



Systèmes d'isolation thermique par l'extérieur : études expérimentales et numériques des transferts de chaleur et d'humidité

Mathieu Bendouma

► To cite this version:

Mathieu Bendouma. Systèmes d'isolation thermique par l'extérieur : études expérimentales et numériques des transferts de chaleur et d'humidité. Thermique [physics.class-ph]. Université de Bretagne Sud, 2018. Français. NNT : 2018LORIS485 . tel-01975115

HAL Id: tel-01975115

<https://theses.hal.science/tel-01975115>

Submitted on 9 Jan 2019

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

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



THESE ARED / Région Bretagne, Département du Morbihan
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD

Mention : Énergétique, Thermique et Combustion
Ecole doctorale : SPI

Présentée par :
Mathieu BENDOUMA

Préparée au sein de l'IRDL CNRS FRE3744

Rattaché à l'Université Bretagne Sud

Institut de Recherche Dupuy de Lôme

Systèmes d'Isolation Thermique par l'Extérieur : Études expérimentales et numériques des transferts de chaleur et d'humidité

Thèse soutenue le 22/02/2018

Devant le jury composé de :

Pr. Didier DEFER, Université d'Artois.....Rapporteur

Dr. Chadi MAALOUF, Université de Reims.....Rapporteur

Pr. Laurent ROYON, Université Paris Diderot.....Examineur

Dr. Bérangère LARTIGUE, Université de Toulouse.....Examineur

Pr. Patrick GLOUANNEC, Université de Bretagne Sud.....Directeur de thèse

Dr. Thibaut COLINART, Université de Bretagne Sud.....Co-directeur de thèse

Remerciements :

Je tiens à remercier en premier lieu ma famille, qui m'a permis d'en arriver là aujourd'hui. Merci à vous Papa, Maman, Kristel et Thomas pour votre soutien, votre amour et tous ces moments agréables. Je souhaite aussi remercier mes grands-parents, Madeleine, Aïcha, Hyacinthe ainsi que mes oncles et tantes, Halima, Yasmine, Didier et Nelly, sans oublier les cousins et cousines. Merci à vous, pour tous ces instants passés ensemble.

Je souhaite remercier ma deuxième famille, autrement dit mes amis. A vous, Simon, Quentin, Benjamin, François, Thomas, Charles, Ludovic, Camille, Marion, Chloé, Julie, Audrey, Clémence, Nathan, Marion, David, Guillaume, Sylvain, François, Jojo et tous les autres ! Sans vous, rien n'aurait été possible.

Je veux aussi remercier les doctorants, passés et présents. Merci à Edouard, Constant, Romain, Clément, Cyril, Kader, Halla, Ismail, Antoine, Julien, Elodie, Delphine et les autres. Ces échanges, professionnels ou sociaux, ont été agréables, voir nécessaires au bon déroulement de la thèse !

Un grand merci aux techniciens du laboratoire pour leurs conseils, formations et précieuses aide. Je tiens tout particulièrement à remercier Anthony et William. Merci aux professeurs et maîtres de conférences du laboratoire, je tiens à remercier en particulier mes collègues de travail Philippe, Pascal, Hervé, Jean Pierre, Thomas et Adrien.

Je souhaite remercier tous ceux que j'ai pu côtoyer lors du projet lié au lycée Colbert : Hervé, Gilles, Thierry, Isabelle, Elena, Yoann et d'autres que j'oublie sûrement... Je tiens à remercier en particulier Marc qui m'a apporté une précieuse aide pour mes travaux sur place.

Je tiens à remercier la Région Bretagne, le conseil départemental du Morbihan, la société IC Bois ainsi que Philippe Mouret, qui ont participé au financement et à l'élaboration de ce projet.

Enfin, je remercie énormément mes encadrant, Thibaut et Patrick, qui m'ont apporté tant de conseils, de connaissances et de méthodes de travail. Sans leur aide, ce manuscrit n'aurait peut-être pas vu le jour.

