, 2004)

Etablir une étude d'un bâtiment-test dans CoDyBa commence en premier lieu par la définition du site où sont identifiées les conditions du terrain aux alentours du bâtiment (température et profondeur du sol, conditions-météo). Ensuite, il s'agit de créer la zone étudiée en précisant ses dimensions. Dans ce cadre, il faut identifier les matériaux qui forment les différentes parois verticales, le plancher et le plafond du bâtiment. CoDyBa dispose de plusieurs bibliothèques incluant celle des matériaux récurrents dans les bâtiments et dans laquelle la définition d'un nouveau type de matériau est possible en précisant ses propriétés intrinsèques. Une fois les parois définies, les conditions intérieures sont définies en ajoutant les profils d'utilisation de la zone, les sources de chaleur et vapeur, et les type et profil de ventilation. La présence de portes et fenêtres est prise en compte à travers une autre bibliothèque adaptée contenant plusieurs types de vitrages et portes. Ainsi, le modèle est complet et des simulations annuelles sont effectuées.

### III.3.2. Application du local-test sur CoDyBa et SPARK

Il faut préciser que le logiciel CoDyBa ne tient pas compte des transferts d'humidité dans les parois. Ainsi pour établir une comparaison réaliste avec SPARK, les coefficients d'échanges massiques sont fixés à des valeurs presque nulles dans SPARK (de l'ordre de  $10^{-14}$ ) du fait que les zéros sont susceptibles d'engendrer des problèmes de singularité dans les itérations de calcul. Les simulations sont effectuées pour une durée d'un an avec les conditions climatiques de la ville de Nancy pour les deux logiciels. Les résultats obtenus servent à initialiser une deuxième simulation sur SPARK et ceci dans le but de s'éloigner des effets des conditions initiales. Deux cas numériques sont testés : avec ou sans vitrage sur la façade Sud du local. Les résultats sont présentés ci-dessous en sélectionnant deux périodes de 1 mois chacune afin de couvrir les conditions hivernales et estivales. Les consommations énergétiques annuelles de chauffage et de climatisation sont aussi comparées.

III.3.2.1. Cas avec 40% de vitrage sur la façade Sud

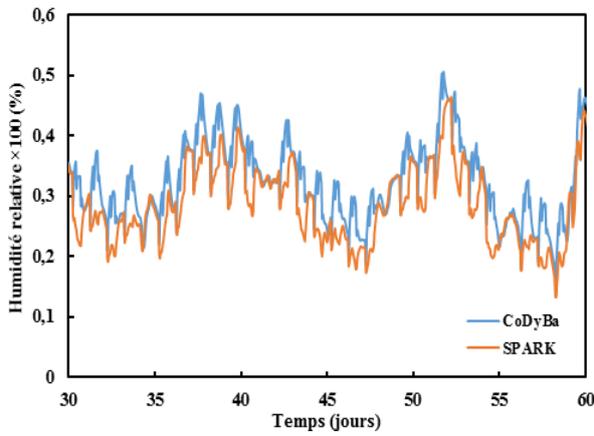


Figure III.9: Humidités relatives intérieures entre CoDyBa et SAPRK avec vitrage pour le mois de février

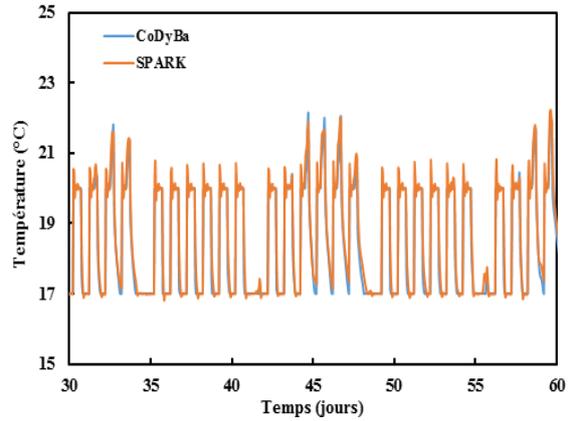


Figure III.10: Températures intérieures entre CoDyBa et SAPRK avec vitrage pour le mois de février

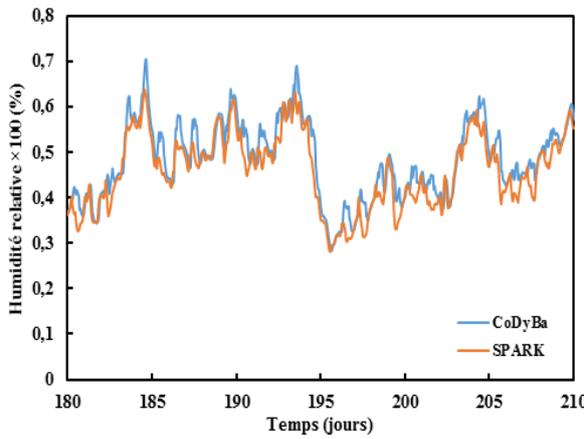


Figure III.11 : Humidités relatives intérieures entre CoDyBa et SAPRK avec vitrage pour le mois de juillet

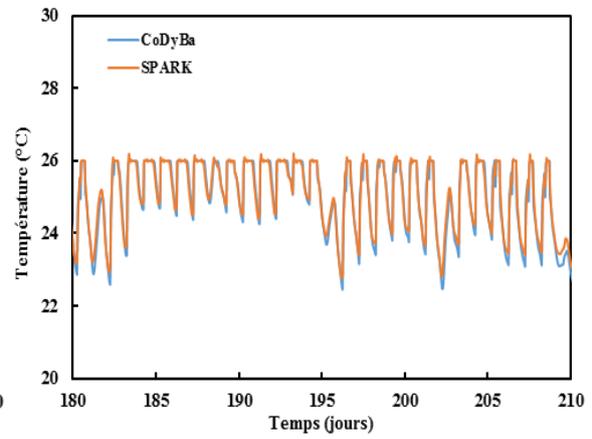


Figure III.12 : Températures intérieures entre CoDyBa et SAPRK avec vitrage pour le mois de juillet

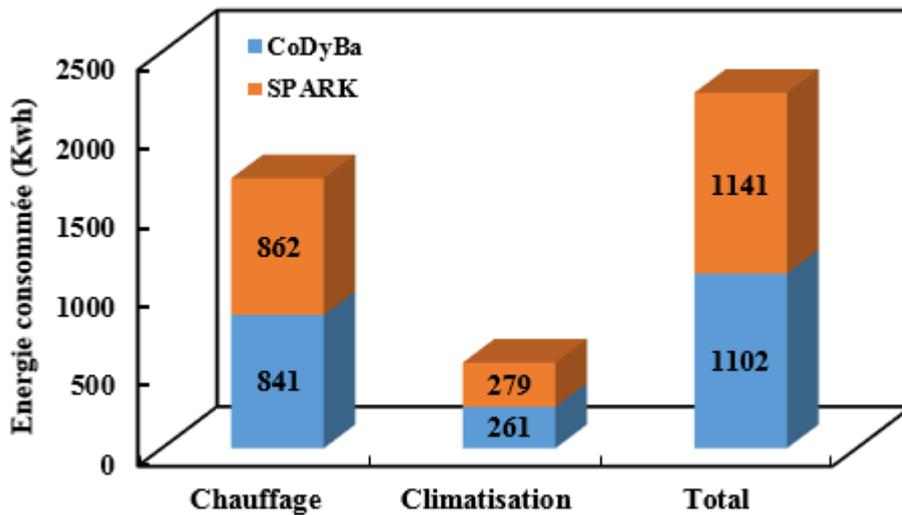


Figure III.13 : Consommations énergétiques entre CoDyBa et SAPRK pour le cas avec vitrage

Les résultats montrent que les humidités relatives prédites par CodyBa et SPARK (Figures III.9 et III.11) possèdent la même allure dynamique avec des écarts acceptables plus grands en hiver qu'en été mais qui ne dépassent pas 7% en maximum. Les profils de température intérieure (Figures III.10 et III.12) collent bien entre les deux logiciels et pour les deux saisons avec des maximums de différences de l'ordre de 0,2 °C durant la période estivale. A noter que CoDyba donne généralement des humidités relatives intérieures supérieures à SAPRK, et ainsi des températures légèrement inférieures. Ces observations sont validées dans les travaux de Brun et al. (2009) qui comparent entre plusieurs logiciels de thermique des bâtiments utilisés en France, parmi lesquels CoDyBa. En ce qui concerne les besoins énergétiques en chauffage et climatisation (Figure III.13), les résultats sont aussi très proches avec des écarts acceptables de 2,50% pour le chauffage et 6,90% pour la climatisation.

### III.3.2.2. Cas sans vitrage sur la façade Sud

Par la suite, les résultats obtenus par les deux logiciels sans vitrage sur la façade Sud du local sont présentés. Dans ce cas, le rayonnement thermique CLO absorbé par la fenêtre et entrant dans la pièce est négligé.

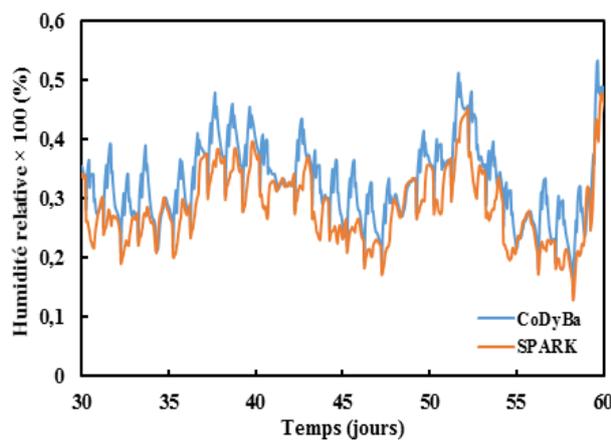


Figure III.14 : Humidités relatives intérieures entre CoDyBa et SAPRK sans vitrage pour le mois de février

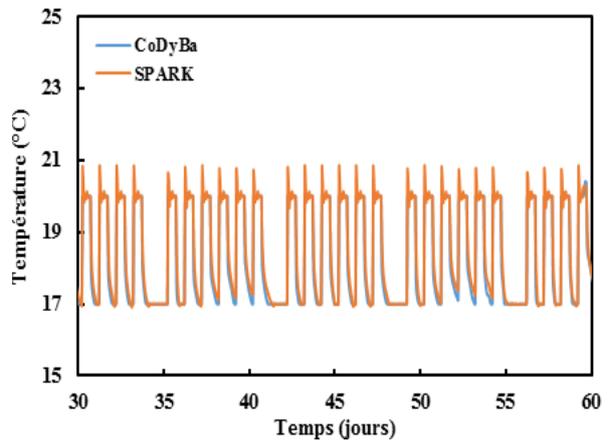


Figure III.15 : Températures intérieures entre CoDyBa et SAPRK sans vitrage pour le mois de février

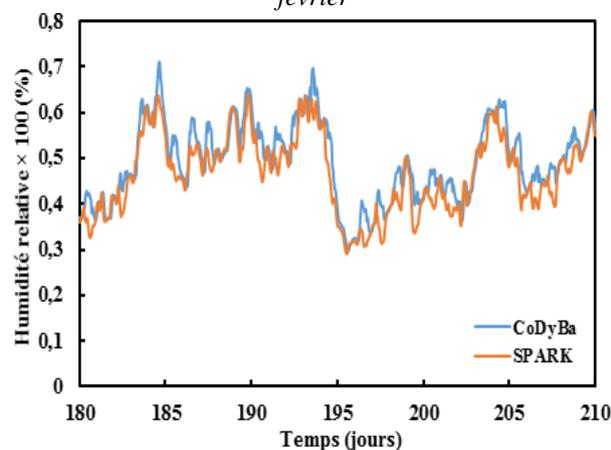


Figure III.16 : Humidités relatives intérieures entre CoDyBa et SAPRK sans vitrage pour le mois de Juillet

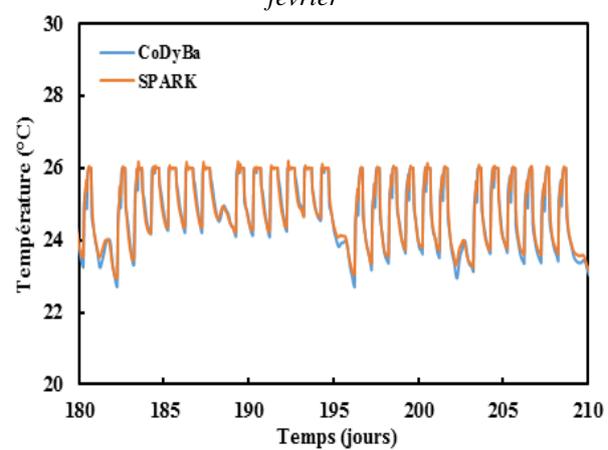


Figure III.17 : Températures intérieures entre CoDyBa et SAPRK sans vitrage pour le mois de Juillet

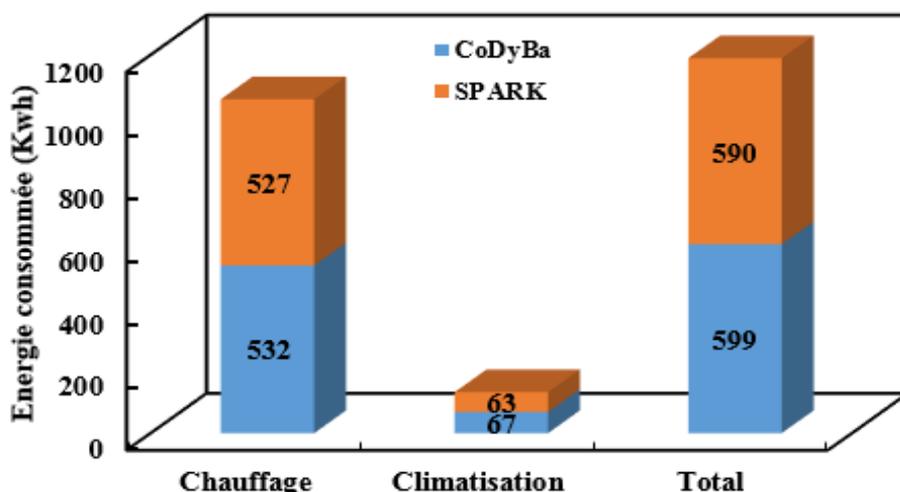


Figure III.18 : Consommations énergétiques entre CoDyBa et SPARK pour le cas sans vitrage

Des résultats semblables à ceux rencontrés dans le cas avec vitrage sont obtenus en ce qui concerne les écarts entre SPARK et CoDyBa (ils ne dépassent pas 8% au pire des cas en hiver pour les humidités relatives (Figure III.14) et 0,5°C pour les températures intérieures en été (Figure III.17)). A noter qu'avec le cas sans vitrage, les pics de température sont réduits du fait de l'absence des radiations entrant dans la pièce. Par ailleurs, l'absence de la fenêtre entraîne une diminution considérable des charges de chauffage (Figure III.18) comme résultat direct des réductions de pertes thermiques engendrées par le vitrage (coefficient de transmission thermique U) et par les infiltrations naturelles qui ont lieu à travers les joints de fenêtre. De même, les besoins en climatisation (Figure III.18) diminuent aussi suite aux réductions des pics de températures. Les écarts entre SPARK et CoDyBa sont de l'ordre de 0,95% et de 6,35% pour les besoins de chauffage et de climatisation respectivement.

Les écarts entre les deux logiciels sont principalement dus aux modes d'implémentation différents, comme par exemple le calcul des besoins énergétiques. Suite à ces comparaisons, et étant donné que CoDyBa est un logiciel ayant validé avec succès les tests « CoDyBA BESTEST Qualification » et que les écarts maximaux entre les deux logiciels ne dépassent pas 10%, le modèle thermique du local implémenté sous la plateforme SPARK est ainsi validé.

#### III.4. Comparaison des modèles numériques à l'échelle du local (Costantine et al., 2017)

Dans le chapitre précédent, il a été montré que du côté intérieur de la paroi étudiée, le comportement hygrothermique du béton de chanvre est bien prédit par les modèles numériques testés selon les différents cas, à l'exception du cas où la chaleur isostérique de sorption en fonction de l'humidité relative est appliquée. Dans cette partie, les effets de la prise en compte de l'hystérésis et de la thermodépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre sur les conditions thermiques et hygrométriques intérieures sont étudiés mais cette fois à l'échelle du local. Néanmoins, le modèle à hystérésis basé sur l'approche de Merakeb se trouve limité à cet égard. Il en résulte que l'hystérésis à l'échelle du local sera uniquement abordée avec l'approche de Rode. Les cas supplémentaires basés sur l'approche de Merakeb sont ajoutés en annexe 2. Les conditions du climat de la ville de Nancy servent comme entrées des modèles.

De la même façon, les simulations sont effectuées au début pour une période d'un an. Elles sont ensuite réinitialisées à partir des résultats de la première simulation et puis relancées pour une deuxième simulation annuelle et ceci dans le but de réduire l'effet des conditions initiales. Dans ce qui suit, Mod\_1 désigne le modèle standard de transferts de chaleur et de masse avec la courbe moyenne de sorption. Mod\_2 se réfère au modèle avec hystérésis initialisé à partir de la courbe d'adsorption et Mod\_3 représente le modèle avec thermodépendance des courbes de sorption. En effet, à la lumière des résultats du chapitre précédent, le modèle à hystérésis initialisé de la courbe d'adsorption permet de bien prédire les conditions du côté intérieur de la paroi, sachant que ces dernières vont impacter le plus les données intérieures du local.

Dans un premier temps, les résultats sont détaillés en utilisant la ventilation autoréglable à débit d'air constant pendant les périodes d'occupation.

### III.4.1. Ventilation autoréglable

Trois modèles numériques sont testés à l'échelle du local avec l'approche de Rode. Afin de mieux visualiser les résultats, deux périodes, de 10 jours chacune (début mars et début juillet), sont choisies pour effectuer les comparaisons comme montré ci-après.

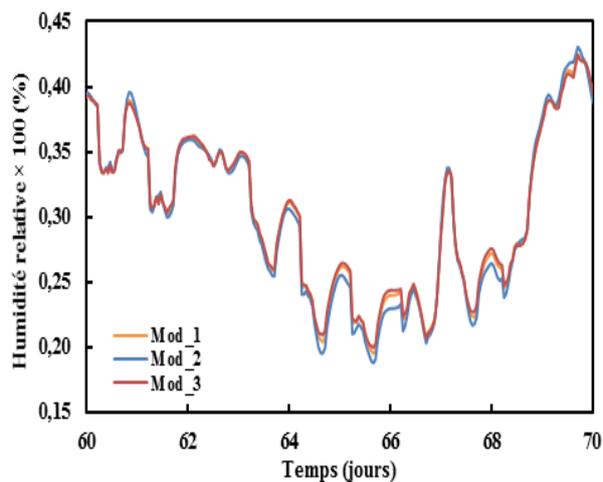


Figure III.19 : Comparaison des humidités relatives intérieures en hiver (10 jours en mars)

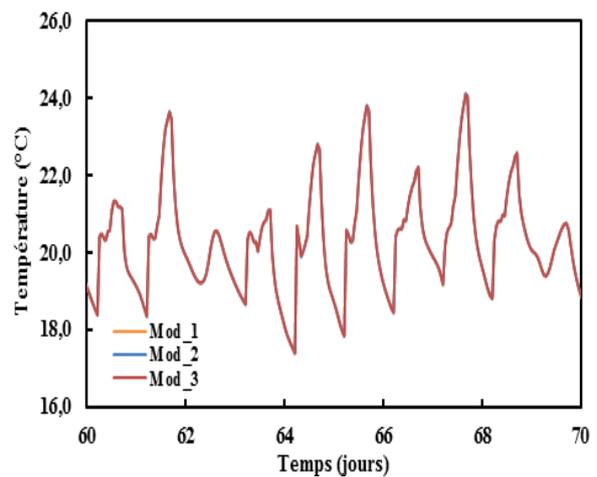


Figure III.20 : Comparaison des températures intérieures en hiver (10 jours en mars)

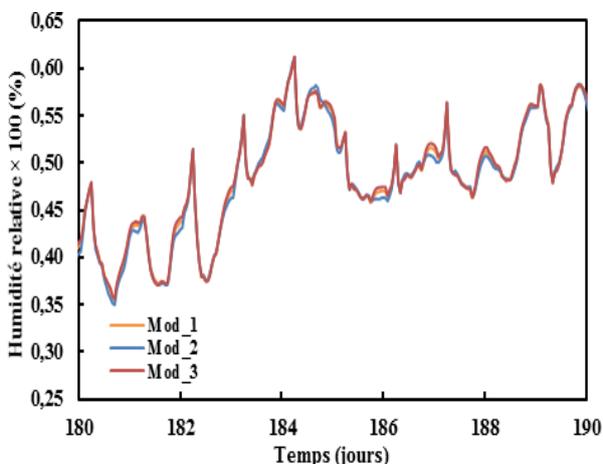


Figure III.21 : Comparaison des humidités relatives intérieures en été (10 jours en juillet)

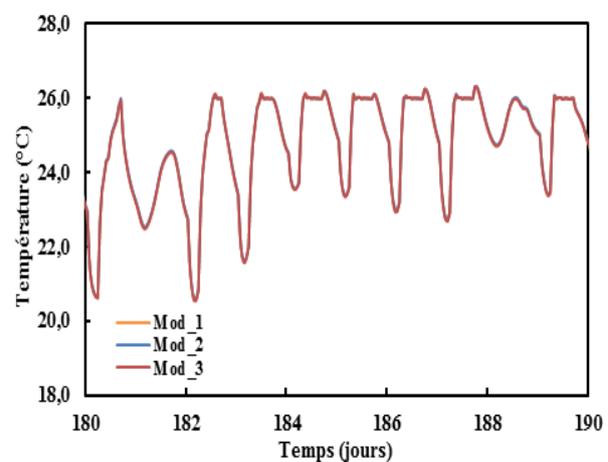


Figure III.22 : Comparaison des températures intérieures en été (10 jours en juillet)

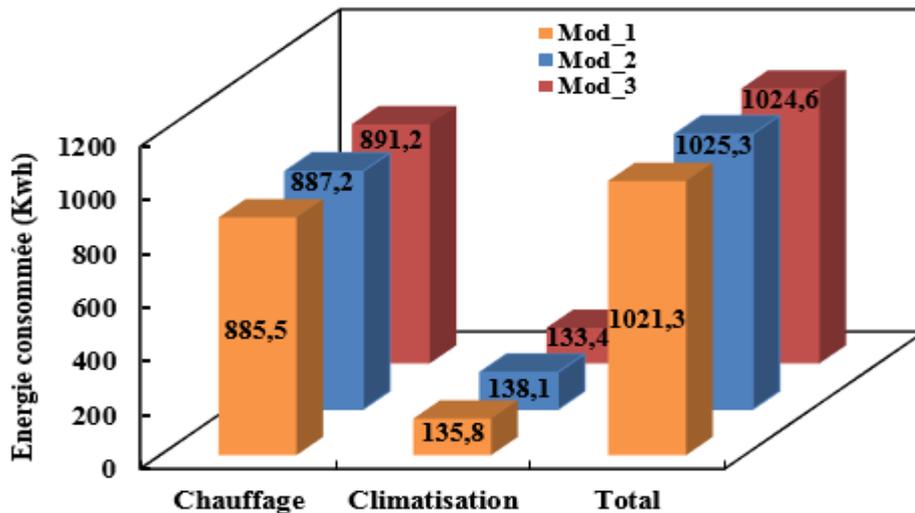


Figure III.23 : Comparaison des consommations énergétiques

Les profils de température de l'air intérieur sont quasi-superposés pour les trois types de modèles que ce soit en hiver (Figure III.20) ou en été (Figure III.22), dû à l'effet de régulation imposée. Les humidités relatives sont aussi très proches entre les trois modèles avec des écarts maximaux de l'ordre de 3% en hiver (Figure III.19) et de 1% en été (Figure III.21). La marge de variation de l'humidité relative intérieure en été (Figure III.21) est supérieure à celle en hiver (Figure III.20). Ceci revient au fait qu'en été, l'air de ventilation soufflé à l'intérieur possède une température plus élevée et ainsi une plus grande capacité à être chargé en humidité.

Le modèle avec hystérésis (Mod\_2) présente globalement l'humidité relative intérieure la plus faible, tandis que les humidités relatives les plus élevées sont observées pour Mod\_3. Mod\_1 donne généralement des humidités relatives intermédiaires entre Mod\_2 et Mod\_3. Pour essayer d'expliquer les résultats, le comportement de la paroi de béton de chanvre (adsorption ou en désorption) est analysé. Ce faisant, les différences de densité de vapeur entre l'air du local et la surface intérieure de la paroi ( $\rho_{ve,air} - \rho_{ve,surf,i}$ ) sont tracées sur les figures ci-après.

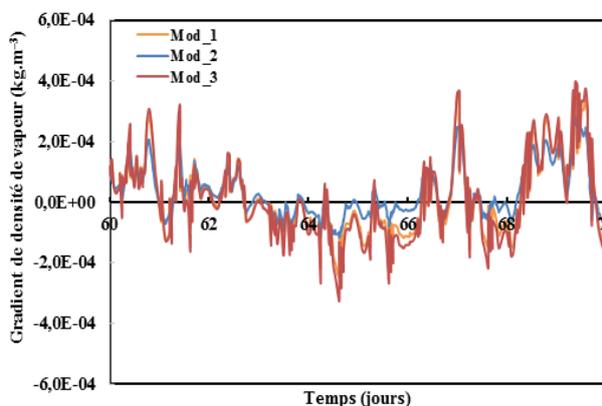


Figure III.24 : Comparaison des gradients de densité de vapeur en hiver (10 jours en mars)

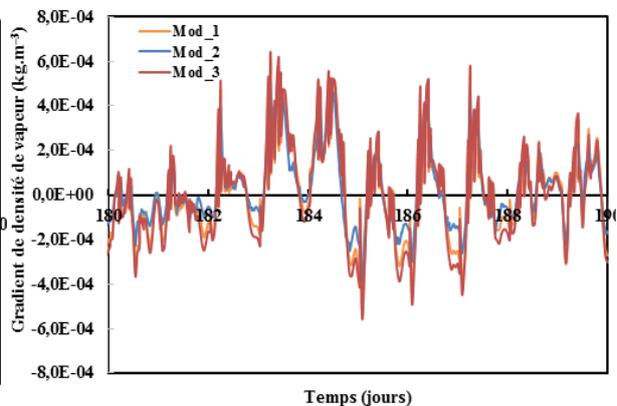


Figure III.25 : Comparaison des gradients de densité de vapeur en été (10 jours en juillet)

Pendant les dix jours d'hiver (Figure III.24) et d'été (Figure III.25) sélectionnés, la paroi est généralement en désorption pendant la nuit et en adsorption durant le jour. Mod\_2 montre que

lorsque la paroi est en désorption (différence de densité de vapeur négative), cette désorption est moins prononcée en comparaison avec Mod\_1 et Mod\_3 avec une allure de courbe plus amortie. Ce qui fait que la quantité d'humidité restituée à l'intérieur de la pièce et donc l'humidité relative de l'air intérieur sont inférieures pour Mod\_2. Lorsque la paroi considérée absorbe de l'humidité, cette adsorption est plus prononcée pour Mod\_1 et Mod\_3 que pour Mod\_2, ce qui résulte en une légère augmentation de l'humidité relative pour Mod\_2. Cependant, il faut noter que, pendant la phase d'adsorption, les différences de densité de vapeur sont proches entre Mod\_1 et Mod\_3, au contraire de la désorption où elle bien favorisée pour Mod\_3. De ce fait, l'humidité relative intérieure présentée par Mod\_3 tend à être supérieure par rapport à Mod\_1 et Mod\_2. D'ailleurs, lorsque l'enveloppe est le siège à des températures élevées (été), l'isotherme de sorption du béton de chanvre tend à glisser vers le bas par rapport à la courbe moyenne à 23°C en tenant compte de la thermodépendance. Ainsi la teneur en eau dans la paroi diminue, ce qui résulte en une paroi plus sèche et un air environnant plus humide.

Dans le même ordre d'idées, en ce qui concerne les consommations énergétiques pour le chauffage et la climatisation (Figure III.23), il faut indiquer tout d'abord que les écarts de consommation énergétique entre les trois modèles sont minimes (de l'ordre de 0,5% pour le chauffage et de 0,8% pour la climatisation). Le modèle avec thermodépendance (Mod\_3) présente l'énergie de chauffage requise la plus grande (891,2 kWh). En effet, la désorption est plus favorisée pour Mod\_3 que pour Mod\_1 et Mod\_2. Du au caractère endothermique de la désorption, l'enveloppe absorbe plus de chaleur ce qui fait augmenter les besoins de chauffage. Pendant l'été, le besoin de climatisation diminue avec Mod\_3 (133,4 kWh) pour la même raison. Entre Mod\_2 et Mod\_3, lorsque la désorption endothermique dans la paroi est favorisée pour Mod\_3, les besoins de chauffage vont diminuer pour Mod\_2 (887,2 kWh). En été, une désorption défavorisée à plusieurs reprises pour Mod\_2 engendre en d'autre terme une température de surface intérieure plus élevée, ce qui fait augmenter les besoins de climatisation à 138,1 kWh.

Par ailleurs, les consommations énergétiques du local dépendent fortement des déperditions thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment. Ceci est en rapport direct avec l'inertie thermique de l'enveloppe, plus particulièrement sa diffusivité thermique, qui décrit la vitesse à laquelle un matériau est susceptible de transmettre la chaleur d'une face à l'autre dans une même paroi, en régime de température variable. Le deuxième type d'inertie thermique est la capacité de la paroi à stocker de la chaleur. Elle est proportionnelle à l'effusivité thermique du matériau et intervient plutôt au confort d'été (Maalouf et al., 2014).