Sommaire :

Table des figures	vii
Table des tableaux	xiii
Nomenclature	xv
Introduction	1
Chapitre I : Etat de l'art.....	5
I.1. Phénomènes de transferts thermohydriques dans les matériaux hygroscopiques	5
I.1.1. Les matériaux hygroscopiques à l'équilibre	5
I.1.2. Transferts thermohydriques dans les matériaux hygroscopiques	7
I.1.2.1. Flux de chaleur et de masse	7
I.1.2.2. Equations de conservation.....	10
I.1.2.3. Conditions aux limites et aux interfaces	10
I.1.3. Cas particulier des espaces d'air (avec ou sans infiltrations)	12
I.2. Les pathologies liées à l'humidité et les indicateurs de durabilité associés.....	14
I.2.1. La condensation	14
I.2.1.1. En surface intérieure et extérieure.....	14
I.2.1.2. Au sein de la paroi : Le diagramme de Glaser	15
I.2.2. Les indicateurs de développement biologique.....	16
I.2.2.1. Temps d'humidification (TOW – Time Of Wetness)	17
I.2.2.2. Le modèle VTT et l'indice de développement M	17
I.2.2.3. Modèle Wufi-Bio	18
I.3. Etat de l'art sur les études d'isolation par l'extérieur.....	19
I.3.1. Etude thermique et intérêt énergétique	20
I.3.2. Etude thermohydrique et risques	21
I.4. Conclusion et positionnement	24
Chapitre II : Etudes expérimentales de systèmes ITE.....	25
II.1. Systèmes d'isolation et matériaux employés	25
II.1.1. Présentation des solutions d'ITE étudiées.....	25
II.1.2. Caractérisation des matériaux	27
II.1.2.1. Méthodes de caractérisation.....	28
II.1.2.2. Résultats.....	29
II.2. Moyens et méthodes de caractérisation thermohydrique des parois.....	31
II.2.1. Présentation de l'enceinte biclimatique.....	31
II.2.2. Instrumentation des parois.....	32

II.2.3. Approche méthodologique	34
II.3. Analyse de la mise en œuvre des systèmes d'ITE	34
II.3.1. Suivi du séchage du mur parpaing	34
II.3.2. Suivi des conséquences de la pose des systèmes d'ITE	36
II.3.3. Bilan sur la mise en œuvre des systèmes d'ITE	37
II.4. Comportement thermohydrrique des parois	38
II.4.1. Paroi Parpaing	39
II.4.1.1. Conditions limites locales	39
II.4.1.2. Etude de la réponse thermohydrrique	40
II.4.1.3. Analyse du régime permanent	42
II.4.2. Systèmes d'ITE mis en œuvre par voie sèche	43
II.4.2.1. Conditions aux limites locales	43
II.4.2.2. Etude de la réponse thermohydrrique	45
II.4.2.3. Analyse du régime permanent	46
II.4.3. Système d'ITE mis en œuvre par voie humide	48
II.4.3.1. Etude de la réponse thermohydrrique	48
II.4.3.2. Analyse du régime permanent	49
II.4.4. Synthèse de l'étude sans risques de condensation	50
II.5. Etudes de situations avec des risques de condensation	50
II.5.1. Etude de la condensation superficielle	51
II.5.1.1. Test 1 : augmentation de la température à humidité relative constante	52
II.5.1.2. Test 2 : augmentation de la température à humidité relative variable	53
II.5.1.3. Synthèse de l'étude sur la condensation superficielle	54
II.5.2. Etude de la condensation interstitielle	55
II.5.2.1. Séquence expérimentale	55
II.5.2.2. Analyse du régime permanent	58
II.5.2.3. Synthèse de l'étude sur la condensation interstitielle	58
II.6. Conclusion	58
Chapitre III : Simulation du comportement thermohydrrique de parois isolées par l'extérieur	59
III.1. Modélisation des transferts de chaleur et d'humidité	59
III.2. Simulation du comportement thermohydrrique de la paroi parpaing	60
III.2.1. Présentation du modèle	60
III.2.2. Propriétés des matériaux	61
III.2.3. Confrontation simulation expérience	62
III.2.4. Etudes de sensibilité	65