- La diffusivité thermique est donnée en  $m^2.s^{-1}$  par :  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho \times C_p}$
- L'effusivité thermique est donnée en  $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$  par :  $E = \sqrt{\lambda \times \rho \times C_p}$

La conductivité thermique du béton de chanvre est donnée dans le Tableau III.1 par :

$$\lambda = 0,00818 + 2,76 \times 10^{-4}T + 0,0024w \quad (III.13)$$

Sa capacité thermique est calculée en fonction de sa teneur volumique en eau :

$$C_p = C_0 + \frac{\rho_w \times C_{pw} \times \theta}{\rho_0} \quad (III.14)$$

L'indice « w » désigne la vapeur d'eau et « 0 » le matériau à l'état sec. Les figures ci-après présentent les diffusivité et effusivité thermiques de la paroi Sud, sur sa surface intérieure et en son milieu pour chacun des modèles.

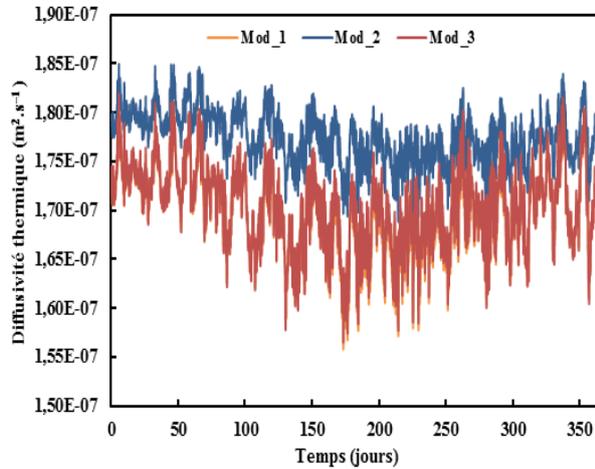


Figure III.26 : Comparaison des diffusivités thermiques sur la surface intérieure

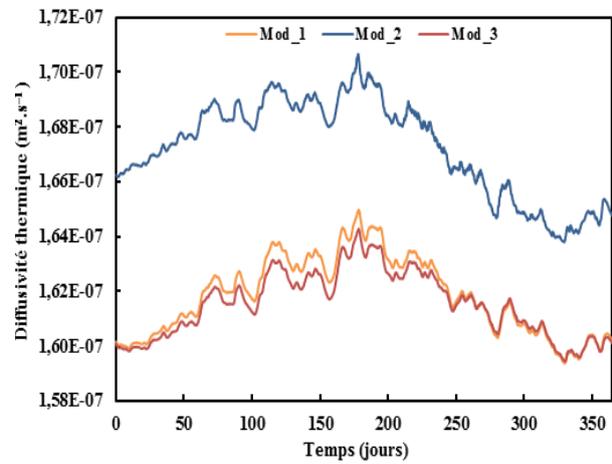


Figure III.27 : Comparaison des diffusivités thermiques au milieu de la paroi

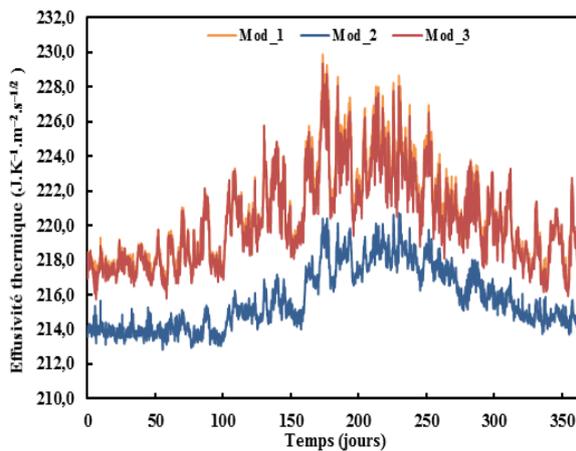


Figure III.28 : Comparaison des effusivités thermiques sur la surface intérieure

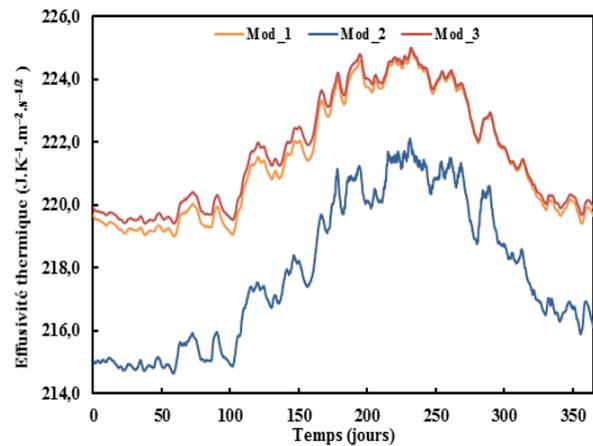


Figure III.29 : Comparaison des effusivités thermiques au milieu de la paroi

Mod\_2 présente généralement la diffusivité thermique la plus élevée sur la surface intérieure (Figure III.26) et au milieu de la paroi (Figure III.27). Cependant, il montre les effusivités thermiques les moins élevées (Figures III.28 et III.29). Ce résultat était prévisible : en effet, en initialisant Mod\_2 de la courbe d'adsorption, la teneur volumique en eau dans le matériau est toujours proche de cette courbe au bout de deux ans comme déjà vu dans le chapitre II, au moment où Mod\_1 et Mod\_3 sont initialisés à partir de la courbe moyenne de sorption et présentent donc des teneurs en eau supérieures. Les conductivité et capacité thermiques du béton de chanvre sont présentées pour comparer l'ordre de grandeur de leur variation.

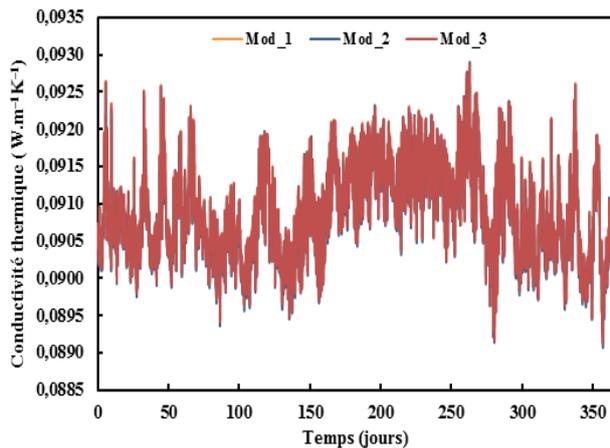


Figure III.30 : Comparaison des conductivités thermiques entre les trois modèles

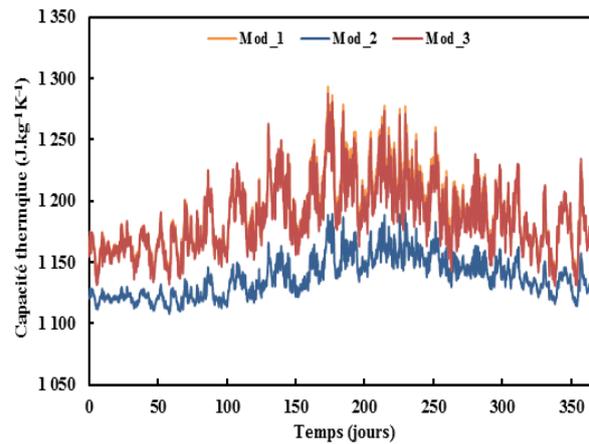


Figure III.31 Comparaison des capacités thermiques entre les trois modèles

Les conductivités thermiques du béton de chanvre sont comparables en ordre de grandeur entre les trois modèles (Figure III.30) tandis que pour les capacités thermiques, Mod\_2 donne des valeurs considérablement inférieures à Mod\_1 et Mod\_3 (Figure III.31). De ce fait, la diffusivité thermique, étant inversement proportionnelle à  $C_p$ , devient alors plus grande pour Mod\_2, au contraire de l'effusivité thermique. Ceci fait augmenter les besoins de chauffage et de climatisation pour Mod\_2 par rapport à Mod\_1.

Entre Mod\_1 et Mod\_3, la diffusivité est plus grande pour Mod\_3 sur la surface intérieure (Figure III.26) et en hiver au milieu la paroi (Figure III.27). Cependant, Mod\_3 possède une effusivité inférieure à Mod\_1 sur la surface intérieure (Figure III.28) et supérieure à Mod\_1 (Figure III.29) au milieu de la paroi. L'augmentation de la diffusivité fait augmenter les besoins de chauffage en hiver pour Mod\_3 tandis qu'en été, l'effusivité élevée pour Mod\_3 permet au matériau de stocker la chaleur beaucoup plus que Mod\_1, ce qui résulte en une demande en climatisation moins importante pour Mod\_3.

Ainsi, pour un modèle à hystérésis, il faut effectuer des simulations pluriannuelles (quatre ou cinq années) pour que les résultats convergent vers ceux des modèles à courbe moyenne de sorption comme montré dans le chapitre II, quelle que soit l'initialisation de départ (initialisation à partir de la courbe d'adsorption ou bien de la désorption).

#### III.4.2. Ventilation hygroréglable

Suivant la même logique, l'approche de Rode est testée pour les trois modèles numériques avec la ventilation hygroréglable, dont le débit d'air soufflé dans la pièce dépend du taux d'humidité relative de l'air intérieur du local (Figure III.7). Les comparaisons des températures et humidités relatives intérieures, des consommations énergétiques et des débits de ventilation sont effectués ci-après pour les trois modèles.

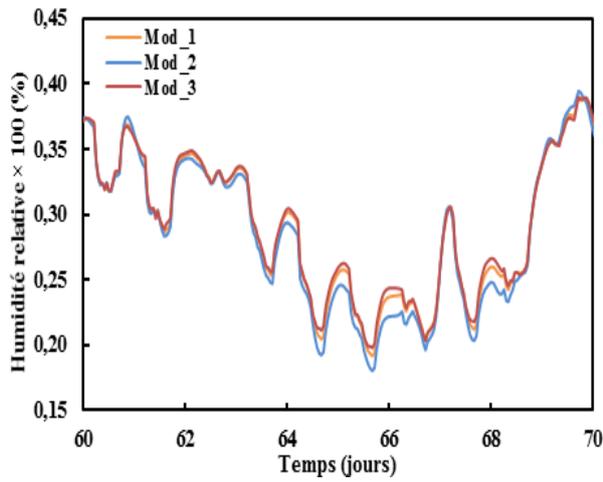


Figure III.32 : Comparaison des humidités relatives intérieures en hiver (10 jours en mars)

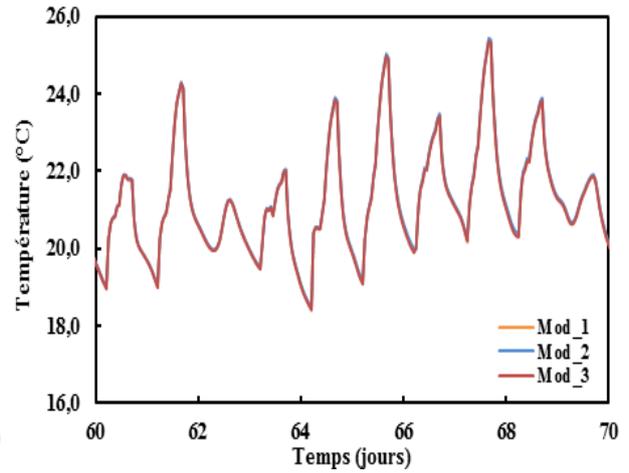


Figure III.33 : Comparaison des températures intérieures en hiver (10 jours en mars)

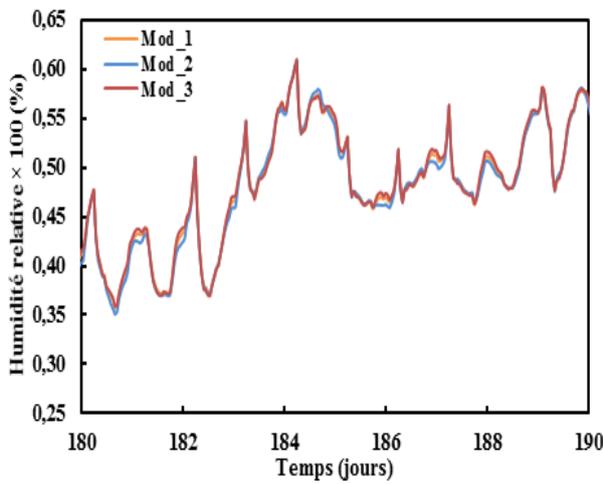


Figure III.34 : Comparaison des humidités relatives intérieures en été (10 jours en juillet)

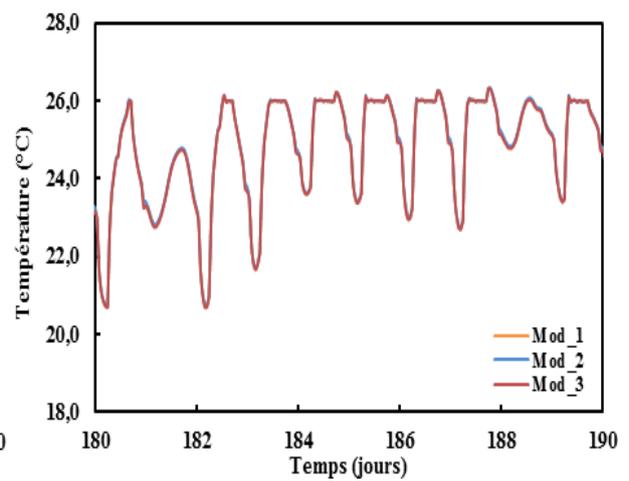


Figure III.35 : Comparaison des températures intérieures en été (10 jours en juillet)

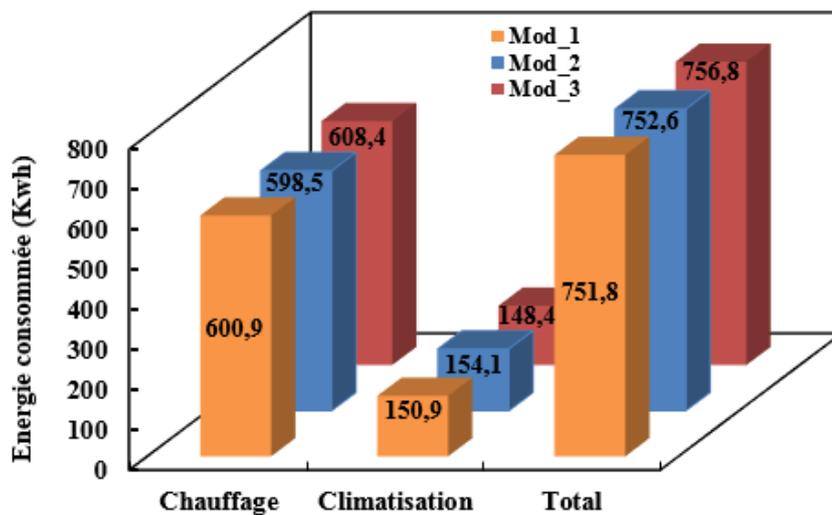


Figure III.36 : Comparaison des consommations énergétiques pour la ventilation hygroréglable

Les marges de variations de l'humidité relative intérieure (Figures III.32 et III.34) sont identiques à la ventilation autoréglable. Mod\_3 présente toujours les humidités relatives intérieures les plus élevées, sauf que cette fois-ci les écarts avec Mod\_1 et Mod\_2 sont un peu plus prononcés en hiver (Figure III.32). Mod\_2 montre relativement les plus faibles humidités relatives de l'air intérieur. Ces différences pourraient être attribuées aux phénomènes physiques se déroulant dans la paroi considérée comme l'adsorption ou bien la désorption, comme expliqué dans la section III.4.1 et montré sur les Figures III.37 et III.38.

Les profils de température intérieure (Figures III.33 et III.35) sont aussi très proches l'un de l'autre. Cependant, les pics de température détectés en hiver sont légèrement supérieurs dû au fait que pour la marge d'humidité relative intérieure perçue généralement en saison hivernale (20% – 50%), le débit d'air soufflé en ventilation variable (Figure III.7) est inférieur à  $36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  fixé pour la ventilation autoréglable. Ainsi, il y a moins d'air froid qui entre dans la pièce et la température intérieure connaît certaines augmentations.

Dans le même contexte, la Figure III.36 montre que les besoins de chauffage diminuent de l'ordre de 30% et que les demandes de climatisation augmentent de l'ordre de 10% (diminution globale 24,8% de consommations globales) en passant à la ventilation hygroréglable. Ceci s'interprète par le débit de ventilation : en effet, il est plus réduit en hiver (Figure III. 39) comme expliqué précédemment, entraînant ainsi une chute des consommations de chauffage. En revanche, la ventilation est plus favorisée en été (Figure III. 40) avec des humidités relatives qui dépassent 60% ce qui augmente les besoins en climatisation en faisant entrer de l'air chaud. En outre, les modèles Mod\_3 et Mod\_2 montrent respectivement l'énergie de chauffage la plus élevée (608,4 kWh) et la plus faible (598,5 kWh). Avec un taux de ventilation variable, le besoin de chauffage est plus affecté par la dépendance à la température que par l'effet d'hystérésis : outre l'aspect exothermique de l'adsorption, une explication de cette différence pourrait être basée sur les variations du débit d'air entre les deux cas. La prise en compte de l'hystérésis conduit à une humidité relative de l'air intérieur plus faible surtout en hiver, et ensuite à un besoin réduit de renouvellement d'air qui diminue les demandes de chauffage, au contraire du Mod\_3 (Figure III. 39). En été, l'effet de l'adsorption favorisée pour Mod\_2 (Figure III.38) compense l'effet de la ventilation et fait augmenter les besoins de climatisation.

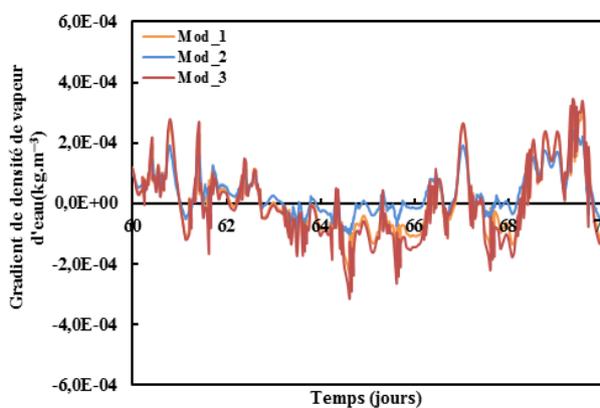


Figure III. 37 : Comparaison des gradients de densité de vapeur en hiver (10 jours en mars)

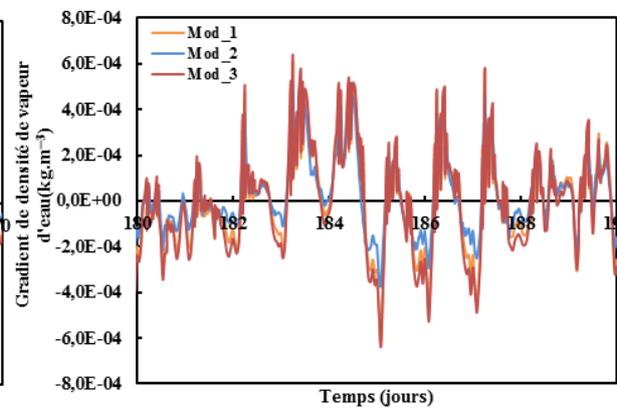


Figure III.38 : Comparaison des gradients de densité de vapeur en été (10 jours en juillet)

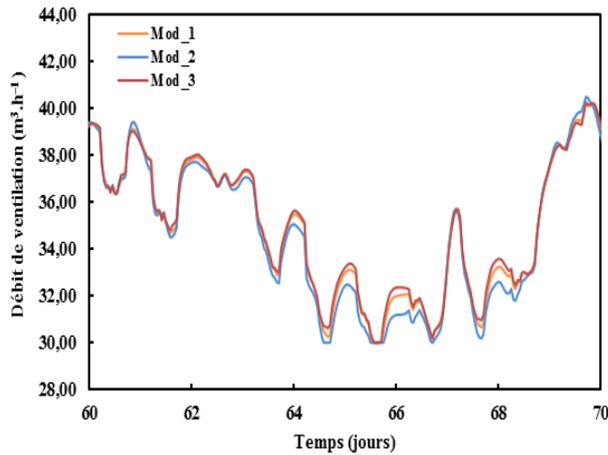


Figure III. 39: Comparaison des débits de ventilation en hiver (10 jours en mars)

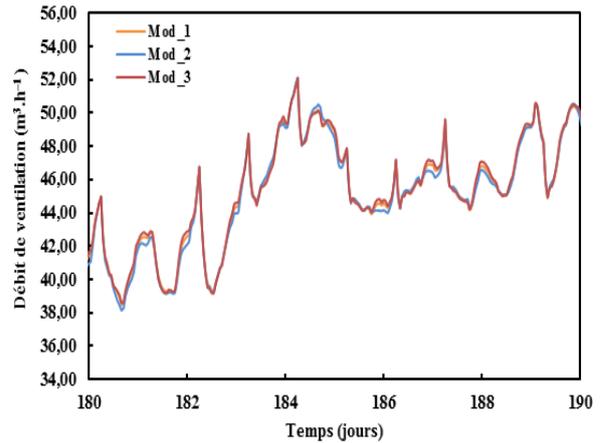


Figure III. 40: Comparaison des débits de ventilation en été (10 jours en juillet)

### III.4.3. Synthèse de la comparaison entre les trois modèles

Les résultats du chapitre II ont montré que la prédiction des évolutions des températures et humidités relatives au sein de la paroi en béton de chanvre est fortement influencée par le type de modèle numérique appliqué, et donc par les phénomènes physiques se produisant à l'intérieur de la paroi. Néanmoins, les résultats présentés dans les sections III.4.1 et III.4.2 montrent que les différences entre les trois modèles concernant les conditions intérieures (température et humidité relative) ainsi que les consommations totales de chauffage et de climatisation sont négligeables. Cette observation est confirmée dans la comparaison globale effectuée dans les Tableaux III.2 et III.3 à l'échelle du local.

Paramètres	Ventilation autoréglable			
	Temps de calcul (h)	Température intérieure moyenne (°C)	Humidité relative moyenne (%)	Consommations énergétiques totales (kWh)
Mod_1	1,183	21,05	38,71	1021,3
Mod_2	6,250	20,92	38,53	1025,3
Mod_3	1,633	21,04	38,75	1024,6

Tableau III.2 : Tableau comparatif entre les trois modèles pour la ventilation autoréglable

Paramètres	Ventilation hygroréglable			
	Temps de calcul (h)	Température intérieure moyenne (°C)	Humidité relative moyenne (%)	Consommations énergétiques totales (kWh)
Mod_1	1,300	21,35	38,19	751,8
Mod_2	8,233	21,23	37,97	752,6
Mod_3	1,833	21,34	38,25	756,8

Tableau III.3 : Tableau comparatif entre les trois modèles pour la ventilation hygroréglable

Dans ce cas, les consommations énergétiques sont plutôt impactées par le type de ventilation choisi et les conditions appliquées du côté intérieur de la paroi en béton de chanvre, et non par les phénomènes ayant lieu au sein de l'enveloppe.

Cependant, un modèle à hystérésis permet de prendre en considération l'âge du bâtiment et son histoire hydrique : lorsque le bâtiment est récent, le matériau est assez humide et donc l'initialisation à partir de la courbe de désorption est adéquate. Lorsqu'il est sec, il faut partir de la courbe d'adsorption. La courbe du matériau va alors évoluer au cours du temps et le régime dynamique sera bien représenté par ce type de modèle. Le faible impact de l'hystérésis sur les conditions intérieures est en accord avec les résultats donnés par Carmeliet et al. (2005) qui ont travaillé sur un local en bois : en effet, selon eux, la raison pour laquelle l'influence de l'hystérésis est limitée réside dans le fait que les différences des capacités hydriques (ou autrement dit des pentes des courbes de sorption) entre les courbes d'adsorption, de désorption et les courbes intermédiaires sont mineures.

D'ailleurs, le temps de calcul nécessaire attribué au modèle standard la rapidité de convergence la plus élevée pour les deux types de ventilation. Ainsi, compte tenu de son implémentation facile et pratique, ainsi que de ses résultats convaincants et prometteurs, Mod\_1 s'avère être fiable à l'échelle du local du point de vue de la prédiction des conditions intérieures dans la pièce et des consommations énergétiques requises pour le chauffage et la climatisation.

### **III.5. Influence d'autres paramètres à l'échelle du local**

Le but de cette partie est d'étudier l'impact de plusieurs paramètres sur les conditions intérieures du local et sur ses consommations énergétiques totales. A cette fin, le modèle standard de transferts de chaleur et de masse Mod\_1 est testé en faisant varier plusieurs paramètres comme expliqué ci-après pour le cas de la ventilation autoréglable :

- Mod\_1 (météo) :  
Les données météorologiques de la ville de Carpentras servent d'entrées pour le modèle : Carpentras est une ville située au Sud-Est de la France et caractérisée par un climat méditerranéen modéré en hiver et chaud et sec en été ;
- Mod\_1 (scénario) :  
Le scénario d'occupation du local est modifié en supposant qu'il s'agit d'une chambre à coucher occupée par deux personnes entre 22h et 7h au lieu d'un usage d'un bureau ;
- Mod\_1 (BC) :  
Les propriétés du béton de chanvre proposées par Ait Ouméziane (2013) sont testées à la place de celles de Lelievre et al. (2014), comme indiqué dans le Tableau III.4 ;
- Mod\_1 (surface) :  
La surface d'échange du béton de chanvre est augmentée en supposant que la paroi Est est constituée d'une couche de 36 cm en béton de chanvre comme la paroi Sud.

- Mod\_1 (h<sub>m</sub>) :

Lorsque les parois intérieures sont couvertes de peinture, le coefficient d'échange massique avec l'ambiance intérieure est réduit. Une valeur arbitraire du nouveau coefficient est testée, en supposant qu'il est divisé par 4.

A part Mod\_1 (météo), les autres variantes du Mod\_1 utilisent les conditions climatiques de la ville de Nancy.

Propriétés	Densité (kg.m <sup>-3</sup> )	Capacité thermique (J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Emissivité (-)
Béton de chanvre	$\rho = 320$	$C_p = 1250$	$\lambda = 0,091 + 2,21304w$	$\varepsilon = 0,8$

Tableau III.4 : Propriétés du béton de chanvre selon les travaux de Ait Oumeziane (2013)

Identiquement aux calculs précédents, la procédure appliquée reste la même en effectuant les simulations en premier pour un an et en initialisant une deuxième simulation annuelle à partir des résultats de la première année. Les résultats de ces cinq nouvelles variantes sont exposés ci-après en comparaison avec ceux du Mod\_1 initial de référence.

Modèles	Ventilation autoréglable			
	Température intérieure moyenne (°C)	Humidité relative moyenne (%)	Consommations de chauffage (kWh)	Consommations de climatisation (kWh)
Mod_1 (initial)	21,05	38,71	885,5	135,8
Mod_1 (météo)	23,34	37,07	110,8	561,8
Mod_1 (scénario)	19,82	44,99	1595,4	0,6
Mod_1 (BC)	20,89	39,15	1096,0	127,5
Mod_1 (surface)	21,14	38,66	842,1	161,8
Mod_1 (h <sub>m</sub> )	21,14	38,59	838,9	153,9

Tableau III.5 : Comparaison entre les quatre variantes du modèle standard Mod\_1

Le Tableau III.5 montre que les conditions intérieures du local sont énormément influencées par les nouveaux paramètres testés.

Les données de la ville de Carpentras utilisées comme entrées font augmenter la température moyenne de l'air intérieur (et ainsi diminuer l'humidité relative intérieure) vu son climat modéré en hiver et chaud en été, ce qui résulte en une réduction significative des besoins en chauffage (8 fois plus petits) et une augmentation considérable des demandes en climatisation (presque 4 fois plus élevés). Dans le total des consommations, ça sera plus avantageux d'avoir un bureau en béton de chanvre à Carpentras. En revanche, il faut faire attention aux risques de surchauffe en été dans ce cas.

Le scénario d'occupation influence les conditions de confort intérieur : le local étant utilisé en chambre à coucher, les deux ordinateurs sont éliminés cette fois-ci, ainsi que l'éclairage en supposant que pendant la période de 22h le soir à 7h le matin, les occupants sont en train de dormir. Les sources de chaleur sont ainsi réduites, d'où la chute de la température intérieure moyenne de 6,21% et l'augmentation de l'humidité relative jusqu'à 45%. Cette chute de température rend la demande en chauffage importante en hiver. En revanche, en été, les besoins de climatisation deviennent négligeables ayant une température intérieure inférieure au seuil de température imposé pour la climatisation (26°C). En effet, le comportement de la paroi change suivant le scénario d'occupation : généralement, l'adsorption est favorisée pendant la nuit dans une chambre à coucher (au contraire d'un bureau) vu la génération des humidités relatives dues à la présence des occupants (surtout la respiration). La Figure III.41 montre le déphasage des différences de densité de vapeur entre Mod\_1 (où le local est considéré comme un bureau) et Mod\_1 (occupation) où le local est à usage de chambre à coucher.

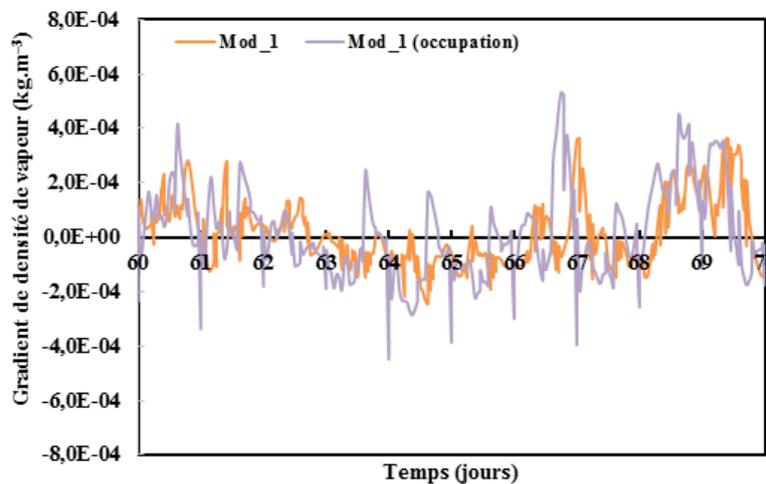


Figure III.41 : Comparaison des comportements de la paroi suivant le scénario d'occupation

En utilisant les propriétés du béton de chanvre données par Ait Oumeziane (2013), la moyenne de température intérieure a baissé légèrement (0,16°C) et l'humidité relative moyenne de l'air au augmenté de 1,44%. En effet, une étude comparative de l'ordre de grandeur de de la conductivité thermique de l'enveloppe du côté intérieur est établie entre ces deux cas. La conductivité thermique de la paroi en utilisant la corrélation de (Lelievre et al., 2014) est donnée sur la Figure III.42. D'un autre côté, la corrélation donnée par Ait Oumeziane (2013) dans le Tableau III.4 montre qu'à l'état sec ( $w = 0$ ), la conductivité thermique du béton de chanvre est de l'ordre de 0,091 W.m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. Par conséquent, lorsque la paroi est sollicitée par des conditions humides, cette conductivité va forcément augmenter au-delà de 0,0930, voire au-delà de 0,1 W.m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> comme monté sur la Figure III.43.

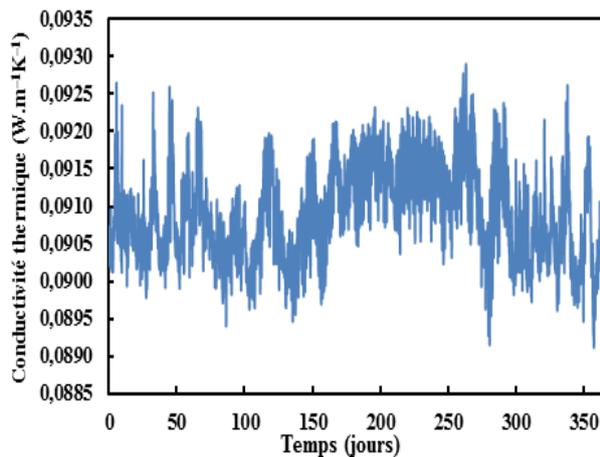


Figure III.42 : Conductivité thermique de l'enveloppe en utilisant la corrélation de (Lelievre et al.,2014)

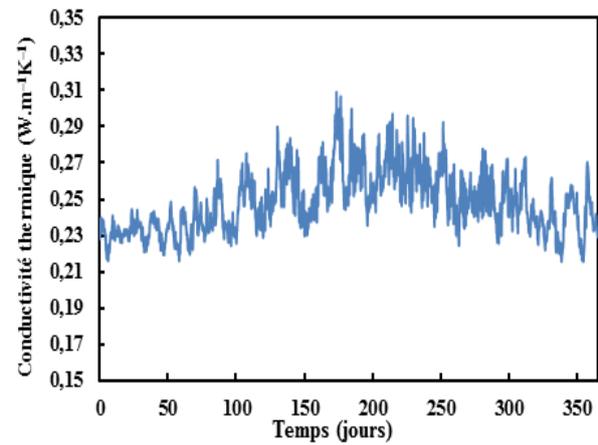


Figure III.43 : Conductivité thermique de l'enveloppe en utilisant la corrélation de Ait Oumeziane (2013)

Donc, avec ces nouvelles propriétés, la conductivité thermique de l'enveloppe augmente tout comme sa diffusivité, augmentant ainsi les déperditions à travers la paroi. Ceci justifie l'augmentation des besoins de chauffage (1096,0 au lieu de 885,5 kWh) et la diminution de la demande de climatisation (127,5 au lieu de 135,8 kWh). Les consommations énergétiques totales augmentent de l'ordre de 20% dans ce cas (1223,5 kWh au lieu de 1021,3 kWh). Le premier type de béton de chanvre est alors plus avantageux à être utilisé dans un bureau à Nancy.

Dans le cas de Mod\_1 (surface), la paroi Est qui était une paroi adiabatique avec du gypse comme revêtements intérieur et extérieur est désormais remplacée par une paroi simple en béton de chanvre non exposée au rayonnement extérieur. La surface d'échange du béton de chanvre est ainsi augmentée ainsi que la résistance thermique de la paroi qui devient de l'ordre de  $3,79 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$  au lieu de  $0,67 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$ . De ce fait, la température de l'air intérieur augmente légèrement ( $0,09^\circ\text{C}$ ) et l'humidité intérieure moyenne diminue faiblement ( $0,05\%$ ). En termes de consommations globales, l'énergie totale requise pour le chauffage et la climatisation est réduite de 1021,3 kWh à 1003,9 kWh. Ceci reconferme le rôle du béton de chanvre dans l'amortissement de la température et la régulation de l'humidité intérieure en assurant une réduction des consommations énergétiques.

Finalement, dans le dernier cas, le coefficient d'échange massique des parois intérieures est réduit en supposant que celles-ci sont peintes. L'effet de la réduction des échanges massiques résulte en une légère augmentation de la température intérieure moyenne (et ainsi une légère diminution de l'humidité relative moyenne). En effet, pour un usage bureautique, la désorption ayant lieu pendant la nuit est réduite en présence de la peinture ou des enduits. Une désorption réduite induit température de surface plus élevée et par conséquent une baisse en besoins de chauffage (838,9 kWh au lieu de 885 kWh) et une augmentation en besoins de climatisation (153,9 au lieu de 135,8 kWh) sont observées. Dans ce cas, les consommations totales sont réduites de l'ordre de 3%. Par conséquent, dans une ville froide comme Nancy, utiliser un enduit moins perméable dans un bureau en béton de chanvre permet de réduire les consommations énergétiques globales sans altérer les conditions de confort intérieur.

### III.6. Influence du béton de chanvre en tant qu'isolant intérieur ou extérieur

Cette partie a été abordée dans le chapitre précédent en analysant les conditions sur la surface intérieure et sur les déperditions thermique au sein de la paroi. Dans ce chapitre, le but c'est d'étudier l'impact de placer le béton de chanvre du côté intérieur ou extérieur sur les conditions intérieures et sur les consommations énergétiques du local. Le bureau étudié est toujours le même que celui présenté en section III.2.4 et dont la paroi Sud vitrée est celle présentée dans le chapitre II et dont les propriétés sont rappelées dans le Tableau III.6 suivant.

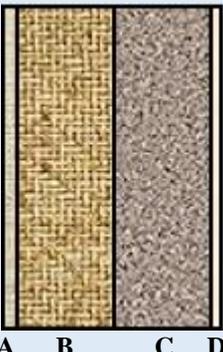
 Figure III.44 : Coupe transversale de la paroi A : côté intérieur		Propriétés	Epaisseur (m)	Densité (kg.m <sup>-3</sup> )	Capacité thermique (J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
		<b>A : Chanvre-chaux</b>	e = 0,02	ρ = 930	C <sub>p</sub> = 1000	λ = 0,20
<b>B : Brique</b>	e = 0,20	ρ = 700	C <sub>p</sub> = 850	λ = 0,1869		
<b>C : Béton de chanvre</b>	e = 0,20	ρ = 450	C <sub>p</sub> = 1000	λ = 0,00818 + 2,76 × 10 <sup>-4</sup> T + 0,0024w		
<b>D : Sable-chaux</b>	e = 0,015	ρ = 1650	C <sub>p</sub> = 830	λ = 0,4		

Tableau III.7 : Constitution de la paroi Sud du local

En tant que scénario d'occupation, le bureau est supposé occupé par deux personnes pendant 6 jours par semaine (du lundi au samedi de 8h à 13h et de 14h à 18h). Deux cas sont testés : le premier dans lequel le béton de chanvre est utilisé comme isolant extérieur (comme montré sur la Figure III.44) et le deuxième où le béton de chanvre sert d'isolant intérieur (c'est-à-dire les couches B et C de la Figure III.44 sont inversées). Les résultats de la comparaison entre ces deux configurations sont présentés ci-après.

	Température intérieure moyenne (°C)	Humidité relative moyenne (%)	Consommations de chauffage (kWh)	Consommations de climatisation (kWh)
<b>BC_extérieur</b>	20,98	33,38	1023,5	143,6
<b>BC_intérieur</b>	20,99	29,89	1018,6	142,0

Tableau III.8 : Comparaison entre les deux configurations d'enveloppe à l'échelle du local

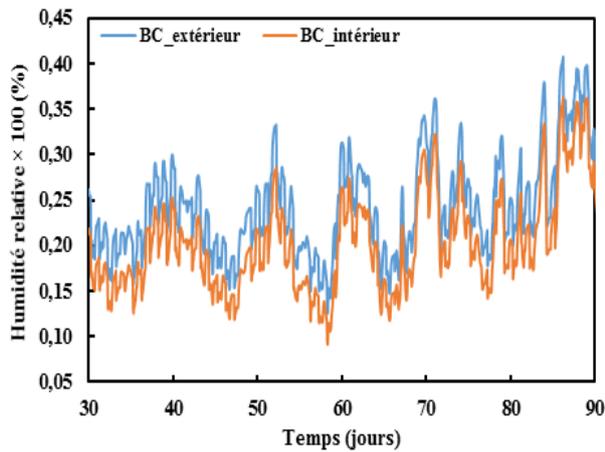


Figure III.45 : Comparaison des humidités relatives intérieures pour les mois de février et mars

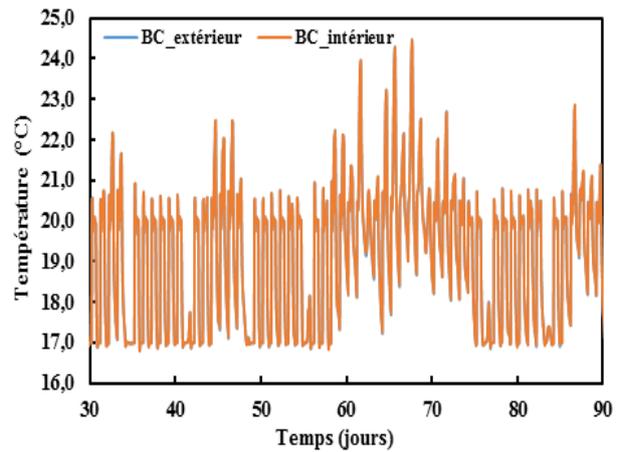


Figure III.46 : Comparaison des températures intérieures pour les mois de février et mars

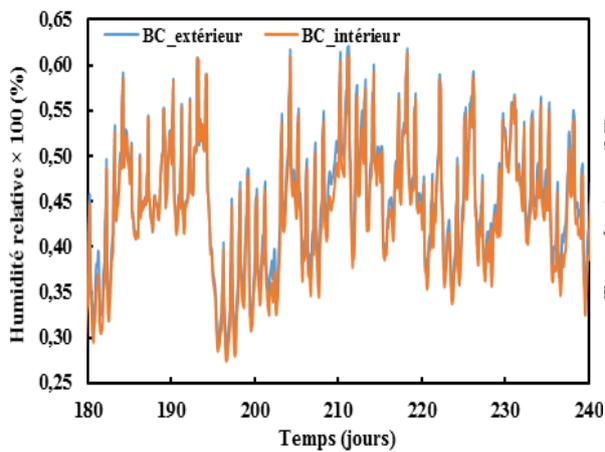


Figure III.47 : Comparaison des humidités relatives intérieures pour les mois de juillet et août

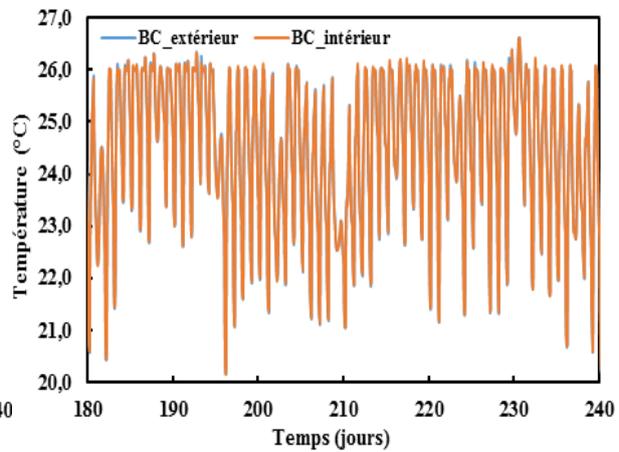


Figure III.48 : Comparaison des températures intérieures pour les mois de juillet et août

D'après ce qui précède, les températures intérieures dans les deux cas sont très proches, en hiver (Figure III.46) ou en été (Figure III.48), dû à l'effet de la régulation imposée (Tableau III.8). En revanche, l'humidité relative de l'air intérieur est bien réduite (4,49%) lorsque le béton de chanvre est placé du côté intérieur (Tableau III.8). En effet, placer le béton de chanvre du côté intérieur permet non seulement de profiter de sa capacité isolante, mais aussi de ses capacités hydriques assurant une interaction plus grande avec l'ambiance intérieure et résultant en une humidité relative inférieure dans la pièce. En outre, les différences perçues en hiver (Figure III.45) sont supérieures à celles rencontrées en été (Figure III.47) à cause des variations d'humidité relative extérieure plus marquées en hiver. Ainsi, en plaçant le béton de chanvre du côté intérieur, il faut bien veiller aux choix des enduits pour assurer un taux d'humidité acceptable à l'intérieur et éviter d'avoir une ambiance plutôt sèche.

D'ailleurs, le béton de chanvre placé du côté intérieur contribue à réduire les consommations énergétiques du local car l'effusivité du béton de chanvre est inférieure à celle de la brique.

Les fluctuations de température à l'échelle de la paroi sont plus significatives dans la dernière section du chapitre II suivant l'emploi du béton de chanvre du côté intérieur ou extérieur. En

effet, l'ambiance intérieure de la paroi n'était pas pilotée comme dans le cas du local. En outre, plusieurs autres paramètres interviennent à l'échelle du local comme la stratégie de ventilation et le scénario d'occupation ...

### **III.7. Conclusion**

Ce chapitre relève de l'étude d'un local à usage de bureau ayant sa paroi Sud en béton de chanvre avec comme intérêt particulier les conditions intérieures de température et d'humidité relative et les consommations énergétiques du local. Les résultats ont montré que prendre en considération l'hystérésis et la thermodépendance dans le béton de chanvre affecte légèrement les températures et humidités relatives intérieures, ainsi que les demandes de chauffage et de climatisation. Le modèle standard, facile à implémenter et rapide dans les calculs, présente donc des résultats fiables à cet égard.

Ensuite, une étude réalisée à l'échelle du local montre l'influence significative d'autres paramètres sur les conditions et consommations intérieures. Il s'agit des conditions climatiques extérieures, du scénario d'occupation, des propriétés du béton de chanvre, de la surface d'échange du béton de chanvre par rapport aux autres surfaces et des coefficients d'échange massiques des parois intérieures.

Enfin, l'utilisation du béton de chanvre comme isolation intérieure ou bien extérieure est testée. Les résultats montrent que le béton de chanvre placé du côté intérieur permet d'amortir les variations d'humidité extérieures d'une manière plus prononcée, tout en diminuant des consommations énergétiques globales du local.

---

## **Chapitre IV : Etude d'un bâtiment en béton de chanvre : Suivi expérimental et validation numérique**

---

Le but de ce chapitre est d'étudier les performances thermiques du béton de chanvre à l'échelle du bâtiment. En collaboration avec le bailleur social « Le Foyer Rémois », un suivi expérimental d'un bâtiment utilisant le béton de chanvre comme isolant extérieur est réalisé, dans le but d'examiner les conditions de confort intérieur ressenti par les habitants. L'étude s'organise en deux phases. La première est une approche expérimentale faisant appel à plusieurs capteurs et sondes installés dans les différentes pièces de l'appartement et à une station météorologique fixée sur le toit de la résidence. La seconde, purement numérique, est menée à deux échelles différentes : au sein de la paroi en béton de chanvre à travers la modélisation des déperditions thermiques, et à l'échelle du local en modélisant les températures et humidités relatives intérieures dans le bureau. La comparaison entre ces deux approches permet d'interpréter les écarts éventuels obtenus. Une optimisation des résultats est aussi établie en jouant sur plusieurs paramètres afin d'évaluer leur potentiel dans la modélisation.

## **IV.1. Introduction**

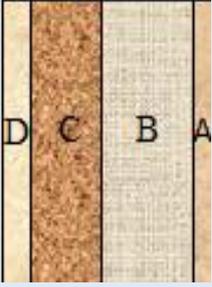
Jusqu'à présent, l'étude du comportement du béton de chanvre à l'échelle du bâtiment reste toujours rare. La plupart des études menées à cet égard concernent des bâtiments-test en béton de chanvre réalisés dans les laboratoires et pour des périodes d'essai relativement courtes (Shea et al., 2012 ; Soudani et al., 2017). Les autres études concernant de vrais bâtiments s'intègrent dans le cadre des évaluations des comportements hygrothermiques du béton de chanvre et des phénomènes qui se produisent au sein de l'enveloppe elle-même. Ainsi, Sutton, et al. (2011) et Moujalled et al. (2018) se sont intéressés aux évolutions des températures et humidités relatives dans la paroi en béton de chanvre sans se concentrer sur les conditions thermiques et hydriques intérieures de l'habitation. Gourlay (2017) a réalisé le suivi énergétique de la maison du tourisme de Troyes en mettant l'accent sur les capacités du béton de chanvre à amortir les pics de température et d'humidité extérieures tout en assurant une bonne qualité d'air prohibant le développement de moisissures. Dans ce cadre, ce chapitre est dédié au suivi expérimental d'un logement habité de type F4 réalisé en brique mono mur avec projection de béton de chanvre par l'extérieur sur une épaisseur de 13 cm. Ce logement est situé au rez-de-chaussée de la résidence des CERITHES, située à Fleury-La-Rivière à 30 minutes de Reims. L'étude a été réalisée en deux étapes : la première consiste à instrumenter le logement par des sondes de mesures de température et d'humidité ainsi que des fluxmètres et à placer une station météo afin de relever les conditions météorologiques. La deuxième partie consiste à analyser les relevés expérimentaux et effectuer des simulations numériques avec l'environnement SPARK afin de comparer les résultats expérimentaux et numériques et de les optimiser (Costantine et al., 2018).

## **IV.2. Présentation du bâtiment et de l'appartement instrumenté**

La résidence « Les CERITHES » est un immeuble R+2 situé au 3 Rue de la barbe aux Cannes, à Fleury-La-Rivière, une commune d'Epernay dans la Marne. Conçue en 2011, elle est composée de dix logements dont quatre de type 2, deux de type 3 et quatre de type 4. Les appartements de type 3 et 4 sont situés principalement au premier et deuxième étage alors que ceux de types de 2 sont plutôt regroupés au deuxième étage. L'enveloppe du bâtiment est formée de quatre couches comme l'indique le Tableau IV.1. Les propriétés des matériaux sont fournies par le bureau d'études. Le béton de chanvre, utilisé comme isolant extérieur, est projeté sur place dans les murs. Les façades Sud et Est du bâtiment sont présentées sur les Figures IV.1 et IV.2. Les différents appartements sont équipés de radiateurs électriques pour le chauffage et de systèmes de ventilation mécanique.

Avant le démarrage de l'étude, un sondage est mené auprès des habitants de cette résidence. Les questions s'articulent principalement sur les points suivants : le confort thermique et acoustique dans les appartements, l'étanchéité et les fuites d'air, et les factures d'électricité et de chauffage. En se basant sur les retours collectés, certains se plaignent d'un taux d'humidité élevée et d'un inconfort thermique en hiver et en été. D'autres signalent des fuites d'air ressenties et des besoins de chauffage énormes pendant la période hivernale. Cette enquête de satisfaction a conduit à la sélection d'un appartement du bâtiment situé au rez-de-chaussée, de

surface 92,30 m<sup>2</sup> et occupé par une famille de trois personnes ayant deux chiens. Le plan de l'appartement étudié est présenté sur la Figure IV.3.

	Matériaux	Epaisseur (m)	Densité (Kg.m <sup>-3</sup> )	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Capacité thermique (J.Kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
A	A : gypse	0,015	900	0,25	850
B	B : Optibric®	0,20	700	R <sub>eq</sub> =1,07	850
C	C : béton de chanvre	0,13	450	0,095	1000
D	D : sable-chaux	0,02	1650	0,4	830

**D : côté extérieur**

Tableau IV.1 : Propriétés de l'enveloppe



Figure IV.1: Vue de la façade Sud du bâtiment



Figure IV. 2 : Vue des façades Est du bâtiment

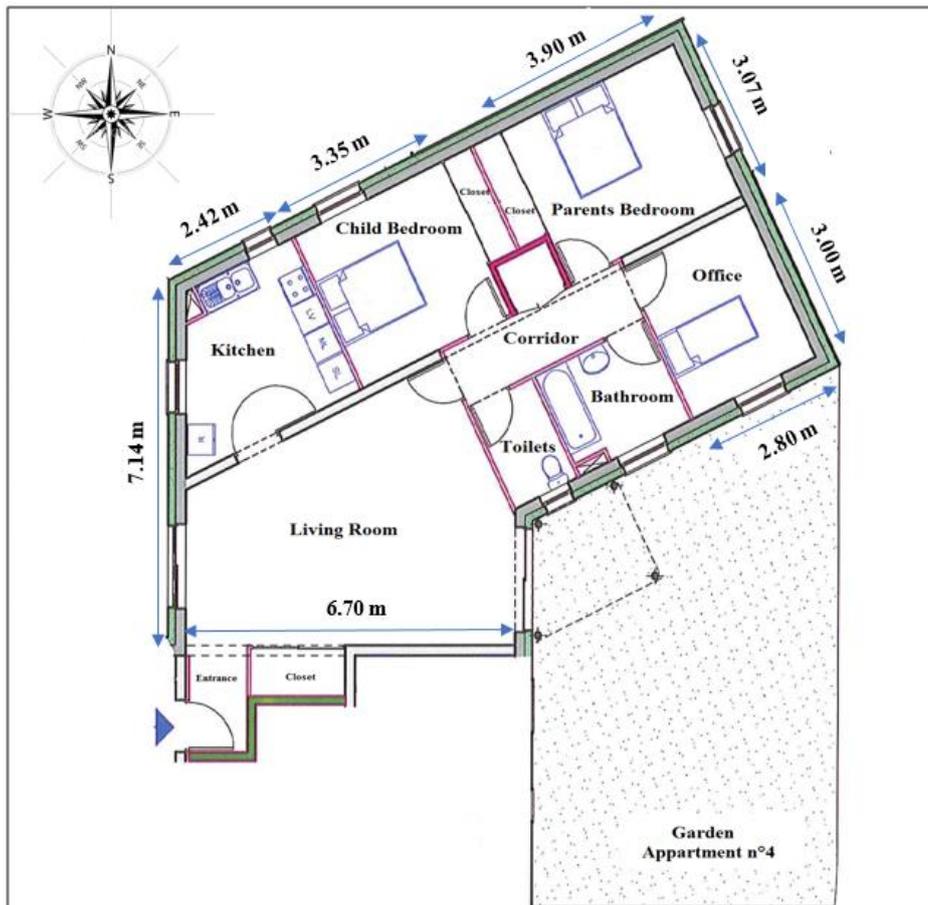


Figure IV.3 : Plan de l'appartement étudié

### IV.3. Approche expérimentale

#### IV.3.1. Thermographie infrarouge

L'enveloppe du bâtiment est inspectée des deux côtés intérieur et extérieur par thermographie infrarouge capable de détecter les défauts de construction liés aux ponts thermiques éventuels dans la structure. Ceci permet d'identifier les lieux des déperditions thermiques les plus importants et ainsi mieux choisir les emplacements des sondes de mesure. La caméra utilisée est de type IR FLIR SC620 avec un détecteur de pixels haute résolution (640 × 480 pixels). L'émissivité des murs est fixée à 0,95. Les prises de photos sont faites à des dates qui garantissent un gradient de température considérable entre l'intérieur et l'extérieur. Les résultats sont regroupés dans les Figures IV.4, IV.5 et IV.6 ci-après.

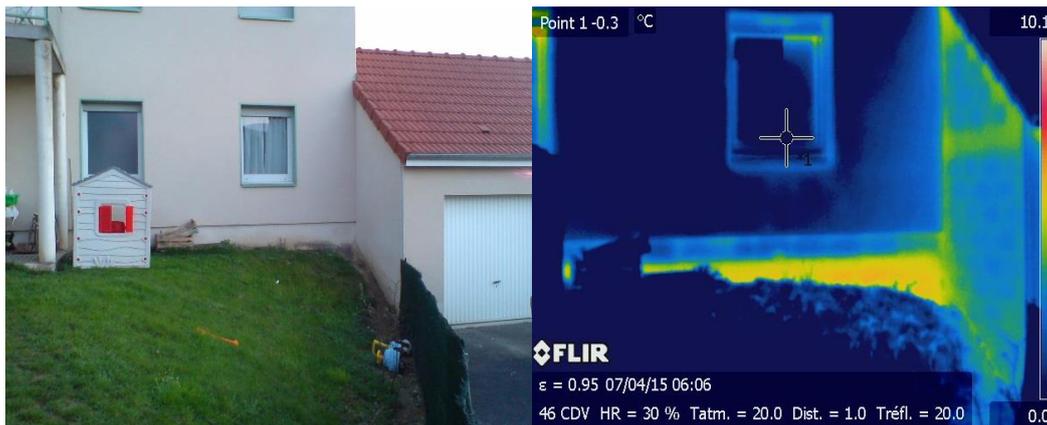


Figure IV.4 : Thermographie infrarouge extérieure de la façade Sud



Figure IV.5 : Thermographie infrarouge intérieure dans le bureau



Figure IV.6 : Thermographie infrarouge extérieure de la façade Ouest

Les températures des surfaces extérieures sont plutôt homogènes. Des déperditions apparaissent au niveau des joints d'air des fenêtres et des bouches d'aération ainsi qu'au niveau de la dalle et du plancher. Ceci s'explique par le fait que dans une isolation par l'extérieur, la couche de l'isolant est coupée au niveau du sol pour éviter les phénomènes de capillarité. Les ponts thermiques dus à l'ossature en bois sont négligeables.

### IV.3.2. Conditions météorologiques extérieures

Les conditions météorologiques sont relevées avec une station météo de la gamme Vantage Pro2 du constructeur Davis Instruments (Figure IV.7) composée de deux éléments principaux : des capteurs extérieurs (ISS : Integrated Sensor Suit) et une console de réception. L'ISS permet de mesurer la température extérieure, l'humidité relative extérieure, les précipitations, la vitesse et la direction du vent, la densité de rayonnement solaire global, la vitesse et la direction du vent ainsi que la pluviométrie. La température et l'humidité relative sont mesurées grâce à une sonde numérique placée dans un abri normalisé à ventilation naturelle. Cette station météo est installée sur le toit de l'immeuble comme indiqué sur la Figure IV.8. Les mesures sont effectuées avec un pas de temps de 30 minutes. Les données sont emmagasinées dans la console de réception. La récupération des enregistrements se fait en moyenne une fois par mois entre novembre 2015 et septembre 2016.



Figure IV.7 : Station-météo Vantage Pro2



Figure IV.8 : Emplacement de la station-météo sur la toiture

### IV.3.3. Instrumentation de l'appartement

A l'intérieur de l'appartement, différentes sondes sont mises en place (voir Tableau IV.2). Trois boules noires mesurent la température rayonnante dans chaque pièce (séjour, bureau et chambre à coucher des parents) avec une précision de  $\pm 0,1$  °C. Quatre thermo-hygromètres mesurent la température et l'humidité relative de l'air intérieur (séjour, bureau et deux chambres à coucher). Le thermo-hygromètre peut mesurer une température entre  $-40$  °C à  $75$  °C avec une incertitude de  $\pm 0,2$  °C et une humidité de 0 à 100 % avec une incertitude de  $\pm 1,8$  %. Et finalement, trois fluxmètres sont placés sur la façade sud dans le bureau à deux hauteurs différentes pour enregistrer les déperditions thermiques dans la paroi. L'incertitude sur les mesures est de 5%. L'emplacement des fluxmètres sur cette façade est montré sur la figure droite du Tableau IV.2 par les chiffres 1,2 et 3. Les capteurs sont connectés à une console qui enregistre les données. Les relevés de mesure se sont effectués tous les mois entre novembre 2015 et septembre 2016.



Thermo-hygromètre

Boule noire

Fluxmètres

Précision :  $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\pm 1,8 \%$

Précision :  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$

Précision :  $\pm 5\%$

Tableau IV.2: Dispositif expérimental

#### IV.4. Résultats expérimentaux

Les relevés de mesure sont divisés en deux parties : période hivernale qui s'étend du 27 Novembre 2015 au 7 Mars 2016, et période estivale à partir de mi-Juillet 2016 jusqu'au 28 Septembre 2016.