III.3. Simulation du comportement thermohydrrique des systèmes ITE sous bardage	67
III.3.1. Présentation du modèle	67
III.3.2. Propriétés des matériaux	68
III.3.3. Paroi Biosourcée	70
III.3.3.1. Système ITE seule	71
III.3.3.2. Etudes de sensibilité	72
III.3.3.3. Paroi parpaing et ITE.....	73
III.3.4. Paroi Laine de verre	74
III.4. Simulation du comportement thermohydrrique de la paroi système polystyrène sous enduits.....	78
III.4.1. Hypothèses de modélisation	78
III.4.2. Propriétés des matériaux	78
III.4.3. Confrontation simulation expérience	79
III.5. Bilan sur la modélisation et les simulations des ITE.....	82
Chapitre IV : Analyse expérimentale et numérique d'une paroi de bâtiment en conditions réelles.....	83
IV.1. Présentation du bâtiment étudié et de son instrumentation	83
IV.1.1. Informations générales.....	83
IV.1.2. Instrumentation	85
IV.2. Analyse de la réponse thermohydrrique des parois	86
IV.2.1. Analyse détaillée de la réponse thermohydrrique de la paroi SE.....	87
IV.2.1.1. Étude du bardage et de la lame ventilée.....	87
IV.2.1.2. Étude du système d'ITE et de la cavité d'air.....	89
IV.2.1.3. Analyse de détails constructifs	91
IV.2.2. Comportement thermohydrrique pluriannuel des parois SE et NO	93
IV.2.2.1. Conditions météorologiques.....	93
IV.2.2.2. Réponse thermohydrrique des systèmes d'ITE	94
IV.2.2.3. Evaluation des risques liés à l'humidité.....	96
IV.2.3. Performance globale du bâtiment	97
IV.2.3.1. Perméabilité à l'air et performance énergétique.....	97
IV.2.3.2. Qualité de l'ambiance intérieure	97
IV.3. Modélisation thermohydrrique des parois en conditions réelles	99
IV.3.1. Présentation du modèle	99
IV.3.2. Résultats de simulation et confrontation à l'expérience	102
IV.3.2.1. Simulation en période hivernale.....	102
IV.3.2.2. Période estivale	104

IV.4. Conclusions de l'étude	105
Conclusion générale et perspectives	107
Références	109
Annexes	115
Annexe A : Qualification des ambiances intérieure et extérieure	115
Annexe B : Paroi parpaing - influence du coefficient d'échange par convection	119
Annexe C : Paroi parpaing - champs de température et d'humidité relative.....	119
Annexe D : Paroi parpaing - comparaison des flux de chaleur	120
Annexe E : Analyse et validation des données météorologiques recueillies <i>in situ</i>	121

Table des figures

Figure 1 : Pertes de chaleur d'une maison non isolée d'avant 1974 (ADEME, 2013).	1
Figure 2 : Schématisation des ITE sous enduit, sous bardage et sous vêtture/vêtage (Turenne, 2013).	3
Figure 3 : Différentes pathologies liées à l'humidité (Amaro et al., 2013).	4
Figure I-1 : Représentation schématique d'un milieu poreux (Bories and Prat, 1995).	5
Figure I-2 : Etats de l'eau au sein des pores (Lelièvre, 2015).	6
Figure I-3 : (a) Isothermes de sorption/désorption et (b) Courbes de succion/drainage (Daïan, 2013).	6
Figure I-4 : Comparaison de trois modèles d'isotherme de sorption du béton.	7
Figure I-5 : Conditions aux limites de parois de bâtiment (gauche : thermique ; droite : hydrique).	11
Figure I-6 : Confrontation de courbes de sorption "types" à l'aide du modèle de GAB.	12
Figure I-7 : Représentation schématique des trois approches de modélisation d'une cavité.	13
Figure I-8 : Illustration de la variation d'humidité relative suite à une baisse de température ($w=cste$).	14
Figure I-9 : Exemples d'utilisation du diagramme de Glaser (Dahan, 2008).	15
Figure I-10 : Exemples d'isocourbes de développement (Krus et al., 2001; Sedlbauer, K., 2011).	17
Figure I-11 : Représentation du modèle de la spore (Sedlbauer et al., 2001).	19
Figure I-12 : Schémas des deux types d'isolation par l'extérieur étudiés	20
Figure I-13 : Différents types de bardage (a : fermé; b : aéré; c : ventilé; d : jointures ouvertes)	20
Figure I-14 : Illustration des bénéfices d'un pare vapeur ou d'un frein vapeur sur la condensation dans la masse	22
Figure II-1 : Aperçu des différents isolants utilisés dans les systèmes d'ITE (A : polystyrène ; B : laine de verre ; C : laine de bois).	26
Figure II-2 : Aperçu final de la face extérieure de la paroi étudiée.	27
Figure II-3 : Aperçu des matériaux utilisés pour la caractérisation thermohydrrique.	27
Figure II-4 : Aperçu du conditionnement en dessiccateur pour la mesure des isothermes de sorption.	28
Figure II-5 : Conductivité thermique des OSB (a) et de la laine de bois (b) en fonction de la teneur en eau.	30
Figure II-6 : Isothermes de sorption mesurées et « fittées » avec le modèle de GAB.	31
Figure II-7 : Vue extérieure et schématisation de l'enceinte biclimatique.	32
Figure II-8 : Composition et instrumentation des différentes parois étudiées (A : Parpaing, B : PSE, C : Laine de verre, D : Biosourcée).	34
Figure II-9 : Aperçu des grandes étapes de construction et d'expérimentation.	34
Figure II-10 : Conditions de température et d'humidité relative dans les chambres intérieure et extérieure durant l'étude préliminaire du mur parpaing.	35