##### IV.4.1. Période hivernale

##### IV.4.1.1. Station-météo : vitesse et direction du vent

La Figure IV.9 montre la vitesse moyenne du vent en fonction de sa direction et La Figure IV.10 représente la fréquence de la direction du vent pendant la période étudiée.

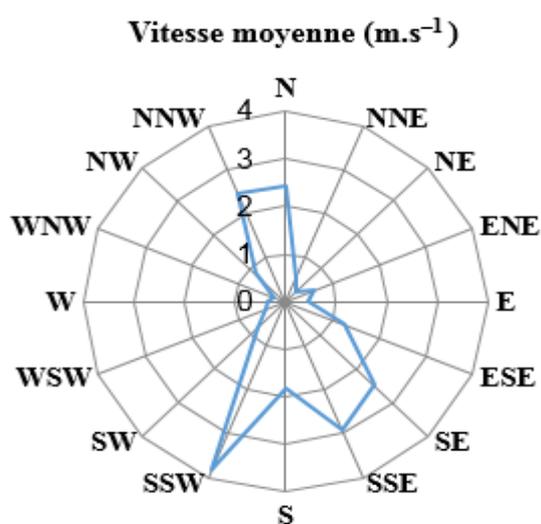


Figure IV.9 : Vitesse moyenne du vent en fonction de sa direction en hiver

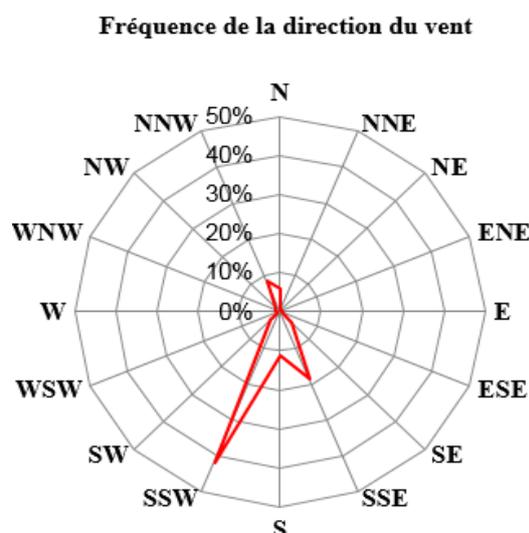


Figure IV.10 : Fréquence de la direction du vent en hiver

Il s'avère que les vents dominants arrivent du côté SSW (Sud-Sud-Ouest) et SSE (Sud-Sud-Est) avec des vitesses moyennes de  $3,8$  et  $2,9 \text{ m.s}^{-1}$  respectivement. La direction SSW (Sud-

Sud-Ouest) est majoritaire avec une fréquence de 42% suivie par la direction SSE (Sud-Sud-Est) de fréquence 18,5% puis la direction S (Sud) de fréquence 11,4%. Ces mesures révèlent que l'appartement en question est peu exposé au vent puisque sa face SSW (Sud-Sud-Ouest) est protégée par le reste du bâtiment. Seul le bureau est exposé au vent S et SSE. La cuisine et les chambres 1 et 2 sont exposées aux vents N (Nord) et NNW (Nord-Nord-Ouest).

#### IV.4.1.2. Station-météo : densité de rayonnement

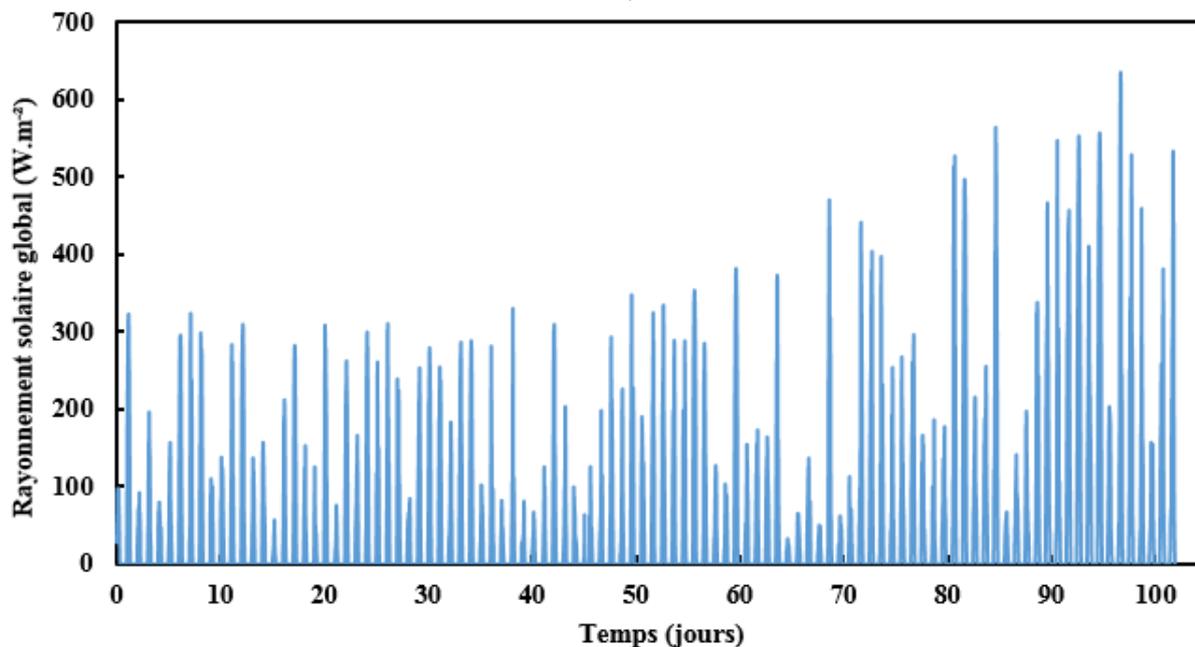


Figure IV.11 : Densité de rayonnement solaire global sur une surface horizontale pour la période hivernale

La Figure IV.11 présente la densité du rayonnement solaire global sur une surface horizontale ( $W.m^{-2}$ ). Ce rayonnement correspond au spectre visible et une partie de l'infrarouge. Pour les mois de février et la première semaine de mars sa valeur est plus élevée que pour les mois de décembre et janvier. La moyenne du rayonnement maximal pour le mois de décembre est de  $214,5 W.m^{-2}$ , pour le mois de janvier de  $209 W.m^{-2}$ , pour le mois de février de  $304,4 W.m^{-2}$  et pour la première semaine de mars de  $445 W.m^{-2}$ .

#### IV.4.1.3. Station-météo : pluviométrie, température et humidité relative extérieures

La Figure IV.12 montre la variation de la température extérieure qui est relativement douce par rapport à la saison avec un minimum de  $-6,6^{\circ}C$  le 20 janvier à 8h le matin. La Figure IV.13 présente respectivement la variation de l'humidité relative extérieure (en %) et la quantité de précipitations journalières (en mm). A noter que les journées pluvieuses correspondent à des périodes où l'humidité relative extérieure dépasse 90%.

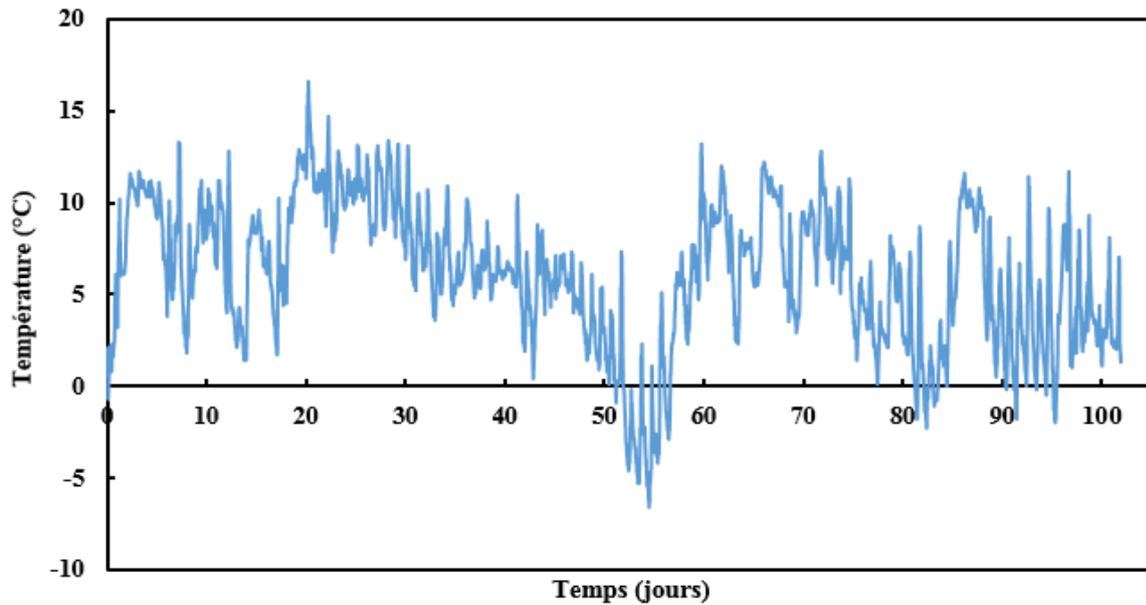


Figure IV.12 : Température extérieure pour la période hivernale

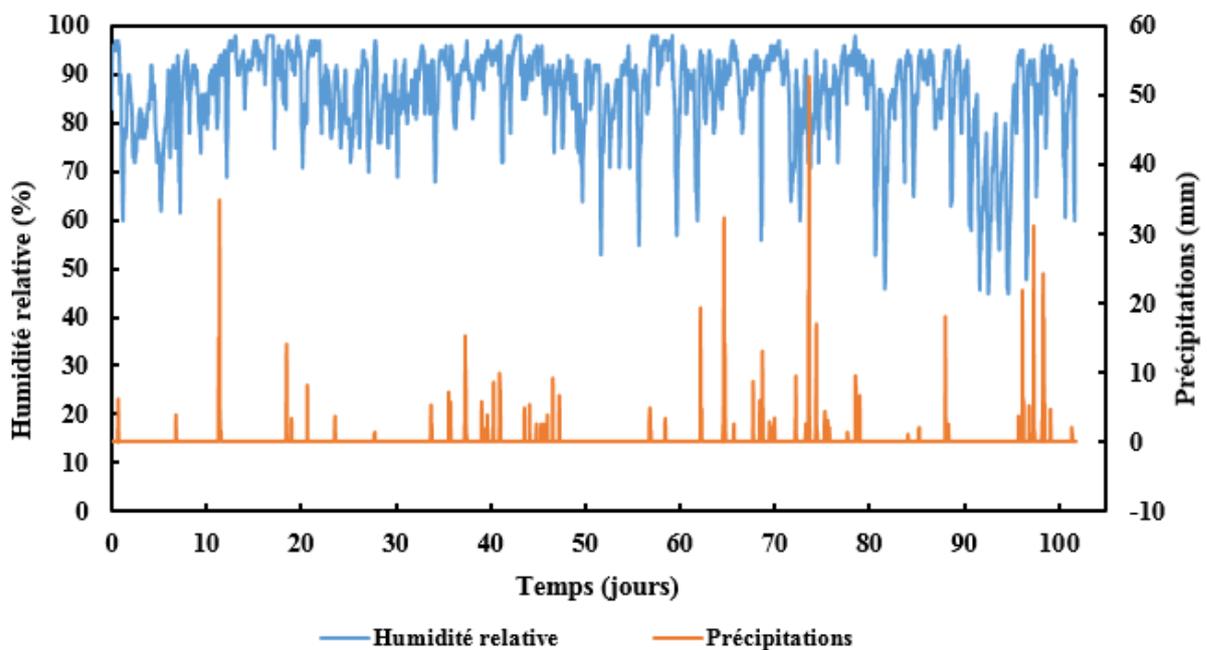


Figure IV.13 : Humidité relative extérieure et quantité de précipitations pendant la période hivernale

#### IV.4.1.4. Analyse des déperditions thermiques à travers l'enveloppe

Trois fluxmètres installés sur la façade Sud du côté intérieur du bureau permettent de mesurer le flux thermique dans la paroi. Les Fluxmètre\_1 et Fluxmètre\_3 sont placés de part et d'autre de la fenêtre à une hauteur de 1,20 m. Le Fluxmètre\_2 est placé au niveau de la plinthe aligné verticalement avec le Fluxmètre\_1. Les enregistrements sont effectués séparément pour les Fluxmètres 1 et 2 (entre le 01/12/2015 et le 15/12/2015) et les Fluxmètres 1 et 3 (entre le 16/12/2015 et le 11/01/2016) en raison de l'épuisement rapide de la batterie du dispositif avec les trois voies branchées en parallèle.

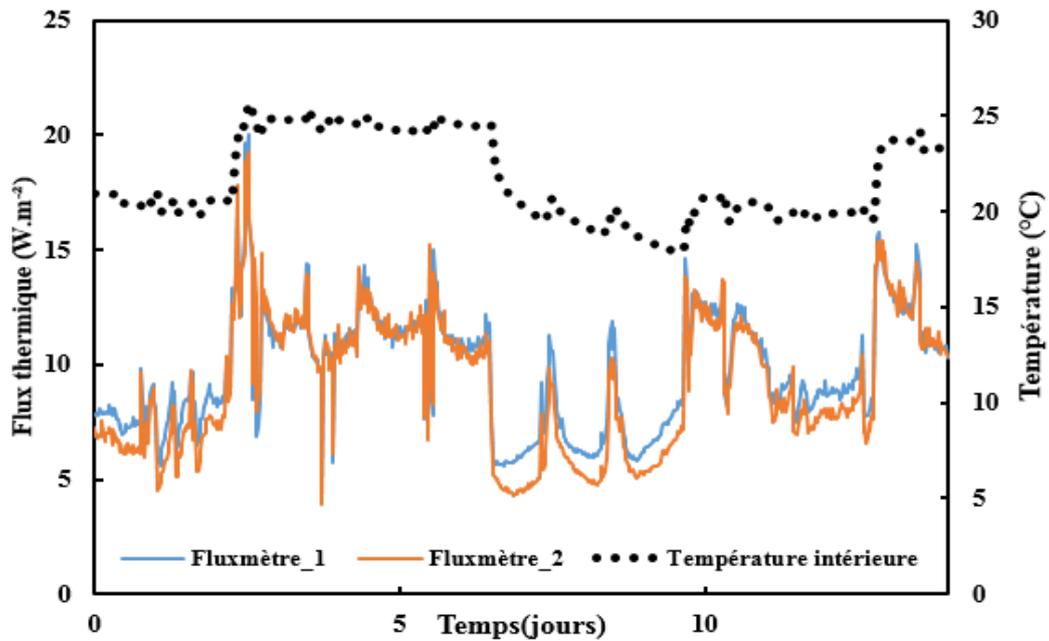


Figure IV.14: Densité de flux et température intérieure pour la première période

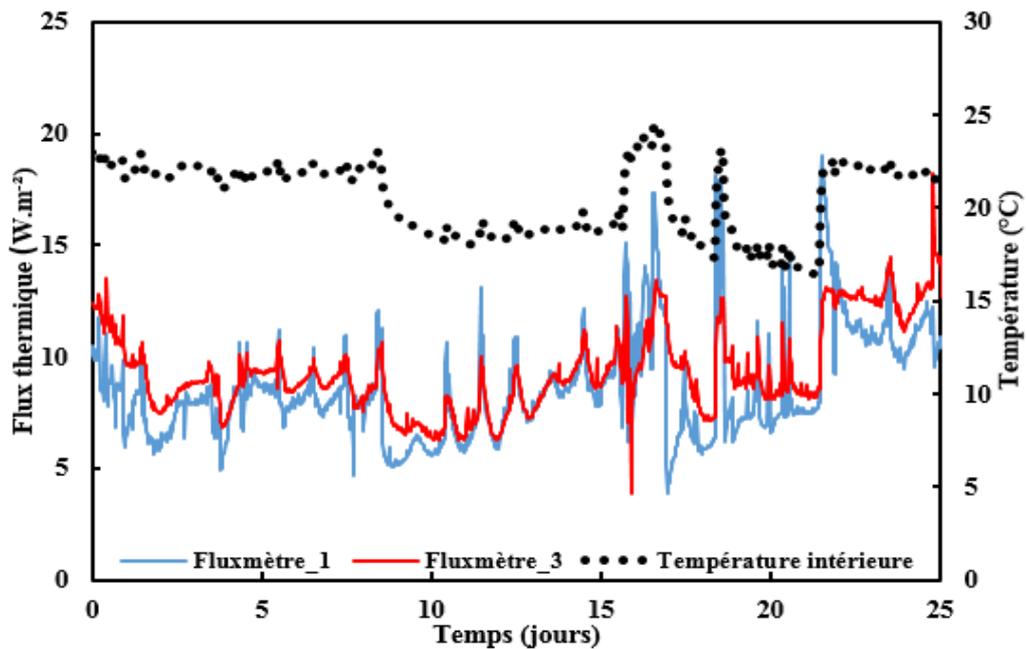


Figure IV. 15: Densité de flux et température intérieure pour la deuxième période

Les Figures VI.14 et IV.15 montrent les variations de la densité de flux intérieure mesurée par les Fluxmètres 1, 2 et 3 ainsi que celle de la température intérieure de la chambre 3 pendant les deux périodes de mesure. Ce flux est dirigé de l'intérieur vers l'extérieur, autrement dit c'est un flux sortant du local. Les flux de chaleur sont pilotés par les variations de température à l'intérieur durant les deux périodes comme étant proportionnels au gradient de température entre la surface intérieure et l'air dans la pièce. Une analyse statistique des relevés du flux thermique mesuré est établie.

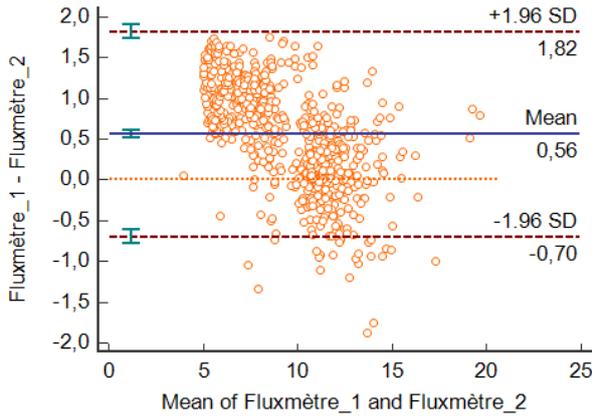


Figure IV.16 : Méthode de Bland-Altman appliquée pour les Fluxmètres 1 et 2

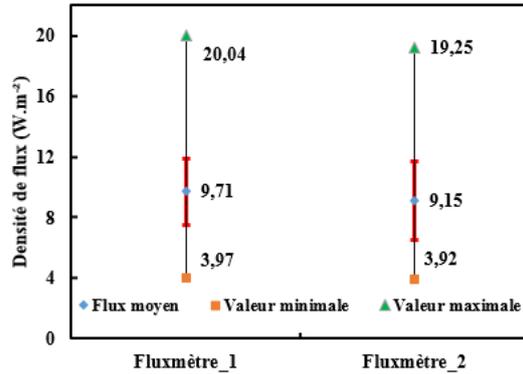


Figure IV.17 : Analyse statistique pour les Fluxmètres 1 et 2

Le test de Bland-Altman (Bland and Altman, 1986) est une méthode de traçage des données utilisée dans le but d'analyser l'accord entre deux séries de valeurs. Il est souvent utilisé en chimie analytique et pour des applications médicales. La procédure s'explique comme suit : soient les deux séries de données. Le graphique s'obtient en calculant pour le même pas de temps la moyenne et la différence de ces deux données qui forment respectivement un couple de points (x,y) dans un repère à coordonnées cartésiennes. La différence moyenne (Mean) est calculée, ainsi que l'écart-type (SD) des différences. Les séries de données sont fiables si 95% des points obtenus tombent dans l'intervalle :

$$- 1,96 \text{ SD} \leq (x, y) \leq 1,96 \text{ SD}$$

Concernant les Fluxmètres 1 et 2, la Figure IV.16 montre que les deux séries de données sont fiables. A travers l'analyse statistique établie dans la Figure IV.17, la moyenne des mesures du Fluxmètre\_1 est de 9,71 W.m<sup>-2</sup> assez proche de celle du Fluxmètre\_2 qui est de 9,15 W.m<sup>-2</sup> soit un écart de 5,7%. Compte tenu de la précision des mesures, on peut dire que le flux est assez homogène sur la hauteur de la paroi. Contrairement à ce qui est prévu, la coupure de l'isolation au niveau du sous-sol ne crée pas de déperditions thermiques supplémentaires au niveau de la paroi verticale.

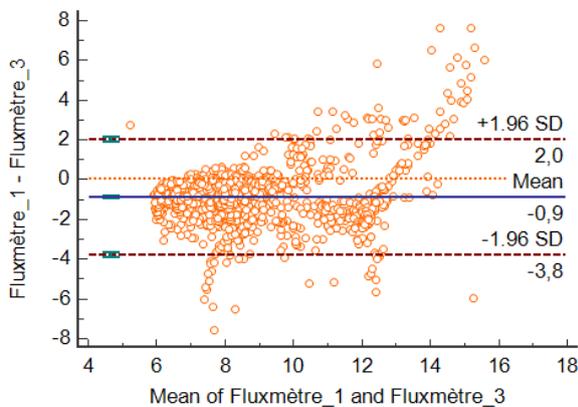


Figure IV.18 : Méthode de Bland-Altman appliquée pour les Fluxmètres 1 et 3

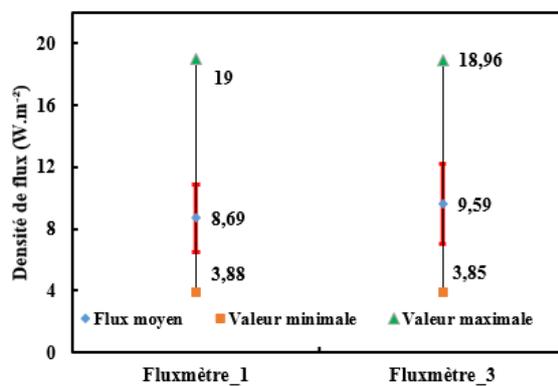


Figure IV.19 : Analyse statistique pour les Fluxmètres 1 et 3

Globalement, les valeurs du Fluxmètre\_3 sont plus élevées que celles indiquées par le Fluxmètre\_1 sauf entre le 11<sup>ème</sup> et 16<sup>ème</sup> jour où ils affichent des résultats très proches (Figure IV. 15). Cette différence se traduit par une dispersion plus prononcée des couples de points dans le tracé de Bland-Altman (Figure IV.18) tout en restant dans les limites acceptables des 95%. Ceci peut s'expliquer par la position du Fluxmètre\_3 au milieu de la paroi et donc bien exposé au vent et à la pluie battante, qui dans certaines situations (fissuration de l'enduit extérieur, absence de pare pluie...) peut augmenter la diffusion dans la paroi et augmenter sa conductivité thermique et donc les pertes à travers l'enveloppe. Le Fluxmètre\_1, protégé par le garage, est moins exposé au vent et à la pluie. Les valeurs minimales et maximales (Figure IV.19) sont assez proches ainsi que l'écart type (1,84 et 1,67 W.m<sup>-2</sup> respectivement pour les Fluxmètres\_1 et 3). Pour valider cette constatation, les flux thermiques 1 et 3 sont tracés avec la pluviométrie entre 16 Décembre 2015 et 11 janvier 2016 sur la Figure IV.20.

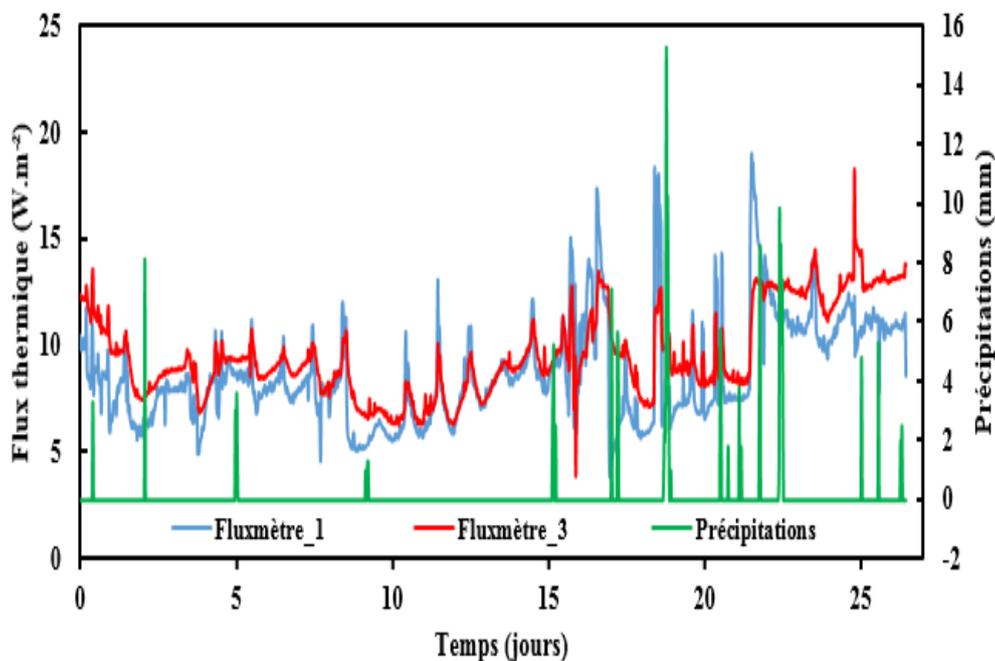


Figure IV.20 : Densité de flux et précipitations pour la deuxième période

Entre le 6<sup>ème</sup> et le 16<sup>ème</sup> jour, il y a eu très peu de pluie ce qui favorise l'homogénéisation de la distribution d'humidité dans la paroi en béton de chanvre et l'égalisation des flux. En revanche, pour les journées pluvieuses, l'écart entre les deux flux est plus remarquable, ce qui confirme que la pluie peut diffuser dans la paroi suite aux fissurations et ainsi augmenter les déperditions thermiques vers l'extérieur.

#### IV.4.1.5. Analyse du confort thermique dans l'appartement

Le diagramme psychométrique de l'air à l'intérieur de chaque pièce permet d'avoir une idée à propos du confort ressenti par les occupants. A cet égard, la température opérative ( $T_o$ ) est calculée en se basant sur la température de l'air sec ( $T_a$ ) donnée par les thermo-hygromètres et la température rayonnante dans la pièce ( $T_r$ ) déduite de la température mesurée par les boules noires ( $T_g$ ) comme suit (Kazkaz and Pavelek, 2013) :

$$T_o = T_a + (1 - A)(T_r - T_a) \quad \text{(IV.1)}$$

A est un coefficient qui dépend de la vitesse de l'air ( $v$ ) :

$$\begin{cases} A = 0.5 (v < 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \Rightarrow \text{hiver} \Rightarrow \text{fenêtres fermées}) \\ A = 0.7 (v > 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \Rightarrow \text{été} \Rightarrow \text{fenêtres ouvertes}) \end{cases}$$

$T_r$  est donnée par :

$$T_r = \left[ (T_g + 273)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \cdot v^{0.6}}{\epsilon \cdot D^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (\text{IV.2})$$

$\epsilon$  is l'émissivité de la boule noire et  $D$  son diamètre (m).

Les diagrammes psychométriques sont uniquement présentés pour le séjour et la chambre à coucher des parents pendant les éventuelles périodes d'occupation : entre 7h du matin et 23h le soir pour le séjour, entre 23h le soir et 7h du matin pour la chambre à coucher.

En se référant aux normes fondamentales de l'ASHRAE (ASHRAE, 2013), les plages acceptables de température et d'humidité opératoires pour les personnes portant des vêtements d'hiver typiques pendant une activité essentiellement sédentaire sont illustrées sur les Figures IV.21 et IV.22. Les niveaux d'humidité relative sont globalement acceptables, des valeurs élevées (>70%) sont décelées à quelques reprises dues au fait que la cuisine est ouverte sur le séjour et que l'activité de cuisson a lieu souvent avec la bouche d'aération fermée. A cela s'ajoute le fait de sécher le linge à l'intérieur du salon. En outre, les points sur le diagramme où une chute de température (au-dessous de 21°C) est observée en hiver correspondent à la période de vacances pendant laquelle les chauffages sont arrêtés.