Figure II-11 : Evolution des pressions de vapeur et des humidités relatives dans les alvéoles des parpaings durant l'étude préliminaire.	35
Figure II-12 : Conditions de température et d'humidité relative dans les chambres intérieure et extérieure durant la pose des systèmes d'ITE.	36
Figure II-13 : Evolutions des humidités relatives dans les alvéoles de parpaings, côté extérieure, (a), aux interfaces mur-ITE (b) et évolution des densités de flux de chaleur après la pose des systèmes d'ITE (c).	37
Figure II-14 : Conditions de température et d'humidité relative dans les chambres intérieure et extérieure durant la séquence sans risques de condensation.	38
Figure II-15 : Températures mesurées à proximité de la surface extérieure de la paroi Parpaing et comparaison avec la mesure de la chambre extérieure.	39
Figure II-16 : Pressions de vapeur et humidités relatives mesurées à proximité de la surface extérieure de la paroi Parpaing et comparaison avec la mesure au centre de la chambre.	39
Figure II-17 : Vitesses d'air mesurées à proximité de la paroi Parpaing.	40
Figure II-18 : Réponse en température de la paroi Parpaing.	40
Figure II-19 : Densité de flux de chaleur en surface extérieure de la paroi Parpaing et écarts de température entre la surface d'enduit et l'air.	40
Figure II-20 : Relevé des températures des sondes Sensirion et des thermocouples dans les alvéoles de la paroi Parpaing.	41
Figure II-21 : Pressions de vapeur et humidités relatives mesurées dans les alvéoles de la paroi Parpaing.	41
Figure II-22 : Profils de température mesurés et calculés dans la paroi Parpaing à 0 et 10 jours.	43
Figure II-23 : Profils d'humidité relative et de pression de vapeur calculés et mesurés dans la paroi Parpaing à 0 et 90 jours.	43
Figure II-24 : Vitesses d'air mesurées dans les lames d'air des systèmes d'ITE sous bardage.	44
Figure II-25 : Températures mesurées et pressions de vapeur calculées aux extrémités de la lame d'air ventilée des parois Laine de verre et Biosourcée.	44
Figure II-26 : Confrontation des différentes températures mesurées à l'interface mur-ITE et près de l'OSB pour la paroi Laine de verre.	45
Figure II-27 : Températures mesurées en différents points de la paroi Laine de verre (a) et densité de flux mesurée à l'interface mur-ITE (b).	46
Figure II-28 : Pressions de vapeur mesurées en différents points de la paroi Laine de verre.	46
Figure II-29 : Variations relatives de la température, de la densité de flux et de la pression de vapeur à l'interface mur-ITE des parois Laine de verre et Biosourcée.	46
Figure II-30 : Profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur dans la paroi Laine de verre à 0 et 90 jours.	47
Figure II-31 : Profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur dans la paroi Biosourcée à 0 et 90 jours.	48
Figure II-32 : Température et pression de vapeur mesurées en différents points de la paroi PSE.	49