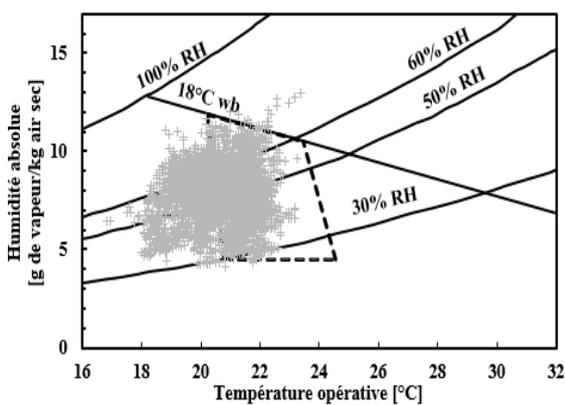


Figure IV.21 : Diagramme psychométrique du séjour en hiver

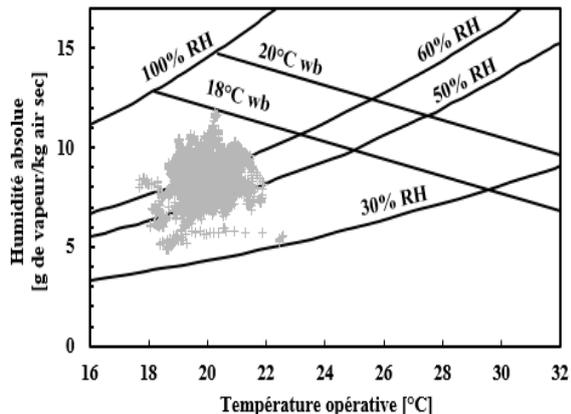


Figure IV.22 : Diagramme psychométrique de la chambre des parents en hiver

Pour la chambre à coucher des parents, l'aération de la pièce n'est toujours pas bien assurée. En plus, la présence des deux chiens en compagnie des parents est une source non-négligeable de vapeur dans l'air, d'où les niveaux d'humidité relative élevés observés. Concernant le

confort thermique dans les chambres à coucher, les études qui existent sur cet axe sont limitées. Le CIBSE (CIBSE, 2006) signale une température de confort minimale de 17°C en hiver, au moment où l'Organisation Mondiale de Santé recommande un seuil minimal de température de l'ordre de 16°C pour ne pas favoriser les infections respiratoires en-dessous de cette température. D'après ce qui précède, les conditions de température intérieure dans l'appartement sont acceptables pour la période hivernale.

#### IV.4.2. Période estivale

##### IV.4.2.1. Station-météo : vitesse et direction du vent

Les mesures pour la période estivale s'étendent du 15 juillet 2016 au 28 septembre 2016.

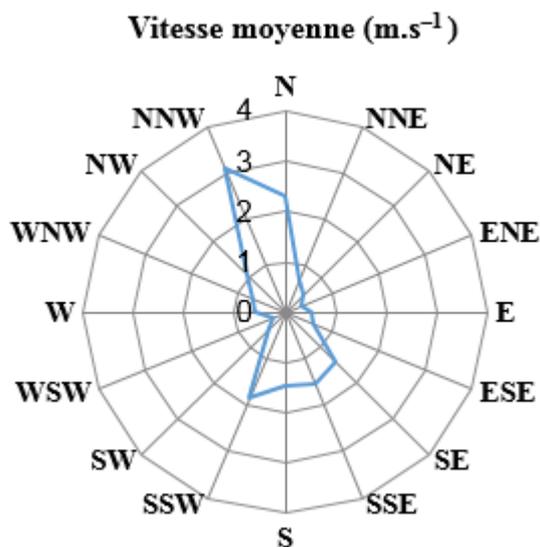


Figure IV.23 : Vitesse moyenne du vent en fonction de sa direction en été

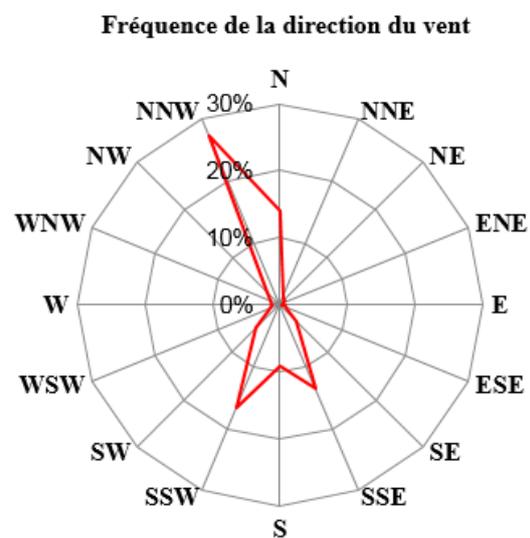


Figure IV.24 : Fréquence de la direction du vent en été

La Figure IV.23 montre la vitesse moyenne du vent en fonction de sa direction en été. Pour cette période, les vents les plus importants viennent des côtés NNW (Nord-Nord-Ouest) et N (Nord) avec des vitesses moyennes de 3,11 et 2,33 m.s<sup>-1</sup> respectivement. Par ailleurs (Figure IV.24), le vent arrive principalement du côté NNW (Nord-Nord-Ouest) avec une fréquence de 27,42% suivie par la direction SSW (Sud-Sud-Ouest) de fréquence 16,58% puis la direction N (Nord) de fréquence 14,01%. Il s'ensuit que la cuisine et la chambre à coucher de l'enfant sont les plus exposées au vent du côté N (nord) et le séjour du côté SSW (Sud-Sud-Ouest).

##### IV.4.2.2. Station-météo : densité de rayonnement

La Figure IV.25 indique la densité de rayonnement solaire reçue par le bâtiment durant la période estivale. Il apparaît clairement que les journées ensoleillées sont fréquentes avec une densité moyenne de rayonnement maximal de 783 W.m<sup>-2</sup> pendant les dix derniers jours de juillet, et de 714 W.m<sup>-2</sup> pour le mois d'Août. Elle chute jusqu'à 617 W.m<sup>-2</sup> pour le mois de Septembre en début de la saison automnale.

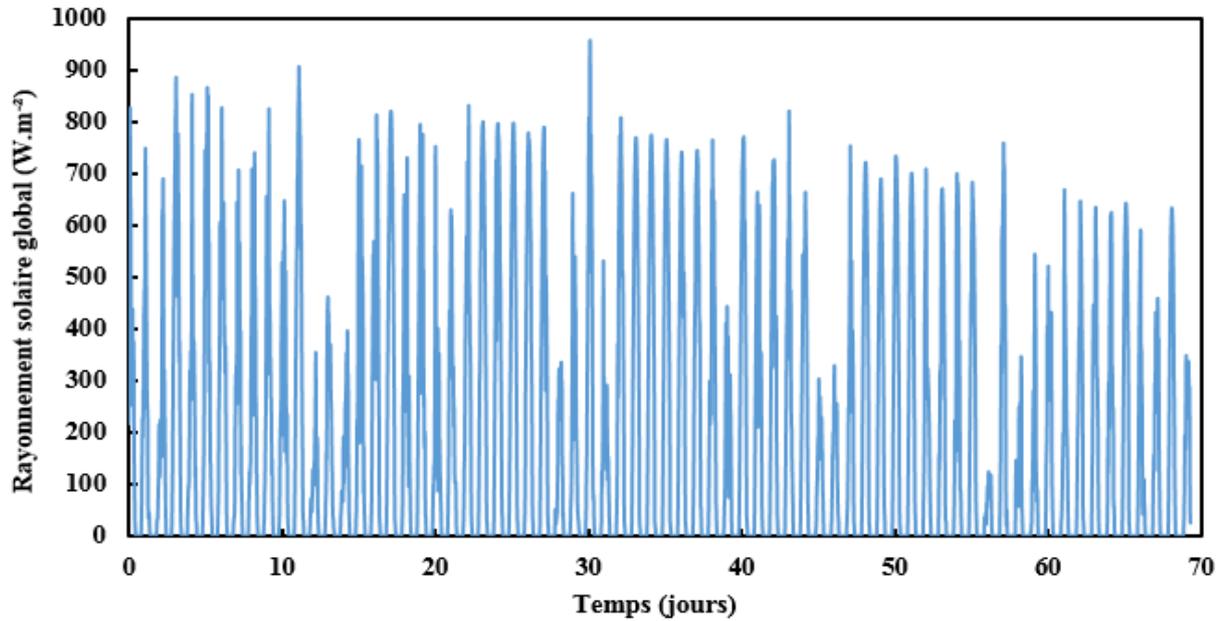


Figure IV.25 : Densité de rayonnement solaire global sur une surface horizontale pour la période estivale

#### IV.4.2.3. Station-météo : pluviométrie, température et humidité relative extérieures

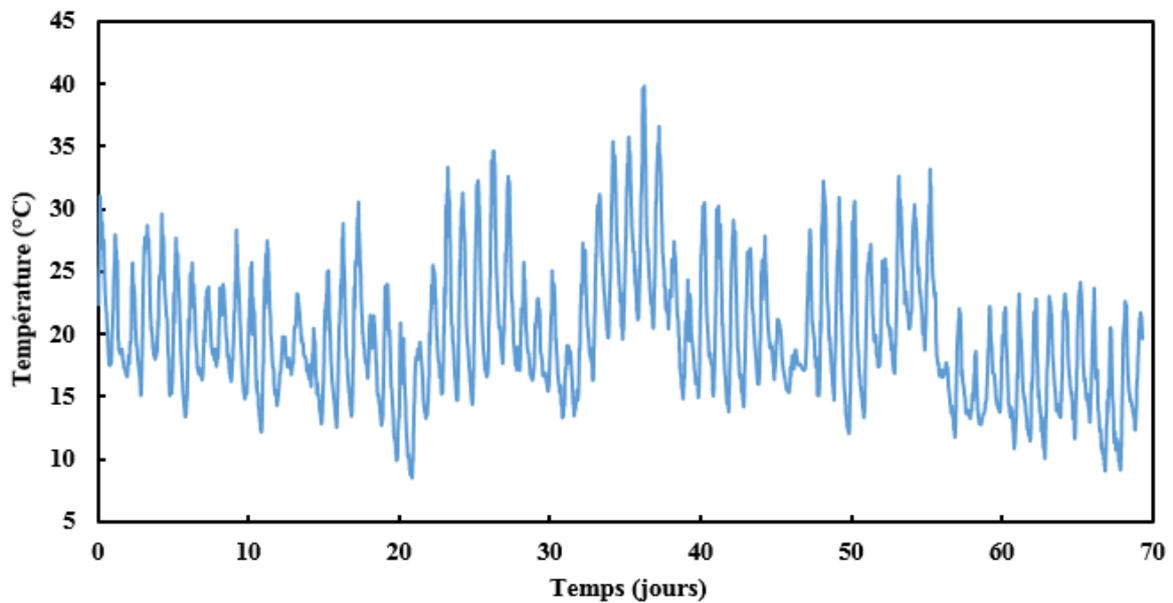


Figure IV.26 : Température extérieure pour la période estivale

La température extérieure est montrée dans le graphe de la Figure IV.26. Elle affiche une température moyenne de  $19,88^{\circ}\text{C}$  avec des pics qui touchent  $40^{\circ}\text{C}$  pendant la dernière semaine d'Août suite à la période de canicule qui a frappé la région. L'humidité relative extérieure et la densité de pluviométrie sont affichées dans Figure IV.27.

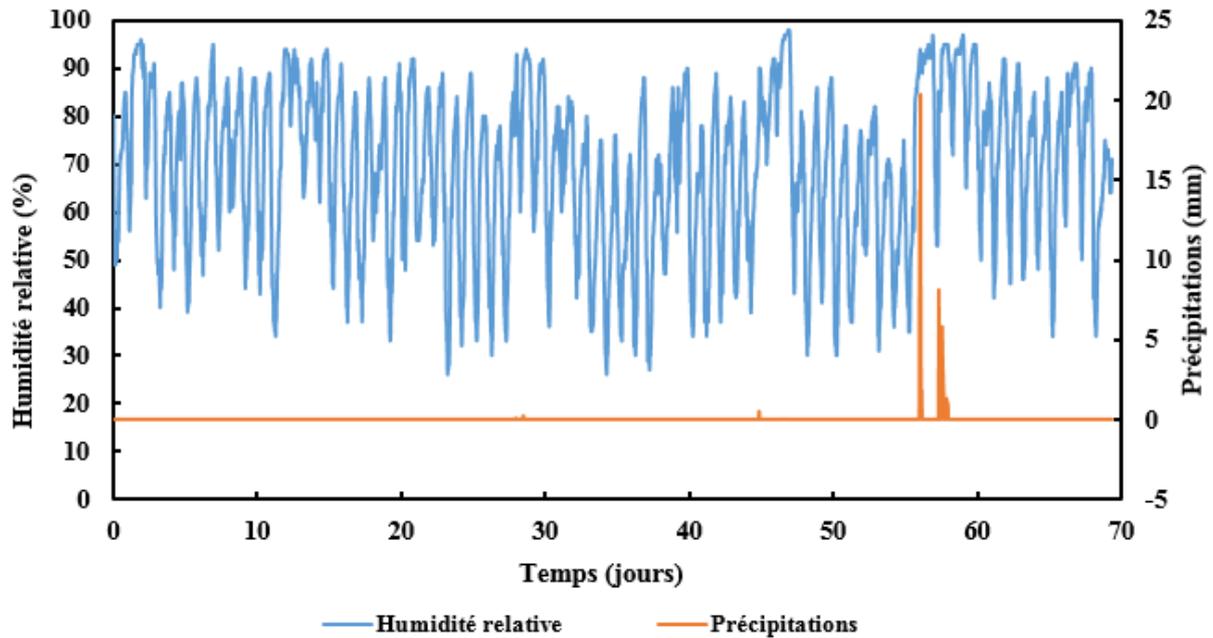


Figure IV.27 : Humidité relative extérieure et quantité de précipitations pendant la période estivale

Le corollaire d'une densité de rayonnement solaire élevée pendant toute cette période est que les journées pluvieuses sont très rares et correspondent à des humidités relatives supérieures à 90%. L'humidité relative extérieure présente une moyenne de 69% qui est typique d'une saison estivale dans le Nord-Est de la France.

#### IV.4.2.4. Analyse du confort thermique dans l'appartement

Suivant la même procédure, les diagrammes psychométriques pour le séjour et la chambre à coucher des parents sont établis en été.

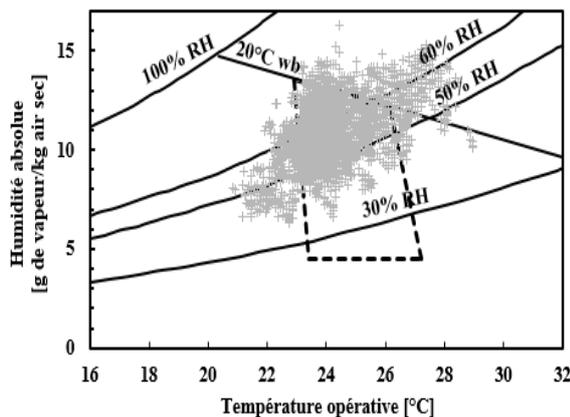


Figure IV.28: Diagramme psychométrique du séjour en été

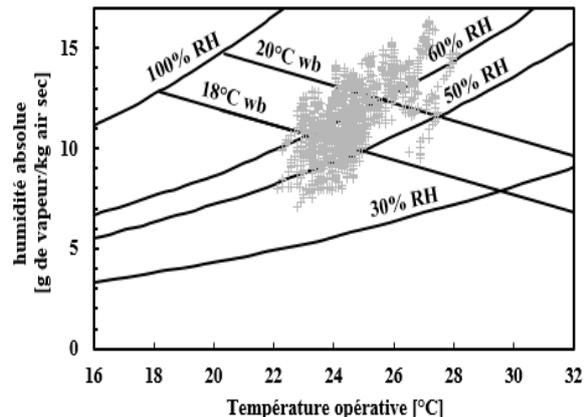


Figure IV.29: Diagramme psychométrique de la chambre des parents en été

La zone de confort estivale indiquée par ASHRAE (ASHRAE, 2013) est montrée sur la Figure IV.28. Les humidités relatives élevées sont identiquement dues aux raisons citées préalablement. Pour la température intérieure, des valeurs élevées sont détectées pendant la période de canicule où la température extérieure atteint 40°C. De même, concernant le confort

thermique dans les chambres à coucher, les normes sont un peu moins précises. Par exemple, la température de confort estival maximale est estimée à 26°C par le CIBSE (CIBSE, 2006). Par ailleurs, ASHRAE 55-2004 (Olesen, 2004) indique que des températures estivales élevées sont acceptables en présence d'un ventilateur.

#### IV.4.2.5. Analyse du déphasage thermique entre l'extérieur et l'intérieur

La Figure IV.30 montre les variations des températures intérieure et extérieure durant cinq jours de la période estivale dans le bureau. La température intérieure dépasse 28°C à plusieurs reprises : ceci s'explique par la période de canicule durant cette période où la température extérieure dépasse régulièrement 35°C. Ensuite, les résultats mettent en évidence la capacité du chanvre-béton à amortir les variations de température externe, car les pics de température intérieure sont retardés d'environ quatre à cinq heures par rapport à l'extérieur.

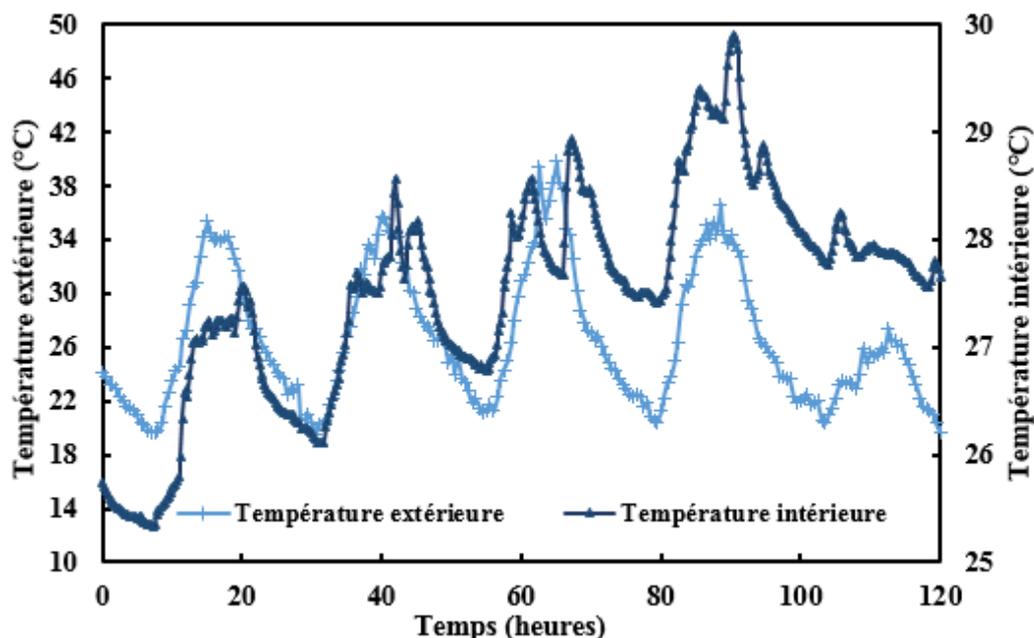


Figure IV.30: Comparaison entre la température extérieure et la température intérieure entre le 20 et le 25 Août 2016

### IV.5. Validation numérique sous l'outil de simulation SPARK

#### IV.5.1. Echelle de la paroi : déperditions thermiques au niveau de la paroi Sud du bureau

##### IV.5.1.1. Comparaison entre les déperditions thermiques expérimentales et numériques

Un modèle 1D d'une paroi multicouches est implémenté dans l'environnement SPARK. Le modèle utilisé tient compte des transferts d'humidité et de chaleur dans le béton de chanvre mais ne tient pas compte des transferts sous phase liquide dus à la pluie battante à la surface extérieure de la paroi. La paroi est soumise aux conditions extérieures relevées par la station météo. Le coefficient de convection thermique extérieur est calculé en fonction des direction et vitesse du vent en utilisant la relation de Sharples (1984) :

$$h_{\text{ext}} = 1,7 V_{\text{loc}} + 5,1 \quad (\text{IV.3})$$

$V_{\text{loc}}$  est la vitesse locale du vent calculée suivant sa direction :

$$V_{\text{loc}} = 1,8 U_{10} + 0,2 \quad \text{façade face au vent} \quad (\text{IV.4})$$

$$V_{\text{loc}} = 0,4 U_{10} + 1,7 \quad \text{façade non-exposée le vent} \quad (\text{IV.5})$$

$U_{10}$  est la vitesse du vent à une hauteur de référence de 10m (approximée par la vitesse mesurée par la station météo). Du côté intérieur, le coefficient de convection thermique est calculé en utilisant la relation :

$$h_{\text{ci}} = 1,33 \sqrt[4]{\frac{|T_{\text{si}} - T_{\text{i}}|}{H}} \quad (\text{IV.6})$$

$T_{\text{si}}$  est la température de surface intérieure de la paroi,  $T_{\text{i}}$  la température de l'air intérieur et  $H$  la hauteur de la paroi.

Pour les échanges GLO (grandes longueurs d'ondes), du côté intérieur, la température des autres parois dans la chambre 3 est supposée égale à celle de l'air intérieur. Du côté extérieur, la paroi est supposée en échange avec le ciel de température :

$$T_{\text{ciel}} = \sqrt[4]{(\delta T_{\text{cc}}^4 + (1 - \delta) T_{\text{a}}^4)} \quad (\text{IV.7})$$

$\delta$  est un paramètre compris entre 0 et 1 dépendant de la nébulosité du ciel (inconnue) et  $T_{\text{cc}}$  est la température du ciel clair en K. Elle est calculée en utilisant la corrélation de Swinbank (1963) :

$$T_{\text{cc}} = 0,0552 T_{\text{a}}^{1,5} \quad (\text{IV.8})$$

$T_{\text{a}}$  est la température de l'air extérieur en K.

La densité de flux de convection intérieur est calculée selon la relation :

$$\phi = h(T_{\text{i}} - T_{\text{si}}) \quad (\text{IV.9})$$

$h$  est le coefficient d'échange global tenant compte des échanges convectifs et radiatifs GLO.

Pour les premières simulations, les propriétés présentées dans le Tableau IV.3 ci-dessous sont utilisées.

Variable	Valeur
Emissivité GLO côté intérieur	0,8
Emissivité GLO côté extérieur	0,8
Coefficient d'absorption solaire $\alpha$	0,6
$\delta$	0,5
Conductivité thermique du béton de chanvre	$0,095 \text{ W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Conductivité thermique de la brique	$0,1869 \text{ W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Tableau IV.3: Propriétés de la paroi étudiée pour le cas de simulation initial

Les figures suivantes comparent la variation de la densité de flux numérique aux valeurs expérimentales relevées par les Fluxmètres\_1 et 2 et les Fluxmètres\_1 et 3 pendant les périodes du 1<sup>er</sup> au 15 décembre 2015 (Figure IV.31) et du 16 décembre 2015 au 11 janvier 2016 (Figure IV.32). Globalement, la simulation sous-estime la densité de flux. La densité de flux moyenne pour la première période est de  $7,96 \text{ W.m}^{-2}$  comparée à  $9,71$  et  $9,15 \text{ W.m}^{-2}$  pour les fluxmètres 1 et 2 respectivement. La densité de flux pour la seconde période est de  $6,68 \text{ W.m}^{-2}$  comparée à  $8,69$  et  $9,59 \text{ W.m}^{-2}$  pour les Fluxmètres 1 et 3. Cependant, la simulation respecte la même allure dynamique des mesures expérimentales en particulier celles du Fluxmètre\_1.

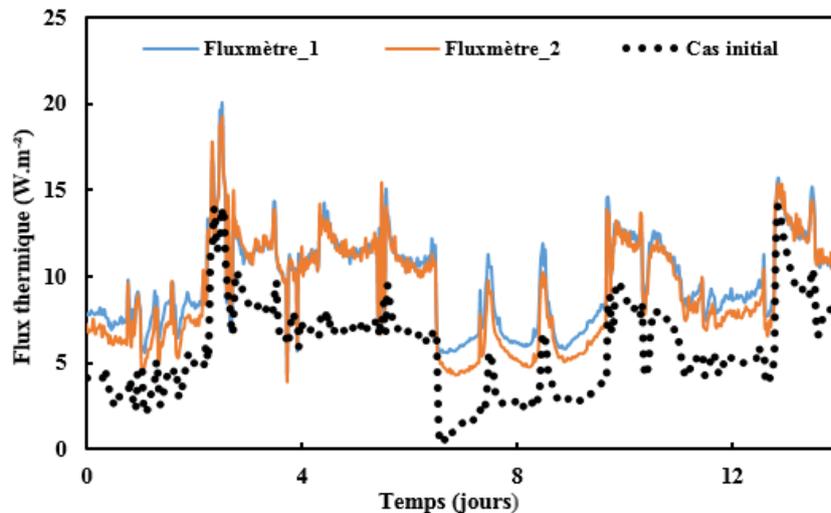


Figure IV.31: Comparaison entre les valeurs expérimentales et numériques du flux thermique pour la 1<sup>ère</sup> période

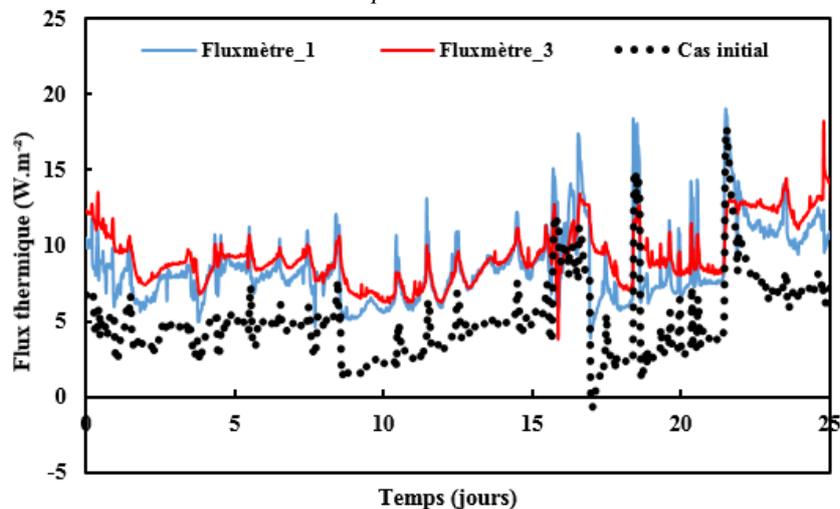


Figure IV.32 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et numériques du flux thermique pour la 2<sup>ème</sup> période

Pour essayer d'expliquer les écarts entre les données expérimentales et numériques, les évolutions de l'humidité relative au milieu de l'enduit sable-chaux, au milieu de la couche en béton de chanvre et à l'interface entre les deux matériaux sont tracées sur la Figure IV.33.

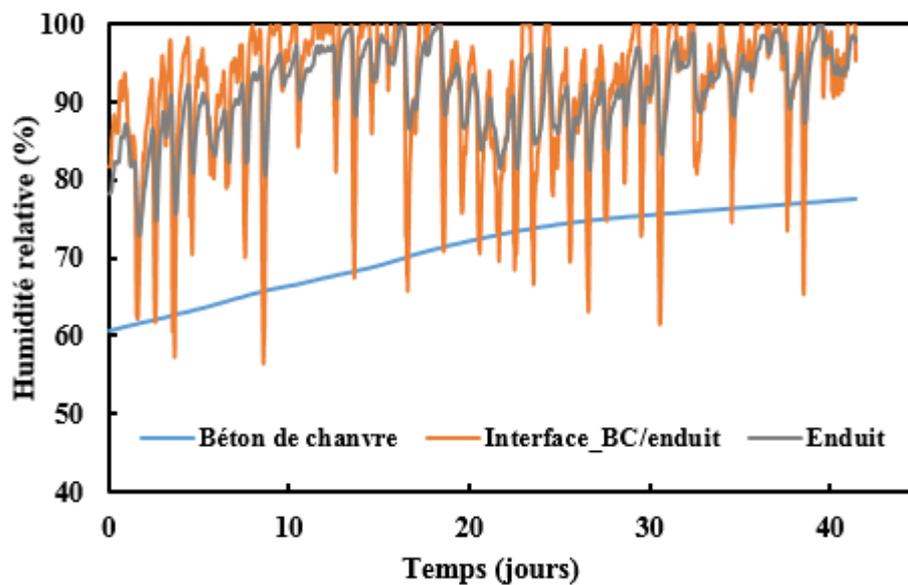


Figure IV.33 : Variation de l'humidité relative au milieu de l'enduit sable - chaux, au milieu de la paroi en béton de chanvre et à l'interface entre les deux pour la période allant du 1<sup>er</sup> décembre 2015 à 11 janvier 2016

Les résultats montrent une condensation (humidité relative supérieure à 100% à l'interface et dans l'enduit) (Figure IV.33). Une humidité de 60% est considérée au début de la simulation. En négligeant les résultats des premiers jours afin de s'éloigner de l'effet des conditions initiales, on observe une condensation à l'interface entre le béton de chanvre et l'enduit sable-chaux qui permet en partie d'expliquer les écarts constatés entre le modèle numérique et les mesures expérimentales car la validité du modèle numérique actuel est dans le domaine hygroscopique et pour des humidités relatives inférieures à 95%. Cette condensation a pour effet d'augmenter la conductivité thermique du béton de chanvre. D'autre part, de légères fissurations de l'enduit entraînent la diffusion de l'eau de pluie dans l'enduit et dans le béton de chanvre ce qui a pour effet d'augmenter les pertes thermiques. Afin de mieux comprendre cet écart constaté, une étude paramétrique à l'échelle de la paroi est effectuée comme détaillé dans les parties suivantes.

#### IV.5.1.2. Etude paramétrique sur la conductivité du béton de chanvre

La conductivité thermique du béton de chanvre (BC) sec, estimée à environ  $0,095-0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , peut atteindre  $0,18 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  lorsque l'humidité relative dans l'enveloppe dépasse 80% ou que la condensation se produit dans le mur (Pretot et al., 2014). Gourlay et al. (2017) a montré qu'avec une humidité relative élevée (entre 80% et 100%), la conductivité thermique des isolants biosourcés pourrait être 1,2 à 7 fois supérieure à l'état sec et pour le chanvre-béton, elle pourrait atteindre  $0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  (Gourlay et al., 2017). Les mêmes observations ont été trouvées par Ait Ouméziane (2013). Ainsi, compte tenu des fissures dans la façade ainsi que de l'exposition des murs au vent et à la pluie, la valeur proposée par le constructeur ( $0,095 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) ne semble pas trop adaptée. Le Tableau IV.4 et les graphiques des Figures

IV.34 et IV.35 montrent l'impact de la conductivité du béton de chanvre ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ). La Variation du Coefficient d'Erreur Quadratique Moyen COV est définie ci-dessous et calculée pour chaque simulation afin de valider les résultats :

$$\text{COV} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{\text{sim}} - q_{\text{exp}})^2}{n}}}{\overline{q_{\text{exp}}}} \quad (\text{IV.10})$$

$q_{\text{sim}}$  est le flux numérique,  $q_{\text{exp}}$  le flux mesuré,  $\overline{q_{\text{exp}}}$  le flux moyen et  $n$  le nombre de mesures.

	Flux thermique moyen ( $\text{W.m}^{-2}$ ) (Déc.1, 2015– Déc. 15, 2015)			Flux thermique moyen ( $\text{W.m}^{-2}$ ) (Déc. 15, 2015 – Jan. 11, 2016)		
	<b>Expérimental</b>	Fluxmètre_1 9,71	Fluxmètre_2 9,15		Fluxmètre_1 8,69	Fluxmètre_3 9,59
<b>Simulations</b>	<b>Flux moyen</b>	<b>COV</b>	<b>COV</b>	<b>Flux moyen</b>	<b>COV</b>	<b>COV</b>
$\lambda_{\text{BC\_Initial}}$	5,76	0,71	0,62	5,03	0,90	0,99
$\lambda_{\text{BC}} = 0,12$	6,24	0,58	0,49	5,19	0,72	0,92
$\lambda_{\text{BC}} = 0.138+0.269* w$	7,00	0,42	0,34	5,89	0,52	0,69
$\lambda_{\text{BC}} = 0,18$	7,02	0,37	0,29	6,27	0,43	0,60

Tableau IV.4: Variation des flux thermiques en fonction de la conductivité du béton de chanvre

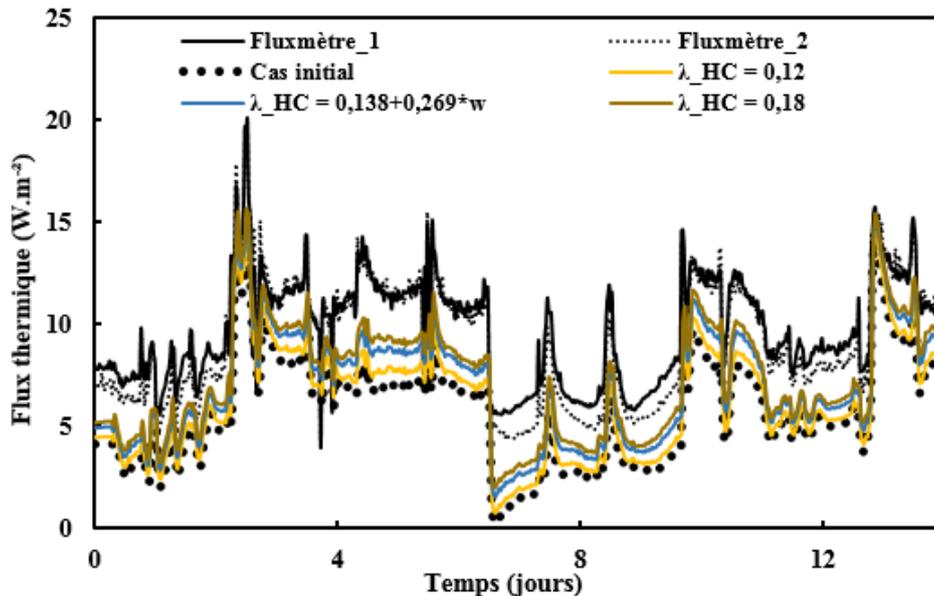


Figure IV.34: Comparaison entre les flux thermiques expérimentaux et numériques en fonction de la conductivité thermique du béton de chanvre entre le 1 Déc. 2015 et le 15 Déc. 2015

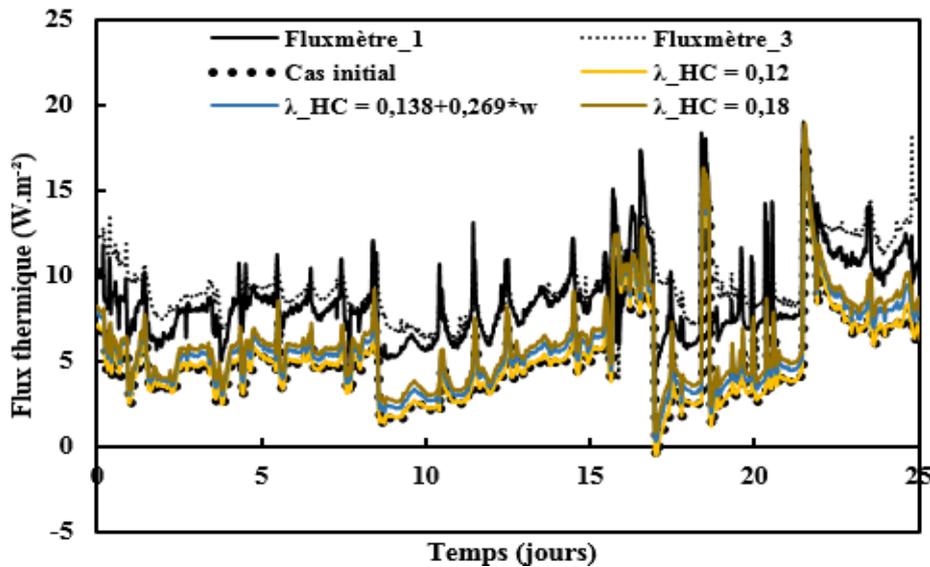


Figure IV.35: Comparaison entre les flux thermiques expérimentaux et numériques en fonction de la conductivité thermique du béton de chanvre entre le 16 Déc. 2015 et le 11 Jan. 2016

L'augmentation de la conductivité thermique du béton de chanvre conduit à améliorer les résultats numériques (Figures IV.34 et IV.35) puisque le coefficient d'erreur quadratique moyenne est réduit au fur et à mesure que la conductivité est plus élevée (augmentation de 22% de la moyenne du flux thermique dans la 1<sup>ère</sup> période et de 25% dans la deuxième avec une conductivité de l'ordre de 0,18 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>). Cela peut s'expliquer par le fait que les pertes de chaleur à travers la paroi augmentent lorsque la conductivité thermique est plus élevée, ce qui contribue à réduire l'écart avec les données expérimentales. La conductivité thermique proposée par Collet (Collet, 2004) en fonction de la teneur en eau dans la paroi est adoptée pour la suite des simulations.

#### IV.5.1.3. Etude paramétrique sur le coefficient d'absorption solaire

L'influence du coefficient d'absorption solaire est testée. Deux cas de simulations sont effectués avec  $\alpha = 0,2$  dans le premier et  $\alpha = 0,7$  dans le second comme montré dans le Tableau IV.5. L'impact du coefficient  $\alpha$  sur le flux moyen est légèrement faible bien qu'un coefficient d'absorption solaire réduit fasse augmenter les déperditions thermiques moyennes. En fait, une paroi qui absorbe moins de rayonnement aura une température de surface inférieure à celle qui est plus absorbante, ce qui entraîne l'augmentation du gradient de température dans ce cas et fait hausser les flux à travers la paroi. La valeur du coefficient d'absorption  $\alpha$  fixée à 0,2 est retenue pour la suite.

	Flux thermique moyen (W.m <sup>-2</sup> ) (Déc.1, 2015– Déc. 15, 2015)			Flux thermique moyen (W.m <sup>-2</sup> ) (Déc. 15, 2015 – Jan. 11, 2016)		
	<b>Experimental</b>	Fluxmètre_1 9,71	Fluxmètre_2 9,15		Fluxmètre_1 8,69	Fluxmètre_3 9,59
<b>Simulations</b>	<b>Flux moyen</b>	<b>COV</b>	<b>COV</b>	<b>Flux moyen</b>	<b>COV</b>	<b>COV</b>
$\alpha_{\text{initial}}$	7,00	0,42	0,34	5,89	0,52	0,69

$\alpha = 0,2$	7,15	0,39	0,32	6,01	0,49	0,66
$\alpha = 0,7$	6,77	0,46	0,38	5,71	0,57	0,75

Tableau IV.5: Variation des flux thermiques en fonction du coefficient d'absorption solaire

IV.5.1.4. Etude paramétrique sur le coefficient d'échange convectif intérieur

D'autres études sont menées sur le coefficient de transfert convectif intérieur. Trois corrélations différentes sont testées (Peeters et al., 2011) : les deux premières sont respectivement proposées par Alamdari et Hammoud ( $h_{conv\_int\_1}$ ) et Fohanno et Polidori ( $h_{conv\_int\_2}$ ) pour les parois verticales avec des échanges par convection naturelle, et la troisième est définie dans les normes ASHREA pour les murs verticaux ( $h_{conv\_int\_3}$ ).

$$h_{conv\_int\_1} = \left[ \left( 1.5 \left( \frac{T_i - T_{si}}{H} \right)^{\frac{1}{4}} \right)^6 + \left( 1.23 (T_i - T_{si})^{\frac{1}{3}} \right)^6 \right]^{\frac{1}{6}} \quad (IV.11)$$

$$h_{conv\_int\_2} = 1.235 (T_i - T_{si})^{\frac{1}{4}} \exp(0.0467H) \quad (IV.12)$$

$$h_{conv\_int\_3} = 1.26 (T_i - T_{si})^{\frac{1}{3}} \quad (IV.13)$$

	Flux thermique moyen ( $W.m^{-2}$ ) (Déc.1, 2015 – Déc. 15, 2015)			Flux thermique moyen ( $W.m^{-2}$ ) ( Déc. 15, 2015 – Jan. 11, 2016)		
	<b>Experimental</b>	Fluxmètre_1 9,71	Fluxmètre_2 9,15		Fluxmètre_1 8,69	Fluxmètre_3 9,59
<b>Simulations</b>	<b>Flux moyen</b>	<b>COV</b>	<b>COV</b>	<b>Flux moyen</b>	<b>COV</b>	<b>COV</b>
<b><math>h_{initial}</math></b>	7,15	0,39	0,32	6,01	0,49	0,66
<b><math>h_{conv\_int\_1}</math></b>	7,25	0,374	0,299	6,24	0,442	0,609
<b><math>h_{conv\_int\_2}</math></b>	7,27	0,375	0,297	6,31	0,428	0,593
<b><math>h_{conv\_int\_3}</math></b>	7,26	0,374	0,299	6,30	0,430	0,595

Tableau IV. 6: Variation des flux thermiques en fonction du coefficient d'échange convectif intérieur

Les effets du coefficient d'échange convectif intérieur sur les pertes thermiques sont minimes à l'échelle de la paroi. En effet, le coefficient d'erreur quadrique moyenne varie très légèrement, ou ne varie pas en changeant le coefficient thermique de convection intérieur. Ainsi, la corrélation ( $h_{conv\_int\_2}$ ) est utilisée dans les cas à suivre.

Les données sur la conductivité thermique de la brique ne sont pas nombreuses dans la littérature. La valeur de la résistance thermique  $R_{\text{brique}} = 1,07 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ , donnée par le bureau d'étude, a conduit à choisir la valeur de conductivité de  $0,1869 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  du départ. Deux valeurs sont examinées dans cette section :  $0,20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  et  $0,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (Tableau IV.7).

	Flux thermique moyen ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (Déc.1, 2015– Déc. 15, 2015)			Flux thermique moyen ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (Déc. 15, 2015 – Jan. 11, 2016)		
	<b>Experimental</b>	Fluxmètre_1 9,71	Fluxmètre_2 9,15		Fluxmètre_1 8,69	Fluxmètre_3 9,59
<b>Simulations</b>	<b>Flux moyen</b>	<b>COV</b>	<b>COV</b>	<b>Flux moyen</b>	<b>COV</b>	<b>COV</b>
$\lambda_{\text{brique\_Initial}}$	7,27	0,375	0,297	6,31	0,428	0,593
$\lambda_{\text{brique}} = 0,20$	7,50	0,333	0,261	6,46	0,397	0,559
$\lambda_{\text{brique}} = 0,24$	7,80	0,293	0,222	6,57	0,380	0,540

Tableau IV.7: Variation des flux thermiques en fonction de la conductivité thermique de la brique

L'impact de la conductivité thermique de la brique est bien significatif sur l'amélioration des résultats. En effet, une augmentation de cette conductivité jusqu'à  $0,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  réduit le coefficient d'erreur quadratique moyenne de 23% sur la première période et de 10% sur la seconde période. D'après ce qui précède, les deux paramètres les plus influents sur l'optimisation des résultats sont les conductivités thermiques du béton de chanvre et de la brique. Ainsi, un cas de simulation global est étudié en fixant la conductivité du béton de chanvre à  $0,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  et celle de la brique à  $0,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Le Tableau IV.8 ci-après et les figures ci-après résument l'ensemble de ces résultats.

	Flux thermique moyen ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (Déc.1, 2015– Déc. 15, 2015)			Flux thermique moyen ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (Déc. 15, 2015 – Jan. 11, 2016)		
	<b>Experimental</b>	Fluxmètre_1 9,71	Fluxmètre_2 9,15		Fluxmètre_1 8,69	Fluxmètre_3 9,59
<b>Simulations</b>	<b>Flux moyen</b>	<b>COV</b>	<b>COV</b>	<b>Flux moyen</b>	<b>COV</b>	<b>COV</b>
<b>Cas global</b>	8,53	0,20	0,15	7,33	0,26	0,40

Tableau IV.8: Cas de simulation global

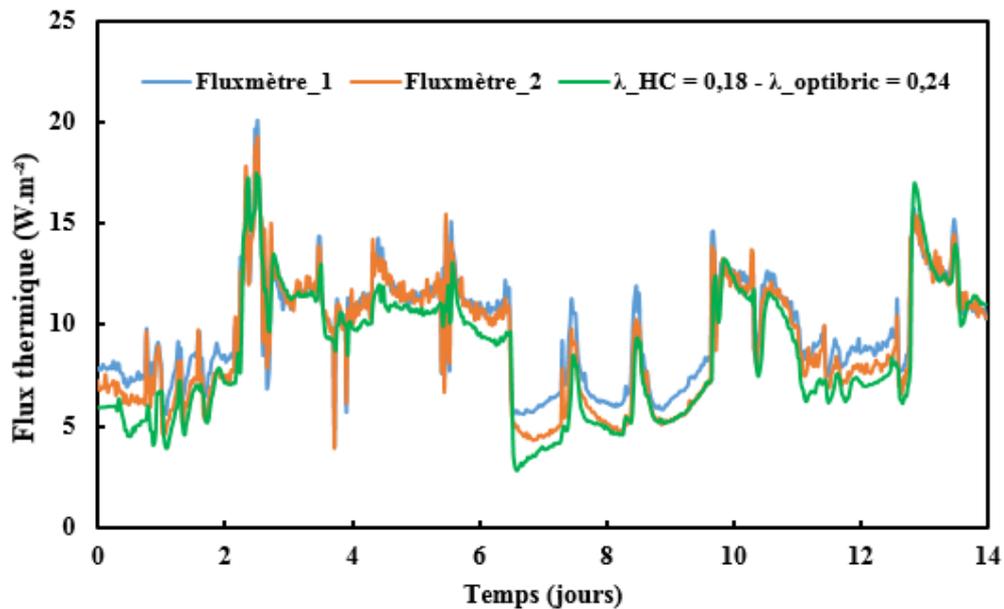


Figure IV.36: Comparaison entre les flux thermique expérimentaux et le cas numérique global entre le 1 Déc. 2015 et le 15 Déc. 2016

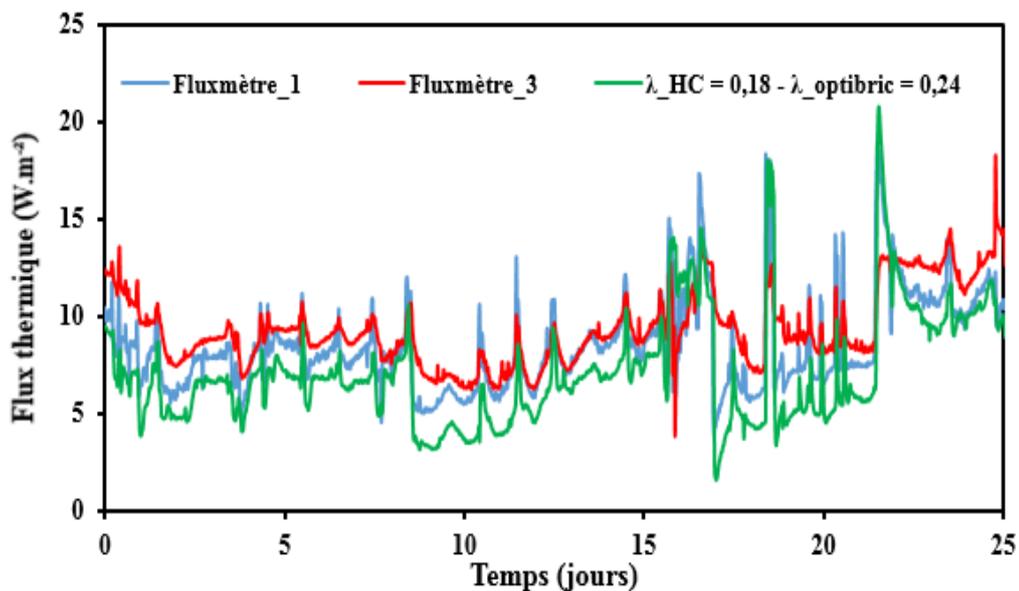


Figure IV.37: Comparaison entre les flux thermique expérimentaux et le cas numérique global entre le 16 Déc. 2015 et le 11 Jan. 2016

Le cas global de simulation montre qu'une combinaison adéquate des conductivités thermiques du béton de chanvre et de la brique conduit à mieux prédire les déperditions thermiques à travers la paroi multicouche étudiée. Par conséquent, la maîtrise des propriétés de l'enveloppe est indispensable pour améliorer les résultats du modèle.

#### IV.5.2. Echelle du local : température et humidité relative intérieures dans le bureau

À l'échelle du local, la température et l'humidité relative de l'air intérieur sont étudiées dans le bureau. Les résultats du modèle sont comparés aux mesures thermohygro-métriques pendant la saison estivale, du 26 juillet 2016 au 23 septembre 2016. Le bureau est d'une

superficie de  $2,8 \times 3,3 \text{ m}^2$  et de 2,5 m de hauteur. La façade sud contient une fenêtre à double vitrage de  $1,25 \times 1,1 \text{ m}^2$  couvrant 20% de la surface du mur. La façade est en liaison avec un garage tandis que les parois du côté Nord et Ouest sont considérées comme des cloisons intérieures. Leur température moyenne est supposée égale à la température de l'air intérieur mesurée respectivement dans les chambres des parents et de l'enfant. Le coefficient de transfert convectif intérieur pour les parois verticales est initialement déduit de la corrélation de ( $h_{\text{conv\_int\_2}}$ ) utilisée dans la section précédente. Pour les coefficients de transfert convectifs de chaleur du plancher ( $h_{\text{conv\_int\_floor}}$ ) et du toit ( $h_{\text{conv\_int\_roof}}$ ) les expressions des équations (IV.14) et (IV.15) sont utilisées (Peeters et al., 2011). Les variations des coefficients de transfert de chaleur par convection intérieure sont illustrées dans la Figure IV.38.

$$h_{\text{conv\_int\_floor}} = 1.8 |T_i - T_{\text{si}}|^{\frac{1}{3}} \quad (\text{IV.14})$$

$$h_{\text{conv\_int\_roof}} = \begin{cases} \left[ \left( 1.5 \left( \frac{T_i - T_{\text{si}}}{H} \right)^{\frac{1}{4}} \right)^6 + \left( 1.23 (T_i - T_{\text{si}})^{\frac{1}{3}} \right)^6 \right]^{\frac{1}{6}} & \text{si } T_i > T_{\text{si}} \\ 0.6 (T_i - T_{\text{si}})^{\frac{1}{5}} & \text{si } T_i < T_{\text{si}} \end{cases} \quad (\text{IV.15})$$

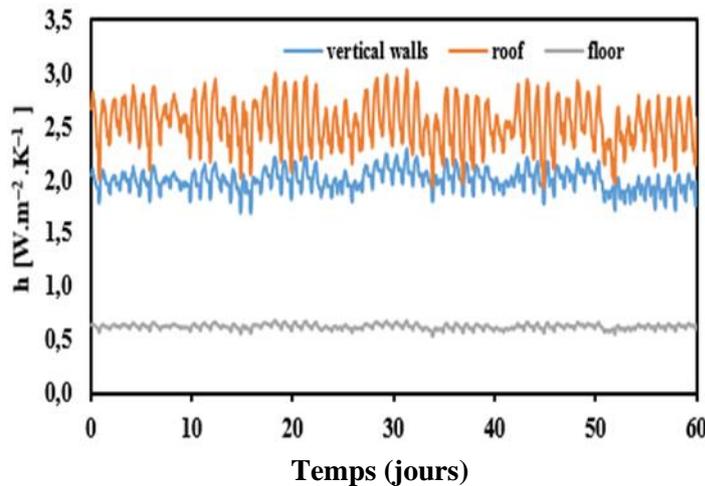


Figure IV.38 : Coefficients d'échange convectifs intérieurs dans la période entre Juillet 26, 2016 et Septembre 23, 2016

Le coefficient de transfert thermique extérieur de la façade sud est calculé selon la procédure décrite précédemment dans les équations (IV.3), (IV.4) et (IV.5). Cependant, pour la façade Est, il est supposé égal à  $3 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  puisque la façade correspondante est protégée par le garage et donc non exposée au vent, à la pluie et aux radiations solaires. La chaleur générée dans le bureau est principalement due à l'ordinateur et à l'éclairage. Le bureau est censé être occupé tous les jours de 14h à 18h. Une ventilation de nuit de  $1,5 \text{ vol.h}^{-1}$  est envisagée en été. L'inertie thermique initiale de la pièce est réglée sur  $I = 500\,000 \text{ J.K}^{-1}$ . Un cas initial est testé. Ensuite, une étude paramétrique est effectuée en faisant varier l'inertie thermique de la pièce  $I$ , les sources de chaleur et d'humidité dans la pièce, et les coefficients de transfert de chaleur par convection intérieure. Les études de cas sont détaillées dans le Tableau IV. 9 et pour des raisons

de clarté, les résultats sont présentés uniquement pour vingt jours entre le 5 Août 2016 et le 25 Août 2016.

Cas	Notes	Température moyenne de l'air (°C)	Humidité relative moyenne de l'air (%)
<b>Expérimental</b>	-	24,80	53,23
<b>Initial</b>	Simulation initiale	25,73	47,08
<b>Cas_1</b>	Inertie thermique multipliée par 5	25,78	46,96
<b>Cas_2</b>	Sources de chaleur et vapeur négligées	25,16	47,68
<b>Cas_3</b>	$h_{conv\_int} = 4,5$	24,24	51,46
<b>Cas_4</b>	$h_{conv\_plafond} = 5,5$ et $h_{conv\_plancher} = 1,38$	25,28	48,36

Tableau IV. 9: Etude paramétrique à l'échelle du local

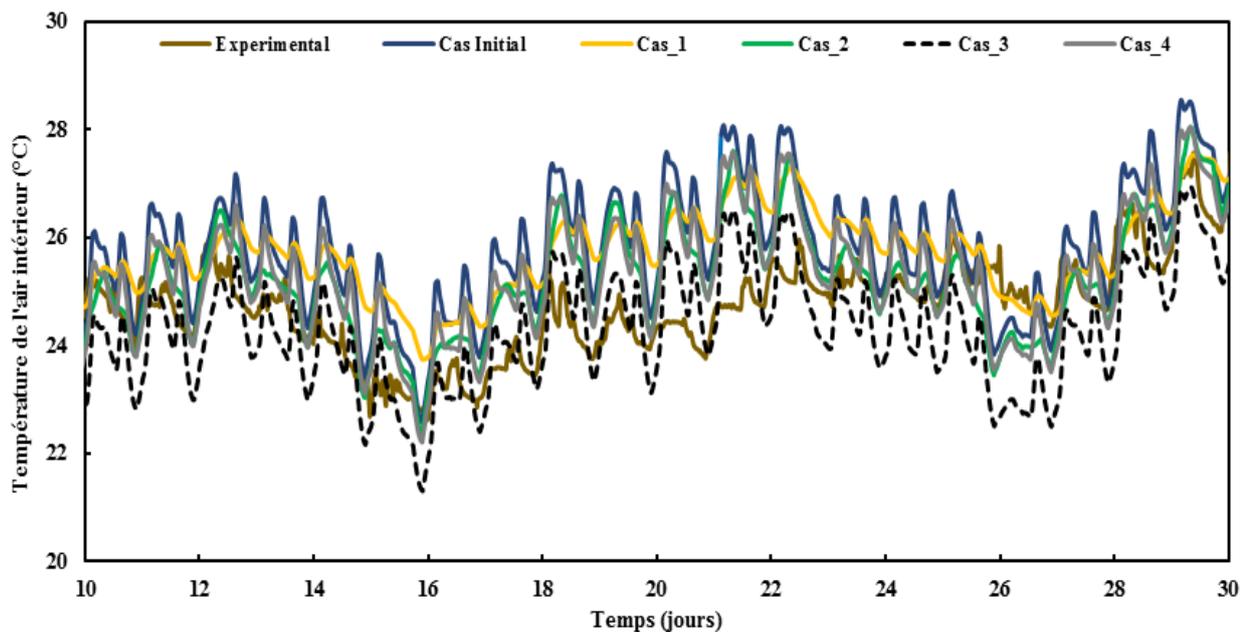


Figure IV.39: Comparaison entre les températures intérieures mesurées et calculées dans le local pour la période estivale

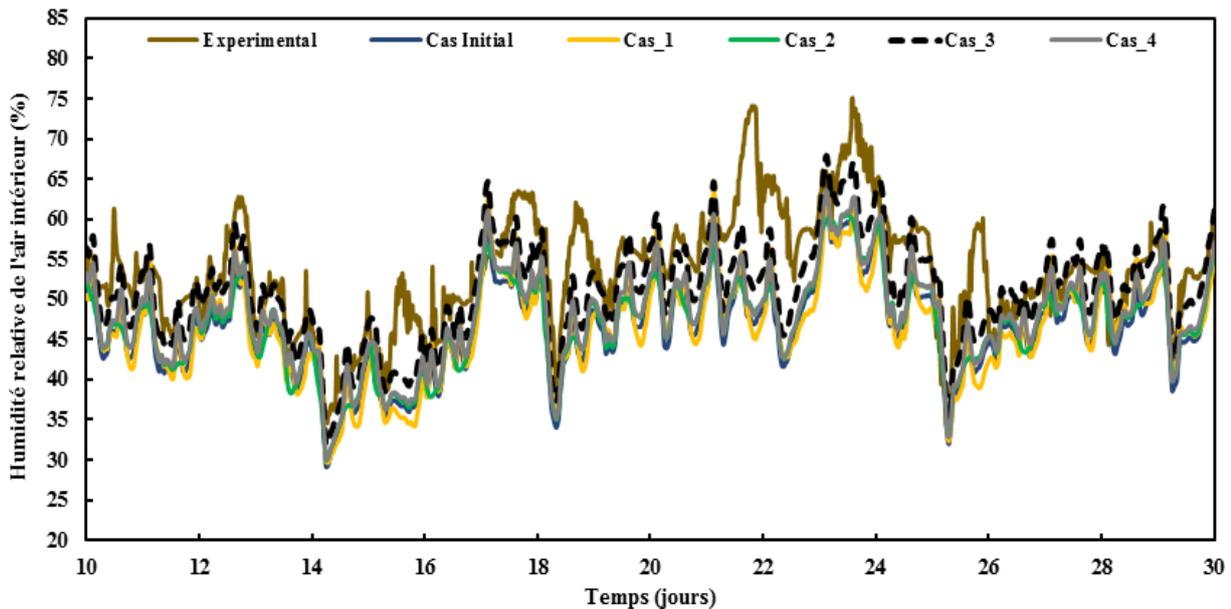


Figure IV.40: Comparaison entre les humidités relatives intérieures mesurées et calculées dans le local pour la période estivale

Le cas numérique initial montre que la température de l'air à l'intérieur du bureau est globalement surestimée (Figure IV.39). Augmenter l'inertie thermique dans la pièce (Cas\_1) diminue les fluctuations de température intérieure et réduit son amplitude de variations sans affecter sa valeur moyenne (25,73°C dans le cas initial et 25,78°C dans le Cas\_1). Cependant, négliger les sources de chaleur et de vapeur intérieures (Cas\_2) fait chuter de 0,56°C la température moyenne de l'air étant donné que la chaleur libérée est réduite dans le local. Ce qui met l'accent sur l'importance du scénario d'occupation dans la pièce qui est variable selon les activités des habitants. Dans la corrélation ( $h_{conv\_int\_2}$ ), l'ordre de grandeur du coefficient de convection avec les parois verticales est de  $2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Une fois augmenté à  $4,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  (et ceci est justifié par les fenêtres ouvertes en été et ainsi une vitesse plus grande de l'air)(Cas\_3), les échanges convectifs entre l'air dans le local et la surface intérieure de la paroi sont favorisés. Ainsi, le gradient de température considéré se réduit et la température moyenne de l'air intérieur diminue de l'ordre de 1,5 °C. En outre, le Cas\_3 reproduit bien les variations dynamiques de la température intérieure mesurée en termes d'amplitude et de déphasage. Finalement, pour le Cas\_4 où les coefficients d'échange convectifs du plancher et du plafond sont fixés respectivement à 1,38 et  $5,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , la température moyenne est diminuée de 0,45°C. Ce qui montre que le coefficient convectif des parois verticales a une plus grande influence sur les résultats que celui du plancher et du plafond.

Les observations notées pour l'humidité relative de l'air intérieur sont similaires (Figure IV.40). Le Cas\_3 montre les meilleurs résultats avec une humidité relative moyenne de 51,46%. L'inertie thermique du bureau (Cas\_2) a un impact réduit sur l'humidité relative par rapport à son influence sur la température de l'air intérieur. En négligeant les sources de chaleur et de vapeur (Cas\_3), l'humidité relative augmente de 0,60% de moyenne par rapport au cas initial à cause de la diminution de la température dans ce cas. Dans le Cas\_4, l'humidité relative moyenne s'est améliorée mais elle reste toujours écartée des résultats expérimentaux.

En se basant sur ce qui précède et tenant compte de la précision des hygromètres, le Cas\_3 semble le plus adapté pour modéliser le comportement du béton de chanvre dans le local étudié. Il s'en suit qu'une combinaison convenable des coefficients de transferts convectifs des parois intérieures, et ainsi une maîtrise du scénario d'occupation de la pièce est un atout pour améliorer les sorties du modèle.

#### **IV.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, les résultats expérimentaux du suivi d'un appartement utilisant le béton de chanvre comme isolation par l'extérieur sont présentés. Les conditions de température et d'humidité relative dans l'appartement sont relativement satisfaisantes, les pics d'humidité relative peuvent être réduits en réglant la ventilation de l'appartement. La variation expérimentale du flux déprédatif dans la paroi Sud est appuyée par des résultats de la simulation numérique à l'échelle de la paroi. Ceux-ci montrent que des valeurs plus élevées de la conductivité thermique du béton de chanvre et de la brique correspondent mieux aux résultats expérimentaux. D'où l'importance de la précision sur les propriétés des matériaux dans la modélisation.

D'autre part, l'évaluation du confort thermique dans les locaux en hiver et en été montre des problèmes d'humidité élevée dans la chambre à coucher des parents et parfois dans le séjour à cause des charges d'humidité intérieure et du manque de ventilation. Ce qui montre que le rôle des occupants sur le confort thermique et les performances énergétiques du bâtiment est important.

Par ailleurs, une étude numérique est réalisée à l'échelle du bureau de l'appartement. Les températures et les humidités relatives intérieures sont exploitées. Les résultats numériques reproduisent bien les mesures expérimentales. La maîtrise du scénario d'occupation des habitants est un paramètre non négligeable qui influence les résultats. De plus, la modélisation du transfert de chaleur avec l'ambiance intérieure, et en particulier le choix des coefficients de convection, sont très importants dans l'optimisation des résultats.

#### **IV.7. Reproductivité du béton de chanvre dans le bâtiment**

Etant non porteur, le béton de chanvre s'utilise avec des ossatures en bois ou comme isolation par l'intérieur ou par l'extérieur, sachant que les deux premières sont les plus répandues et mieux maîtrisées (existence de règles professionnelles). Dans ces cas, on profite aussi de la capacité du béton de chanvre à réduire l'humidité relative intérieure. Le liant utilisé tel que la chaux possède des propriétés antiseptiques, qui évitent le développement de germes pathogènes et/ou des moisissures pour conserver une atmosphère saine. Par ailleurs, le béton de chanvre (avec enduit) est classé M1 quant à la résistance au feu lui conférant le caractère non inflammable : la chaux ignifuge les matières végétales et en cas d'incendie le bloc ne dégage que très peu de fumée et pas de substances toxiques.

Dans le cas où le béton de chanvre est utilisé comme une isolation par l'extérieur comme pour le cas du bâtiment étudié dans ce chapitre (résidence des CERITHES), l'intérêt du béton de chanvre réside dans sa capacité d'isolation thermique seulement. Il est important que le béton de chanvre ne soit pas exposé à la pénétration de la pluie et donc une attention particulière doit être portée à la formulation de l'enduit afin d'éviter sa fissuration (fissurations qui favorisent la succion capillaire). A cela s'ajoutent les défauts de constructions et/ou les liaisons entre les différentes parois qui créent d'éventuels ponts thermiques affectant le confort intérieur surtout en hiver et la consommation énergétique du bâtiment.

## Conclusion générale et perspectives

Actuellement, les pouvoirs publics ont adopté de nouvelles mesures sur l'efficacité énergétique dans les logements neufs et rénovés. Ainsi, des matériaux d'isolation innovants, à base de fibres végétales, viennent se substituer aux isolants classiques, vu leur faible impact environnemental et leur propriétés thermiques et hydriques intéressantes.

L'un de ces fameux matériaux biosourcés est le béton de chanvre. L'état de l'art a montré le développement des études menées sur le béton de chanvre à l'échelle de la paroi et a mis en évidence les rares tentatives de son étude à l'échelle du bâtiment.

Les premiers objectifs de cette thèse résident dans l'appréhension du comportement hygrothermique du béton de chanvre à l'échelle de la paroi et du local en élaborant des modèles numériques fiables capable d'assurer une prédiction réussie de son comportement. Le challenge s'est orienté suivant deux volets :

- Le premier est de développer des modèles en tenant compte de phénomènes physiques importants relatifs aux matériaux hygroscopiques en général et qui sont négligés dans la plupart des études précédentes. Il s'agit de l'hystérésis et de la thermodépendance des isothermes de sorption.
- Le deuxième est de pouvoir analyser physiquement l'influence de chacun de ces aspects sur la prédiction des résultats.

Par la suite, le but du travail passe par l'application de modèles élaborés sur plusieurs types de parois (simples ou multicouches) et à l'échelle de vrais bâtiments utilisant le béton de chanvre dans leur isolation.

A cet égard, le travail du chapitre II a permis de créer et de valider quatre modèles numériques suivant deux approches de modélisation des courbes de sorption du béton de chanvre. Les résultats ont souligné la pertinence du modèle standard de transferts de chaleur et de masse surtout du côté intérieur de la paroi. Ensuite, l'hystérésis permet concrètement de mieux modéliser le comportement hygrothermique de la paroi en régime dynamique, lorsque celle-ci est sollicitée par des conditions variables pendant de longues durées. En outre, le modèle à thermodépendance donne des résultats satisfaisants principalement lorsque les conditions de température sont extrêmes. Le modèle complet permet de combiner simultanément les avantages de l'hystérésis et la thermodépendance contribuant à donner de bons résultats en régime dynamique.

Ces modèles ainsi validés sont appliqués sur d'autres types de parois et pour des simulations annuelles. Mais, certaines limitations apparaissent avec les parois multicouches et pour de nouveaux types de béton de chanvre.

Par la suite, le chapitre III a contribué à combler les lacunes concernant l'étude du béton de chanvre à l'échelle du local. Trois modèles numériques (excepté le modèle complet) sont

comparés entre eux dans la prédiction des conditions intérieures de température et d'humidité relative et des consommations énergétiques de la pièce pour les deux types de ventilation, auto et hygroréglables. Les résultats ont montré que, pour une seule façade en béton de chanvre dans le local, de légers écarts entre les trois modèles sont observables. L'importance du modèle à hystérésis réside dans le fait qu'il peut tenir en compte l'évolution de l'histoire hydrique du bâtiment sur plusieurs années. En revanche, les résultats fournis par le modèle standard sont fiables et prometteurs.

Ainsi, par la suite, une étude détaillée réalisée à l'aide du modèle standard à l'échelle du local a montré que les conditions intérieures et les consommations énergétiques globales sont largement influencées par le climat extérieur, le type du béton de chanvre, le scénario d'occupation, les surfaces d'échange du béton de chanvre et son revêtement intérieur (présence des enduits ou de la peinture). A cet égard, pour le climat chaud, et afin d'éviter les risques de surchauffe en été, il faut coupler le béton de chanvre à des matériaux plus lourds qui lui ramènent de l'inertie thermique supplémentaire pour améliorer ses performances.

Le dernier chapitre s'inscrit aussi dans l'étude à l'échelle du bâtiment en réalisant le suivi d'un immeuble occupé utilisant le béton de chanvre comme isolant extérieur. L'analyse expérimentale des conditions de confort intérieur ont souligné l'importance du comportement des usagers vis-à-vis de l'appartement. L'étude paramétrique réalisée à l'échelle de la paroi a montré l'importance de la maîtrise des propriétés des matériaux de la paroi dans la modélisation. L'approche numérique menée à l'échelle du bureau pour valider les résultats a montré l'impact du scénario d'occupation de la pièce et du choix des coefficients échanges convectifs avec les parois intérieures dans la modélisation.

En résumé, le travail a réussi à élaborer des modèles numériques à hystérésis et à thermodépendance pour le béton de chanvre qui seront utilisés pour les futures recherches et investigations. Toutefois, des pistes restent à améliorer et à développer.

Le modèle complet présente des limitations à l'échelle de la paroi en présence du rayonnement solaire et à l'échelle du local. Des investigations supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir l'adapter à tous les types de conditions et ainsi étudier son effet dans la prédiction du comportement hygrothermique sous des conditions réelles de température et d'humidité.

En outre, il est inévitablement important d'étudier le comportement du béton de chanvre sous les humidités relatives élevées (qui dépassent généralement 95%) avec la prise en compte de la diffusion de la pluie dans les parois. A cet effet, une approche probabiliste (Marincioni et al., 2018) pourrait être utilisée avec ces modèles suivant les trois configurations d'isolation : béton de chanvre par l'intérieur, par l'extérieur ou bien paroi complète en béton de chanvre. Ceci permettra de prédire le développement des moisissures dans ces enveloppes et par conséquent de juger sur leur durabilité.

Il serait également intéressant d'étudier le modèle à hystérésis pour les parois multicouches en travaillant particulièrement sur les interfaces entre les différentes couches de matériaux de façon

à éviter les singularités rencontrées dans les connexions. Dans ce contexte, la modélisation de l'hystérésis suivant des approches physiques (à l'instar de celle de Mualem) pourrait être réalisée dans le but de comparer ses résultats avec ceux de l'approche empirique de Pedersen.

Par ailleurs, ce travail pourrait être complété par une étude de l'influence de l'hystérésis et de la thermodépendance à l'échelle du local en augmentant la surface d'échange du béton de chanvre.

Il serait aussi utile de pouvoir adapter les modèles développés pour tout autre type d'agro-matériaux comme les matériaux à base de betterave et du typha-australis par exemple.

Finalement, une perspective supplémentaire résiderait dans l'implémentation de ces modèles numériques dans d'autres logiciels de calcul comme Modelica et EnergyPlus vu l'orientation actuelle de la communauté scientifique vers ces nouveaux environnements de simulation.

## Références Bibliographiques

- ADEME (2013) *Les chiffres clés du bâtiment Énergie - Environnement*. Available at: <http://www.ademe.fr/sites>
- ADEME (2015) *Les Chiffres Clés 2015 Climat, Air et Energie*. Available at: <http://multimedia.ademe.fr/catalogues>
- Ait Oumeziane, Y. (2013) 'Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre', INSA Renens.
- Ait Oumeziane, Y., Moissette, S., Bart, M. and Lanos, C. (2016) 'Influence of temperature on sorption process in hemp concrete', *Construction and Building Materials*, 106, pp. 600–607.
- Amziane, S. and Arnaud, L. (2013) *Bio-aggregate-based Building Materials, Applications to Hemp Concrete*. Edited by I. L. and J. W. & S. Inc.
- Arrêté du 10 avril 2017 (2017) *Arrêté du 10 avril 2017*. Available at: <https://www.legifrance.gouv.fr>
- Arrêté du 19 Décembre 2017 (2017) *Arrêté du 19 décembre 2017 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « bâtiment biosourcé »* | Legifrance. Available at: <https://www.legifrance.gouv.fr>
- ASHRAE (2013) *ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS*. SI Edition.
- Balaji, N. C., Mani, M. and Reddy, B. V. V. (2014) 'Discerning Heat Transfer in Building Materials', *Energy Procedia*. Elsevier, 54, pp. 654–668.
- BBCA (2018) *BBCA*. Available at: <https://www.batimentbascarbonate.org/label-bbca/>.
- Van Belleghem, M., Steeman, H.-J., Steeman, M., Janssens, A. and De Paepe, M. (2010) 'Sensitivity analysis of CFD coupled non-isothermal heat and moisture modelling', *Building and Environment*, 45(11), pp. 2485–2496.
- Bennai, F., Issaadi, N., Abahri, K., Belarbi, R. and Tahakourt, A. (2017) 'Experimental characterization of thermal and hygric properties of hemp concrete with consideration of the material age evolution', *Heat and Mass Transfer*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–9.
- Bland, J. M. and Altman, D. G. (1986) 'STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING AGREEMENT BETWEEN TWO METHODS OF CLINICAL MEASUREMENT', *Lancet*, i, pp. 307–310.
- Bray, W. H. and Sellevold, E. J. (1973) 'Water sorption properties of hardened cement paste cured or stored at elevated temperatures', *Cement and Concrete Research*. Pergamon, 3(6), pp. 723–728.
- Brue, F. (2009) *Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydromécanique des bétons*. Ecole Centrale de Lille, France.
- Brun, A., Spitz, C., Wurtz, E. and Mora, L. (2009) 'Behavioural Comparison of Some Predictive Tools Used in a Low-Energy Building', in *Eleventh International IBPSA Conference*, pp. 1185–1190.
- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E. and Teller, E. (1940) 'On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases', *Journal of the American Chemical Society*. American Chemical Society, 62(7), pp. 1723–1732.

- Burch, D. M. and Thomas, W. C. (1991) *An analysis of moisture accumulation in a wood frame wall subjected to winter climate*. Gaithersburg.
- Carmeliet, J., De Wit, M. H. D. and Janssen, H. (2005) ‘Hysteresis and moisture buffering of wood’, in *Proceedings of the Nordic Symposium on Building Physics*. Reykjavik, Iceland, pp. 55–62.
- Carus, M. (2017) ‘The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs, seeds and flowers’. Available at: <http://eiha.org/media>
- Cerezo, V. (2005) *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d’un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l’Etat.
- CIBSE (2006) *Environmental Design, Chartered Institution of Building Services Engineers*. London.
- CITEPA (2015) *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Séries sectorielles et analyses étendues*. Paris. Available at: [www.citepa.org/activites/inventaires-des-emissions/secten](http://www.citepa.org/activites/inventaires-des-emissions/secten)
- Clyne, T. W., Golosnoy, I. O., Tan, J. C. and Markaki, A. E. (2006) ‘Porous materials for thermal management under extreme conditions.’, *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*. The Royal Society, 364(1838), pp. 125–46.
- Colinart, T. and Glouannec, P. (2017) ‘Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 1: Experimental evidence and modeling’, *Energy and Buildings*, 139, pp. 360–370.
- Colinart, T., Glouannec, P., Bendouma, M. and Chauvelon, P. (2017) ‘Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 2: Influence on hygrothermal behavior of hemp concrete’, *Energy and Buildings*, 152, pp. 42–51.
- Colinart, T., Glouannec, P., Pierre, T., Chauvelon, P. and Magueresse, A. (2013) ‘Experimental Study on the Hygrothermal Behavior of a Coated Sprayed Hemp Concrete Wall’, *Buildings*, 3, pp. 79–99.
- Colinart, T., Lelievre, D. and Glouannec, P. (2016) ‘Experimental and numerical analysis of the transient hygrothermal behavior of multilayered hemp concrete wall’, *Energy and Buildings*, 112, pp. 1–11.
- Collet, F.; Prétot, S.; Lanos, C. (2013) ‘Performance hydrique de bétons de chanvre : effet de l’enduit sur leur capacité de régulateurs hydriques’, in *Actes des 31èmes Rencontres de l’AUGC, E.N.S. cachan*.
- Collet, F.; Prétot, S. (2012) ‘Variation de la capacité hydrique tampon de bétons de chanvre en fonction de la formulation.’, in *Actes du 1er Congrès écobat Sciences & Techniques, écobat Sciences & Techniques*. paris, p. p.140-148.
- Collet, F. (2004) *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*. Institut National des Sciences Appliquées de Rennes.
- Collet, F., Bart, M., Serres, L. and Miriel, J. (2008) ‘Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials’, *Construction and Building Materials*, 22(6), pp. 1271–1280.
- Collet, F., Chamoin, J., Prétot, S. and Lanos, C. (2013) ‘Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes’, *Energy and Buildings*, 62, pp. 294–303.

- Collet, F. and Pretot, S. (2014a) 'Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall', *Building and Environment*, 82, pp. 459–466.
- Collet, F. and Pretot, S. (2014b) 'Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content', *Construction and Building Materials*, 65, pp. 612–619.
- Collet, F., Prétot, S. and Lanos, C. (2011) 'Etude expérimentale du comportement hygrothermique d'une paroi en blocs de béton de chanvre avec ossature en bois', in *29ème rencontres universitaires de génie civil*, p. p.258-267.
- Costantine, G., Maalouf, C., Kinab, E. and Polidori, G. (2016) 'Numerical study of a hemp concrete wall', in *Advanced Buildings Skins ABS*. Bern, Switzerland.
- Costantine, G., Maalouf, C., Kinab, E. and Polidori, G. (2017) 'Numerical Investigation of the Hygrothermal Behaviour of a Hemp-Concrete Room: Hysteresis Effect of the Sorption Isotherm and its Temperature Dependency', in *Building Simulation*. San Francisco, United States.
- Costantine, G., Maalouf, C., Moussa, T. and Polidori, G. (2018) 'Experimental and numerical investigations of thermal performance of a Hemp Lime external building insulation', *Building and Environment*. Pergamon, 131, pp. 140–153.
- Crausse, P. (1983) *Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux non saturé*. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Crausse, P., Laurent, J. . and Perrin, B. (1996) 'Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux: Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrique de parois de bâtiment', *Revue Générale de Thermique*. Elsevier Masson, 35(410), pp. 95–106. d
- CREE, A. (2015) 'Architectures CREE', n°373, p. 164.
- Daian, J.-F. (1986) *Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau meso et macroporeux : étude expérimentale du mortier de ciment*. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Darcy, H. (1856) *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application ... - Henry Darcy - Google Livres*. Edited by V. Dalmont. Paris.
- Décret n° 2016-1821 (2016) *Décret n° 2016-1821*. Available at: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2016>
- Delgado, J. M. P. Q., Ramos, N. M. M., Barreira, E. and de Freitas, V. P. (2010) 'A CRITICAL REVIEW OF HYGROTHERMAL MODELS USED IN POROUS BUILDING MATERIALS', *Journal of Porous Media*. Begel House Inc., 13(3), pp. 221–234.
- Derluyn, H., Derome, D., Carmeliet, J., Stora, E. and Barbarulo, R. (2012) 'Hysteretic moisture behavior of concrete: Modeling and analysis', *Cement and Concrete Research*. Pergamon, 42(10), pp. 1379–1388.
- Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M. and Richman, R. (2017) 'Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings'.
- DREAL (2015) *Etude sur la faisabilité d'une structuration de la filière chanvre - construction en Pays de la Loire*. Available at: <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr>
- Drouet, E. (2010) *Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires -*

*prise en compte des transferts hydriques*. ENS Cachan, France.

Dubois, S. (2014) *Modelling the hygrothermal behaviour of crop-based construction materials*. UNIVERSITÉ DE LIÈGE - GEMBOUX AGRO-BIO TECH.

Dubois, S., Arnaud, E., Christophe, B. and Frédéric, L. (2016) ‘Temperature and moisture storage in crop-based materials: Modelling a straw bale wall subject to a thermal shock’, *Journal of Building Physics*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 39(5), pp. 421–439.

Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y. and Goudet, L. (2008) ‘Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hemcrete”) manufactured by a projection process’, *Construction and Building Materials*, 22(10), pp. 2116–2123.

European Commission, E. (2016) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, the Committee of the regions and the European Investment Bank*. Brussels. Available at: <http://eur-lex.europa.eu>

Evrard, Arnaud; De Herde, A. (2005) ‘BIOCLIMATIC ENVELOPES MADE OF LIME AND HEMP CONCRETE’, in *CISBAT*. Lausanne, Suisse, pp. 25–30.

Evrard, A. (2008) *Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials*. Polytechnical School of Louvain.

Evrard, A. and De Herde, A. A. (2010) ‘Hygrothermal Performance of Lime–Hemp Wall Assemblies’, *Journal of Building Physics*, 34(1), p. p.5-25.

Fabbri, A. and McGregor, F. (2017) ‘Impact of the determination of the sorption-desorption curves on the prediction of the hemp concrete hygrothermal behaviour’, *Construction and Building Materials*, 157, pp. 108–116.

Fick, A. (1855) ‘Ueber Diffusion’, *Annalen der Physik und Chemie*. Wiley-Blackwell, 170(1), pp. 59–86.

FRD (2016) *Les enjeux de la valorisation de la biomasse non sylvicole en matériaux biosourcés*.

Ghasemzadeh, hasan (2006) *COUPLAGES DANS LES GEOMATERIAUX MULTIPHASIQUES EFFETS DE LA TEMPERATURE ET DE LA CHIMIE*. ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES.

Gourlay, E. (2017) *Les matériaux bio-sourcés dans la construction: De la connaissance des matériaux à leur application in situ*. Strasbourg.

Gourlay, E., Glé, P., Marceau, S., Foy, C. and Moscardelli, S. (2017) ‘Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes’, *Construction and Building Materials*, 139, pp. 513–523.

Grenelle 1 Environnement, 2015 (2010) *Le Grenelle 1 Environnement*. Available at: <http://www.side.developpement-durable.gouv.fr>

Hansen, K. K. (1986) *Sorption Isotherms. A Catalogue*. Copenhagen.

Hustache, Y. (2008) *Synthèses des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre*. Available at: [http://www.vegetal-e.com/fichiers/synthese-beton-chanvre-2008\\_1450942013.pdf](http://www.vegetal-e.com/fichiers/synthese-beton-chanvre-2008_1450942013.pdf) (Accessed: 24 April 2018).

- Ined (2017) 'Population & Sociétés', *Institut national d'études démographiques*, September, p. n° 547. Available at: <https://www.ined.fr>
- IUPAC (1985) 'Reporting physisorption data for gas/solid systems — with special reference to the determination of surface area and porosity', *Pur and applied chemistry*, Vol. 57(No. 4), p. 603—619.
- Kaviany, M. (1991) *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. Springer US.
- Kazkaz, M. and Pavelek, M. (2013) 'OPERATIVE TEMPERATURE AND GLOBE TEMPERATURE', *Engineering MECHANICS*, 204(3), pp. 319–325.
- Kerestecioglu A. and Gu L. (1989) *Incorporation of the effective penetration depth theory into TRNSYS*. Draft Report, Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral, FL.
- Kießl, K. (1983) *Kapillarer und dampfformiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen*, *PhD-thesis, Universität und Gesamthochschule Essen*. Universität und Gesamthochschule Essen.
- Kool, J. B. and Parker, J. C. (1987) 'Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties', *Water Resources Research*, 23(1), pp. 105–114.
- Künzel Hartwig, M. (1995) *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One and two dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart. doi: ISBN v.3-8167-4103-7.
- Kwiatkowski, J., Woloszyn, M. and Roux, J.-J. (2009) 'Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials', *Building and Environment*, 44(3), pp. 633–642.
- Le, A. D. T., Samri, D., Rahim, M., Douzane, O., Promis, G. and Langlet, T. (2015) 'Effect of Temperature-dependent Sorption Characteristics on The Hygrothermal Behavior of Hemp Concrete', *Energy Procedia*. Elsevier, 78, pp. 1449–1454.
- Lebert, A., Lasvaux, S., Grannec, F., Nibel, S., Achim, F. and Jacques, C. (2013) *Capitalisation des résultats de l'expérimentation HQE Performance. Analyse statistique Action 22 Rapport Final*.
- Lelievre, D. (2015) *Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés*. Université Bretagne-Sud.
- Lelievre, D., Colinart, T. and Glouanec, P. (2014) 'Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses', *Energy and Buildings*, 84, pp. 617–627.
- Leon, C. A. and Uantachrome, L. (1998) 'New perspectives in mercury porosimetry', *Advances in Colloid and Interface Science*, pp. 341–372.
- LTECV (2015) *LOI n° 2015-992*. Available at: <https://www.legifrance.gouv.fr>
- Luikov, A. V. (1966) 'Application of irreversible thermodynamics methods to investigation of heat and mass transfer', *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Pergamon, 9(2), pp. 139–152.
- Maalouf, C., Tran Le, A. D., Lachi, M. and Mai, T. H. (2011) 'Effect of moisture transfer on thermal inertia in simple layer walls: case of a vegetal fibre material', *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 5(1), pp. 33–47.

- Maalouf, C., Tran Le, A. D., Umurigirwa, S. B., Lachi, M. and Douzane, O. (2014) ‘Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France’, *Energy and Buildings*, 77, pp. 48–57.
- Mémento (2016) *Panorama Des Marchés &quot;Fibres Végétales Techniques Matériaux (Hors Bois)&quot;*; Troyes. Available at: <http://www.agrobiobase.com>
- Mendes, N. (1997) *Models for prediction of heat and moisture transfer through porous building element*,. Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, SC, Brésil.
- Mendes, N., Ridley, I., Philippi, P. C. and Budag, K. (1999) ‘Umidus: a PC Program For The Prediction Of Heat And Mass Transfer In Porous Building Elements’, in. Kyoto: International Conference on Building Performance Simulation (IPBSA 1999).
- Mendonça, K. C. (2004) *Modélisation thermo-aéraulique des locaux climatisés selon l’approche zonale*. Université de la Rochelle.
- Merakeb, S., Dubois, F. and Petit, C. (2009a) ‘Modeling of the sorption hysteresis for wood’, *Wood Science and Technology*, 43(7–8), pp. 575–589.
- Merakeb, S., Dubois, F. and Petit, C. (2009b) ‘Modélisation des hystérésis de sorption dans les matériaux hygroscopiques’, *Comptes Rendus Mécanique*, 337(1), pp. 34–39.
- Milly, P. C. D. (1982) ‘Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matrix head-based formulation and a numerical model’, *Water Resources Research*, 18(3), pp. 489–498.
- Min, H., Zhang, W., Gu, X. and Ern, R. Č. (2017) ‘Coupled heat and moisture transport in damaged concrete under an atmospheric environment’.
- Mora, L. (2003) *Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d’un environnement orienté objet*. Université de la Rochelle.
- Moujalled, B., Aït Ouméziane, Y., Moissette, S., Bart, M., Lanos, C. and Samri, D. (2018) ‘Experimental and numerical evaluation of the hygrothermal performance of a hemp lime concrete building: A long term case study’, *Building and Environment*. Pergamon, 136, pp. 11–27.
- Moujalled, B., Ouméziane, Y. A., Samri, D., Stephan, E., Moissette, S., Bart, M. and Lanos, C. (2015) ‘EXPERIMENTAL AND NUMERICAL EVALUATION OF THE HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF A HEMP-LIME BUILDING’.
- Mualem, Y. (1974) ‘A conceptual model of hysteresis’, *Water Resources Research*, 10(3), pp. 514–520.
- Naono, H. and Hakuman, M. (1993) ‘Analysis of Porous Texture by Means of Water Vapor Adsorption Isotherm with Particular Attention to Lower Limit of Hysteresis Loop’, *Journal of Colloid and Interface Science*. Academic Press, 158(1), pp. 19–26.
- Noël, J. and Roux, J.-J. (2004) ‘CoDyBa -Manuel Utilisateur CoDyBA Manuel Utilisateur Nouveautés de la version 6.4 de CoDyBa’.
- Norme NF P 01-010 (2011) ‘DECLARATION ENVIRONNEMENTALE et SANITAIRE CONFORME A LA NORME NF P 01-010’, (2). Available at: <http://www.base-inies.fr>
- Olesen, B. W. (2004) ‘International standards for the indoor environment’, *Indoor Air*.

Munksgaard International Publishers, 14(s7), pp. 18–26.

OMM (2015) *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2015*. Genève.

OMM (2016) *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2016*. Genève.

Ouméziane, Y. A., Moissette, S., Bart, M. and Lanos, C. (2012) 'Effect of coating on the hygric performance of a hemp concrete wall', pp. 109–116.

Ozaki, A., Watanabe, T., Hayashi, T. and Ryu, Y. (2001) 'Systematic analysis on combined heat and water transfer through porous materials based on thermodynamic energy', *Energy and Buildings*, 33(4), pp. 341–350

Paquet Climat-Energie (2008) *Conseil Européen*. Bruxelles. Available at: [http://www.consilium.europa.eu/ueDocs/cms\\_Data/docs/pressData/fr/ec/104669.pdf](http://www.consilium.europa.eu/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/fr/ec/104669.pdf)

Pedersen, C. R. (1990) 'Transient calculation on moisture migration using a simplified description of hysteresis in the sorption isotherms', *Proceedings of the 2nd symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, (Technical University of Norway, Trondheim, Norway.).

Peeters, L., Beusoleil-Morrison, I. and Novoselac, A. (2011) 'Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations', *Energy and Buildings*, 43(9), pp. 2227–2239.

Perier-Muzet, M., Sid, B., Béjat, T., Woloszyn, M., Kêdowidé, Y.-A., Buhé, C. and Wurtz, E. (2015) 'EVALUATION OF THE CONTRIBUTION OF HIGHLY HYGROSCOPIC AND VAPOUR PERMEABLE WALLS TO WHOLE BUILDING PERFORMANCE'.

Philip, J. R. and De Vries, D. A. (1957) 'Moisture movement in porous materials under temperature gradients', *Transactions, American Geophysical Union*, 38(2), p. 222.

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

Piot, A., Béjat, T., Jay, A., Bessette, L., Wurtz, E. and Barnes-Davin, L. (2017) 'Study of a hempcrete wall exposed to outdoor climate: Effects of the coating', *Construction and Building Materials*, 139(139), pp. 540–550. d

Poyet, S. (2009) 'Experimental investigation of the effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete', *Cement and Concrete Research*. Pergamon, 39(11), pp. 1052–1059.

Poyet, S. and Charles, S. (2009) 'Temperature dependence of the sorption isotherms of cement-based materials: Heat of sorption and Clausius–Clapeyron formula', *Cement and Concrete Research*, 39(11), pp. 1060–1067.

Pretot, S., Collet, F. and Garnier, C. (2014) 'Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating'.

Radjy, F. and Richards, C. W. (1973) 'Effect of curing and heat treatment history on the dynamic mechanical response and the pore structure of hardened cement paste', *Cement and Concrete Research*. Pergamon, 3(1), pp. 7–21.

Radjy, F., Sellevold, E. J. and Hansen, K. K. (2003) 'Isosteric Vapor Pressure – Temperature Data for Water Sorption in Hardened Cement Paste: Enthalpy, Entropy and Sorption Isotherms at Different Temperatures'. Technical University of Denmark, Department of Civil

Engineering.

Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A. D., Promis, G. and Langlet, T. (2017) 'Experimental investigation of hygrothermal behavior of two bio-based building envelopes', *Energy and Buildings*. Elsevier, 139, pp. 608–615.

RBR 2020-2050 (2015) *PLAN BATIMENT DURABLE Groupe de travail Réflexion Bâtiment Responsable 2020- 2050 (RBR 2020-2050)*. Available at: <http://www.planbatimentdurable.fr>

Remki, B., Abahri, K., Tahlaiti, M. and Belarbi, R. (2012) 'Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient', *International Journal of Thermal Sciences*. Elsevier Masson, 57, pp. 135–141.

Rode, C. and Clorius, C. O. (2004) 'Modeling of Moisture Transport in Wood with Hysteresis and Temperature-Dependent Sorption Characteristics', in ASHRAE (ed.) *ASHREA*. Florida.

Rode, C. and Grau, K. (2008) 'Moisture Buffering and its Consequence in Whole Building Hygrothermal Modeling', *Journal of BUILDING PHYSICS*, 31(4—April). doi: 10.1177/1744259108088960.

Rollins, R. L. (1954) 'Movement of soil moisture under a thermal gradient'. Available at: <http://lib.dr.iastate.edu/rtd>

RP2C (2007) *Règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre*.

RT (2012) *La RT2012 : un saut énergétique pour les bâtiments neufs - Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer*. Available at: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-RT2012-un-saut-energetique-pour.html>

Samri, D. (2008) 'Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction'.

Sharples, S. (1984) 'Full-scale measurements of convective energy losses from exterior building surfaces', *Building and Environment*, 19(1), pp. 31–39.

Shea, A., Lawrence, M. and Walker, P. (2012) 'Hygrothermal performance of an experimental hemp–lime building', *Construction and Building Materials*, 36, pp. 270–275.

SOeS (2015) *Bilan Energétique de la France 2014*.

SOeS (2017) *Chiffres clés de l'énergie - Édition 2016*. Available at: [http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/user\\_upload/Datalab-13-CC-de\\_l-energie-edition-2016-fevrier2017.pdf](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/user_upload/Datalab-13-CC-de_l-energie-edition-2016-fevrier2017.pdf)

Sophocleous, M. (1979) 'Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media', *Water Resources Research*. Wiley-Blackwell, 15(5), pp. 1195–1206.

Soudani, L., Fabbri, A., McGregor, F. and Morel, J.-C. (2017) 'Laboratory investigation of hygrothermal monitoring of hemp-concrete walls', *RILEM Technical Letters*, 2, p. 20.

Sowell, E. F. and Haves, P. (2001) 'Efficient solution strategies for building energy system simulation', *Building Physics*, 33, pp. 309–317.

Steeman, H.-J. (2009) 'Modelling local hygrothermal interaction between airflow and porous materials for building applications'.

Sutton, A., Black, D. and Walker, P. (2011) 'HEMP LIME: An introduction to low-impact building materials', *BRE publications*.

- Swinbank, W. C. (1963) 'Long-wave radiation from clear skies', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. John Wiley & Sons, Ltd, 89(381), pp. 339–348.
- TCHANG Nathalie (2016) 'L'expérimentation «Energie-Carbone» ou le label E+C-', *Journal de l'O.*
- Tradical (2017) *la chaux performance 4 Exemples de Réalisations*. Available at: [www.bcb-tradical.com](http://www.bcb-tradical.com)
- Tran Le, A. D. (2010) *Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment*. Université de Reims-Champagne-Ardenne.
- Tran Le, A. D., Maalouf, C., Mai, T. H., Wurtz, E. and Collet, F. (2010) 'Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope', *Energy and Buildings*, 42(10), pp. 1797–1806.
- De Vries, D. . (1958) 'Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media', *TRANSACTIONS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION* , 39(5).
- Wakao, N. and Smith, J. M. (1962) 'Diffusion in catalyst pellets DIFFUSION IN CATALYST PELLETS', *Chemical Engineering Science*. Pergamon Press Ltd, 17, pp. 825–834
- Walker, R. and Pavia, S. (2014) 'Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes', *Construction and Building Materials*. Elsevier, 64, pp. 270–276.
- Wolkoff, P. (2018) 'Indoor air humidity, air quality, and health – An overview', *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(3), pp. 376–390..
- Y. Ait Ouméziane (2013) *Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre*. INSA de Rennes.
- Zhang, Z. (2014a) 'Modelling of sorption hysteresis and its effect on moisture transport within cementitious materials'. Université Paris-Est.
- Zhang, Z. (2014b) *Modelling of sorption hysteresis and its effect on moisture transport within cementitious materials*. Université Paris-Est.
- Zhang, Z., Thiery, M. and Baroghel-Bouny, V. (2015) 'Numerical modelling of moisture transfers with hysteresis within cementitious materials: Verification and investigation of the effects of repeated wetting–drying boundary conditions', *Cement and Concrete Research*. Pergamon, 68, pp. 10–23.

## Annexe 1

### Thermodépendance des isothermes de sorption

Le calcul de l'isotherme moyenne de sorption à la température de 30°C à partir de celle de 23°C est détaillé ci-après.

$$\varphi_2(T_2, \theta) = \varphi_1(T_1, \theta) \frac{P_{\text{sat}}(T_1)}{P_{\text{sat}}(T_2)} e^{q_{\text{st}}(\theta) \frac{M_1}{R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)}$$

A l'aide de l'équation de Clausius-Clapeyron ci-dessus, et pour une teneur en eau et une chaleur isostérique données à la température de référence (23°C), l'humidité relative HR<sub>2</sub> à la deuxième température (par exemple 30°C) est calculée (Tableau 1). La teneur en eau et la chaleur isostérique de sorption sont données expérimentalement par (Lelievre et al. 2014) et (Ait Oumeziane 2013). On continue de la même manière de façon à couvrir toute la plage de l'humidité relative donnée à la température de référence.

HR <sub>23°C</sub> × 100 (%)	u <sub>23°C</sub> (kg. kg <sup>-1</sup> )	Q <sub>stérique</sub> (× 10 <sup>6</sup> ) (MJ.kg <sup>-1</sup> )	HR <sub>30°C</sub> × 100 (%)
0,0001	0,0131	4,0657	0,00013
0,2302	0,0409	2,9984	0,2553
0,4302	0,0569	2,8466	0,4650
0,5907	0,0690	2,7622	0,6294
0,7512	0,0842	2,7120	0,7937
0,8512	0,1075	2,6449	0,8892

Tableau 1 : Isotherme de sorption à 30°C

Ainsi, on aura les teneurs en eau à ces nouvelles humidités relatives calculées. Ensuite, on applique la corrélation du modèle de Merakeb donnée ci-après avec des valeurs arbitraires de a et b en fixant u<sub>s</sub> à 0,18 kg. kg<sup>-1</sup>.

$$\ln\left(\frac{u}{u_s}\right) = a \times \ln(\varphi) \times \exp(b\varphi)$$

A l'aide du solveur d'Excel, les valeurs de a et b sont recalées par la méthode des moindres carrées (Tableau 2) de manière à avoir la somme  $\sum(u - u_{\text{modèle}})^2$  minimale. Les valeurs de a et b retenues pour la température de 30°C sont alors 0,6117 et 2,0354 respectivement.

HR <sub>30°C</sub> × 100 (%)	u <sub>30°C</sub> (kg. kg <sup>-1</sup> )	u <sub>modèle</sub> (kg. kg <sup>-1</sup> )	(u - u <sub>modèle</sub> ) <sup>2</sup>
0,00013	0,0131	0,00076	1,5254×10 <sup>-4</sup>
0,2553	0,0409	0,0442	1,0772×10 <sup>-5</sup>
0,4650	0,0569	0,0538	9,4328×10 <sup>-6</sup>
0,6294	0,0690	0,0649	1,6436×10 <sup>-5</sup>
0,7937	0,0842	0,0884	1,7676×10 <sup>-5</sup>
0,8892	0,1075	0,1160	7,2317×10 <sup>-5</sup>

Tableau 2 : Méthode des moindres carrés

La même procédure est répétée pour les températures de 10°C et 15°C. On aura, en fin de compte, les valeurs de a et b suivantes :

<b>T</b> (°C)	<b>a</b>	<b>b</b>
<b>5</b>	0,6435	1,5888
<b>15</b>	0,6315	1,7677
<b>23</b>	0,6150	1,9150
<b>30</b>	0,6117	2,0354

Tableau 3 : Calage des coefficients a et b

Ainsi, deux corrélations en fonction de la température peuvent être déduites pour les coefficients a et b :

$$a = 6,3 \times 10^{-5} T^3 - 3,198 \times 10^{-4} T^2 + 3,1607 \times 10^{-3} T + 0,634844$$

$$b = -5,0 \times 10^{-6} T^3 + 2,474 \times 10^{-4} T^2 + 1,4545 \times 10^{-2} T + 1,510593$$

Ces corrélations sont implémentées dans l'équation de l'isotherme ainsi que celle de la pente de la courbe de sorption nécessaire dans le calcul des coefficients de diffusion. La nouvelle classe atomique ajoutée calcule la dérivée de l'équation de la courbe de sorption par rapport à la température et sera utilisée dans le calcul du coefficient de transport de vapeur sous gradient de la teneur en eau.

Pour le modèle complet, de nouveaux coefficients relatifs à la courbe d'adsorption et de désorption sont calculés.

En ce qui concerne l'approche de Rode, les mêmes démarches sont appliquées mais avec le modèle de l'isotherme de sorption donné par :

$$\frac{u}{u_s} = \left(1 - \frac{\ln \phi}{A}\right)^{-\frac{1}{n}}$$

Pour des raisons de simplicité et facilité d'implémentation, le coefficient n est fixé à 1,669842. Dans ce cas, les corrélations obtenues pour A et  $u_s$  sont données par :

$$A = 2,18295 \times 10^{-3} T + 0,13375797$$

$$u_s = -8,7373 \times 10^{-4} T + 0,08923822$$

## Annexe 2

### Approche de Merakeb à l'échelle du local

L'approche de Merakeb est appliquée à l'échelle du local uniquement pour le modèle standard Mod\_1 et le modèle à thermodépendance Mod\_3, car des singularités apparaissent dans le modèle à hystérésis Mod\_2.

Les deux stratégies de ventilation sont examinées et les résultats sont présentés pour deux périodes, de 10 jours chacune (début mars et début juillet).

#### 1) Ventilation autoréglable

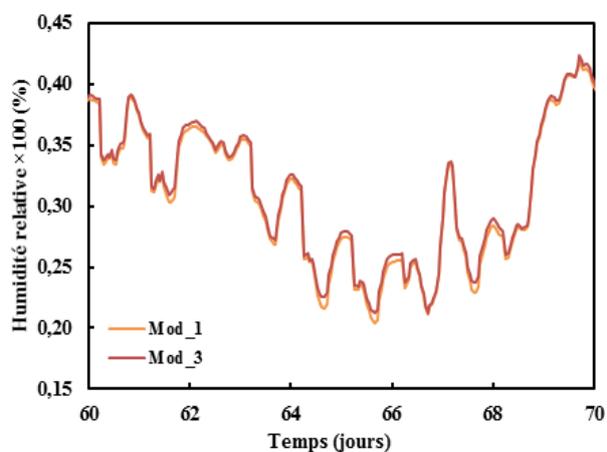


Figure 1 : Comparaison des humidités relatives intérieures en hiver (10 jours en mars)

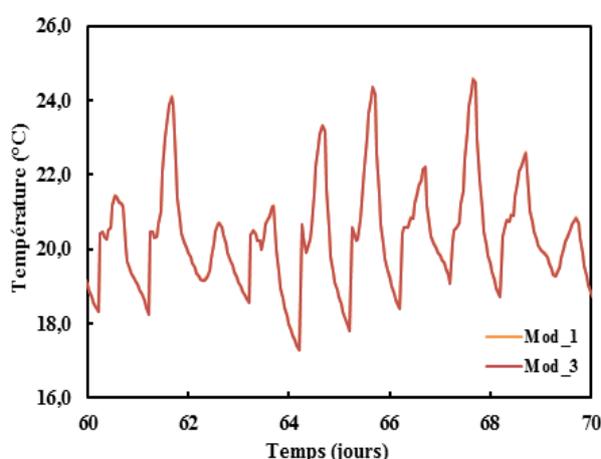


Figure 2 : Comparaison des températures intérieures en hiver (10 jours en mars)

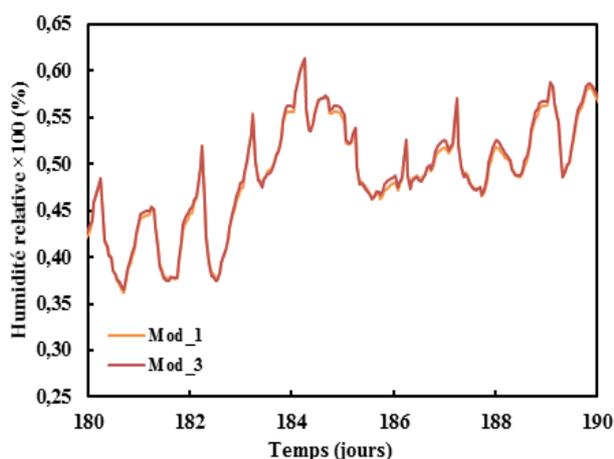


Figure 3 : Comparaison des humidités relatives intérieures en été (10 jours en juillet)

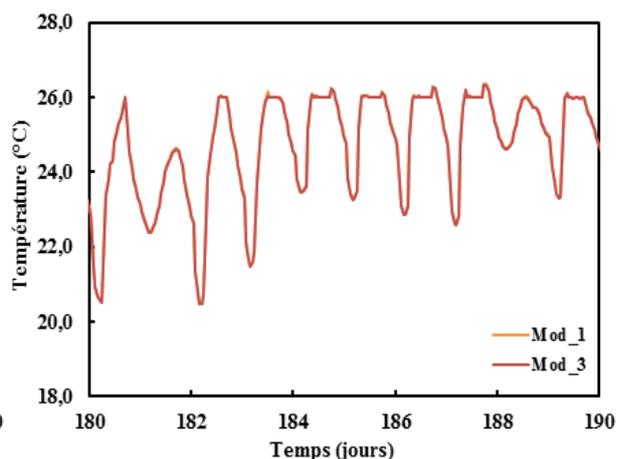


Figure 4 : Comparaison des températures intérieures en été (10 jours en juillet)

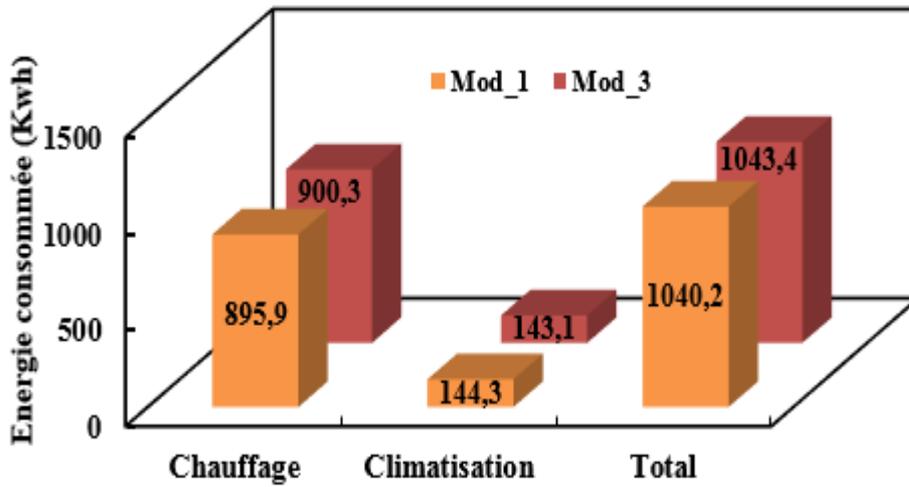


Figure 5 : Comparaison des consommations énergétiques

2) Ventilation hygroréglable

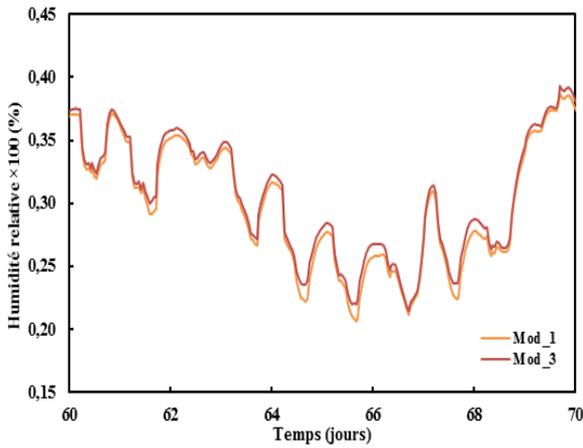


Figure 6 : Comparaison des humidités relatives intérieures en hiver (10 jours en mars)

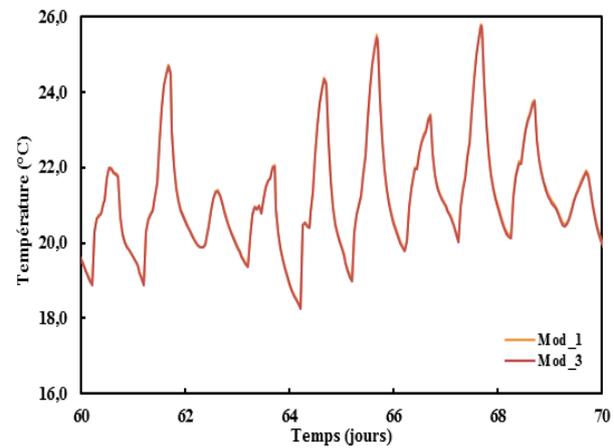


Figure 7 : Comparaison des températures intérieures en hiver (10 jours en mars)

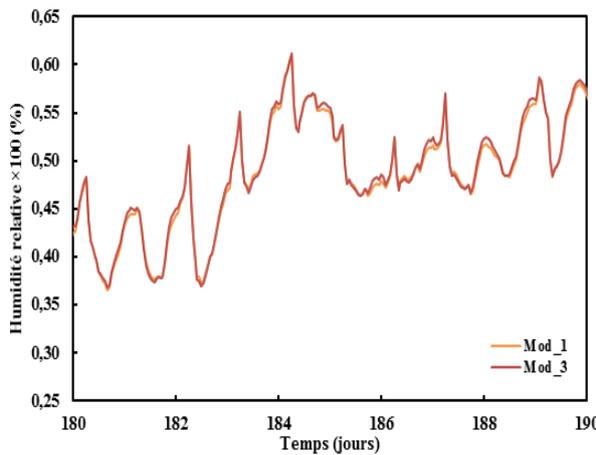


Figure 8 : Comparaison des humidités relatives intérieures en été (10 jours en juillet)

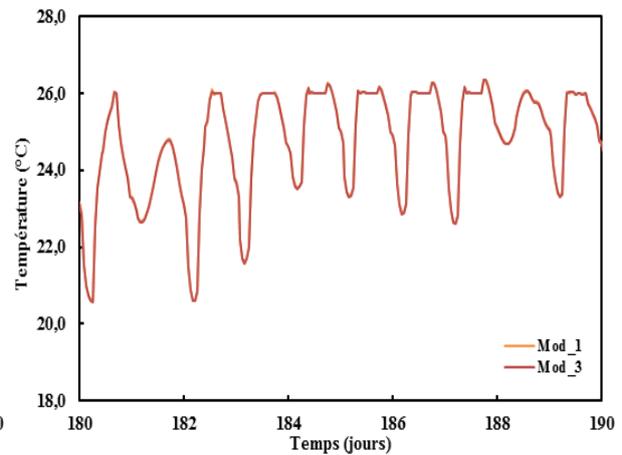


Figure 9 : Comparaison des températures intérieures en été (10 jours en juillet)

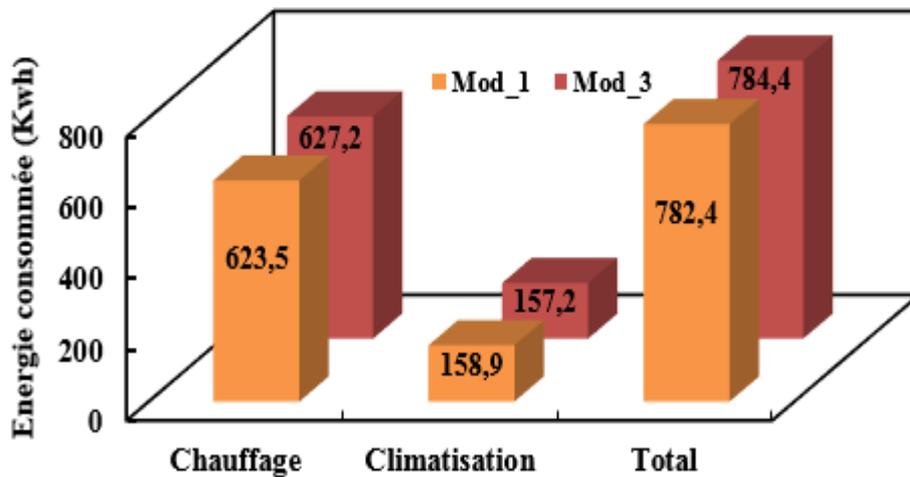


Figure 10 : Comparaison des consommations énergétiques

Des constats identiques à ceux de l'approche de Rode sont trouvés avec l'approche de Merakeb concernant les tendances entre Mod\_1 et Mod\_3 pour les températures et humidités relatives intérieures et les consommations énergétiques du local.

A noter que bien que les besoins en chauffage soient du même ordre de grandeur entre Merakeb et Rode (réduction de l'ordre de 0,8% à 1% avec Rode), les demandes en climatisation ont chuté de l'ordre de 7% en passant à l'approche de Rode. Pour essayer de comprendre cet écart, une comparaison des courbes de sorption moyenne de Merakeb et Rode est montrée dans la Figure 11. En effet, l'isotherme de sorption de Merakeb est légèrement plus élevée que celle de Rode surtout entre 20% et 55%, la plage d'humidité relative la plus récurrente dans une pièce, ce qui fait que l'adsorption est plus prononcée dans le cas de Merakeb. Une adsorption exothermique plus favorisée dans ce cas implique une diminution des besoins de chauffage en hiver et une augmentation des charges de climatisations en été.

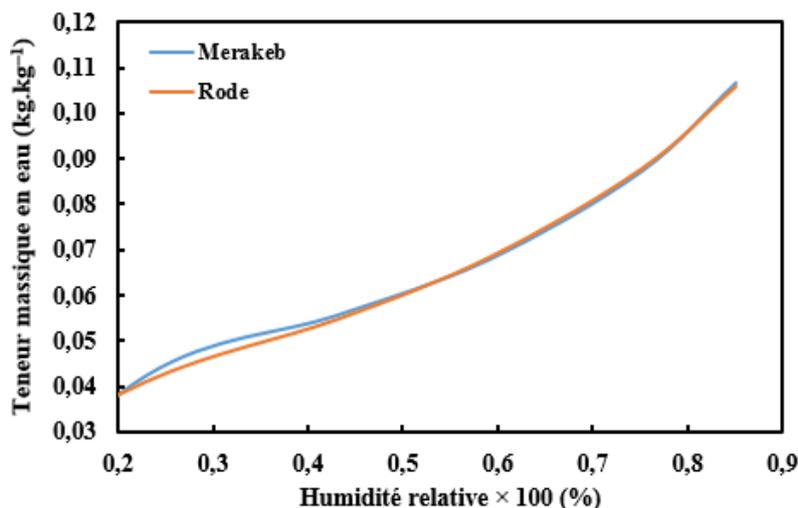


Figure 11 : Comparaison des courbes moyennes de sorption entre Merakeb et Rode

---

# Etude et optimisation des performances énergétiques d'une enveloppe en béton de chanvre pour le bâtiment

---

Face aux normes et réglementations thermiques actuelles devenues de plus en plus sévères, l'orientation des pouvoirs publics vers l'emploi de matériaux bio-sourcés, en particulier à base végétale, fait partie des solutions explorées afin de continuer à construire de façon écologique et de réduire la facture énergétique issue du secteur du bâtiment. Les deux dernières décennies ont témoigné l'intérêt de plusieurs types de matériaux biosourcés, utilisés comme isolants thermiques, tel le béton de chanvre. Promouvoir le béton de chanvre dans la construction neuve et dans la restauration des bâtiments existants nécessite en premier lieu une caractérisation complète de ses propriétés intrinsèques et une validation de son comportement hygrothermique à l'échelle de la composante ou de la paroi voire du bâtiment. Bien que nombreuses études aient réussi à documenter ses propriétés physiques, mécaniques, thermiques, hydriques et acoustiques, son comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi et du bâtiment est cependant toujours en cours d'investigations. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de cette thèse. Dans une première partie, l'étude est consacrée aux parois simples et multicouches en béton de chanvre : plusieurs modèles numériques traitant des aspects physiques relatifs au béton de chanvre sont élaborés dans le but d'appréhender leur impact sur la prédiction des évolutions des températures et humidités relatives dans les parois en question. Ces phénomènes physiques tiennent compte de l'hystérésis du béton de chanvre et de la thermodépendance de ses isothermes de sorption. Les résultats de ces modèles sont comparés entre eux et à ceux de la littérature en vue d'une optimisation de ces parois. Dans la seconde partie, l'étude porte sur un local fictif dont la paroi Sud est en béton de chanvre, en s'intéressant aux paramètres influant ses conditions de confort intérieur et ses consommations énergétiques de chauffage et de climatisation. L'étude est enfin clôturée par le dernier chapitre qui traite du suivi d'un bâtiment existant utilisant le béton de chanvre comme isolant extérieur. Une comparaison entre une approche expérimentale réalisée au sein d'un appartement de ce bâtiment et une autre numérique aux échelles de la paroi et d'une pièce de l'appartement permet de valider les résultats numériques. L'outil de simulation SPARK sert de logiciel de calcul pour l'ensemble du travail.

---

Mots clés : Béton de chanvre, hystérésis, thermodépendance, modélisation numérique, étude expérimentale, transferts hygrothermiques

---

## Study and optimization of energy performance of a hemp concrete building envelope

---

Thermal standards and regulations have become increasingly stringent nowadays. Therefore, trend towards plant-based materials, commonly known as « green materials », is considered as one of the innovative solutions providing ecologic constructions and reducing energy costs derived from building sector. The last two decades have witnessed several bio-based materials use in buildings thermal insulation, such as hemp concrete. Promoting hemp concrete in new construction and in existing buildings restoration requires in the first place a complete characterization of its intrinsic properties and a validation of its hygrothermal behavior at both wall and building scales. Numerous studies have successfully documented its physical, mechanical, thermal, hydric and acoustic properties. Otherwise, its hygrothermal behavior at wall and building scales is still undergoing notable investigations. Therefore, in the thesis first part, the study is devoted to study single and multilayers hemp concrete walls. Several numerical models dealing with physical hemp concrete aspects are developed in the aim of apprehending their impact on the prediction of temperature and relative humidity evolutions in studied walls. These physical phenomena include hemp concrete hysteresis and thermal dependence of its sorption isotherms. Results of these models are compared together and to those found in literature in order to optimize studied envelopes. In the second part, the study deals with a virtual hemp concrete room having a southern hemp concrete façade. Several parameters influencing its indoor comfort conditions and its energy consumption for heating and cooling are tested. The study concludes with a final chapter dealing with the monitoring of an existing building using hemp concrete as external insulator. It shows a comparison between an experimental approach carried out within an apartment of this building and another numerical at both wall and room scales to validate numerical results. SPARK simulation tool is used in the modelling.

---

Keywords: Hemp concrete, hysteresis, thermal dependency, numerical modelling, experimental study, hygrothermal transfers

---

**Discipline : GENIE CIVIL**

**Spécialité : Sciences de l'ingénieur**



Université de Reims Champagne-Ardenne  
GRESPI - EA 4694  
Groupe de Recherches en Sciences pour l'ingénieur  
Campus Moulin de la Housse, 51 687 Reims