Figure II-33 : Profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur dans la paroi PSE (sans et avec prise en compte de la colle) à 0 et 90 jours.....	50
Figure II-34 : Localisation des mesures de température de surface et de rosée (vue de dessus).	51
Figure II-35 : Températures, humidités relatives et températures de rosée mesurées localement pour les différentes parois lors du test 1.....	52
Figure II-36 : Évolution des températures de surface de la paroi Parpaing et des systèmes d'ITE et écarts avec la température de rosée lors du test 1.....	53
Figure II-37 : Températures, humidités relatives et températures de rosée mesurées localement pour les différentes parois lors du test 2.....	54
Figure II-38 : Comparaison des indicateurs PHCd calculés pour la paroi Parpaing et pour les systèmes d'ITE lors des tests 1&2.	54
Figure II-39 : Profil théorique d'humidité relative dans les parois Laine de verre et Biosourcée en présence de condensation interstitielle.	55
Figure II-40 : Conditions de température et d'humidité relative dans les chambres intérieure et extérieure lors de l'étude sur la condensation interstitielle.	56
Figure II-41 : Evolution des humidités relatives mesurées aux interfaces mur-ITE (a) et au sein des ITE (b) lors de l'étude sur la condensation interstitielle.....	56
Figure II-42 : Laine de verre – Températures et humidité relatives mesurées au proche du pare pluie et dans l'isolant.....	57
Figure II-43 : Profils théoriques d'humidité relative pour chaque paroi et confrontation aux mesures après 35 jours.	57
Figure III-1 : Paroi Parpaing – Géométrie considérée et conditions limites associées.	60
Figure III-2 : Paroi Parpaing - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion massique.	62
Figure III-3 : Rappel des consignes des chambres intérieure et extérieure pendant la transition.	63
Figure III-4 : Paroi Parpaing - Conditions initiales.....	63
Figure III-5 : Paroi Parpaing – Confrontation simulation et expérience.....	64
Figure III-6 : Paroi Parpaing – Prise en compte d'une correction de l'humidité relative extérieure (a : Profils d'humidité relative ; b : Evolutions transitoires).....	65
Figure III-7 : Parpaing - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion massiques (liquide, vapeur) associés.....	65
Figure III-8 : Paroi Parpaing - Influence de la pente de l'isotherme de sorption du parpaing.	66
Figure III-9 : Paroi Parpaing - Influence du facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'enduit.	66
Figure III-10 : Paroi Parpaing - Evolutions des humidités relatives suite à l'étude de sensibilité.	67
Figure III-11 : Comparaison des flux de chaleur calculés (avec et sans modifications des propriétés matériaux) au flux de chaleur mesuré (simulation à risques).....	67
Figure III-12 : Géométries et conditions limites des systèmes sous bardage.....	68
Figure III-13 : Parois sous bardage - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion des matériaux.....	70

Figure III-14 : Paroi Biosourcée - a : Conditions initiales, b : correctif sur l'humidité relative extérieure.....	70
Figure III-15 : ITE Biosourcée – Confrontation simulation expérience.	71
Figure III-16 : Laine de bois - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion massique (liquide, vapeur) associée à l'étude de sensibilité.	72
Figure III-17 : ITE Biosourcée – Influence de la capacité hydrique de la laine de bois.....	72
Figure III-18 : ITE Biosourcée – Influence du facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'OSB.....	73
Figure III-19 : ITE Biosourcée – Confrontation des humidités relatives mesurées et simulées après ajustement des propriétés.....	73
Figure III-20 : Paroi Biosourcée - Humidités relatives calculées et mesurées pour les simulations saine et à risque.....	74
Figure III-21 : Paroi Laine de verre - a : Conditions initiales, b : influence d'une correction sur l'humidité relative extérieure.	75
Figure III-22 : Paroi Laine de verre – Confrontation des températures et flux simulés à l'expérience.	76
Figure III-23 : Paroi Laine de verre – Confrontation des humidités relatives simulées à l'expérience.	76
Figure III-24 : Laine de verre - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion massique (liquide, vapeur) associée à l'étude de sensibilité.	77
Figure III-25 : Paroi Laine de verre – Confrontation des humidités relatives simulées avant et après la prise en compte des modifications.	77
Figure III-26 : Paroi Laine de verre – Confrontation des densités de flux de chaleur simulées avant et après la prise en compte des modifications.	77
Figure III-27 : Géométrie et conditions aux limites de la paroi PSE.	78
Figure III-28 : Paroi PSE - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion.	79
Figure III-29 : Paroi PSE - Profils de température initiaux.....	79
Figure III-30 : Paroi PSE - Températures et densités de flux de chaleur mesurées et calculées.	80
Figure III-31 : Paroi PSE - Humidités relatives et teneur en eau initiales.	80
Figure III-32 : Paroi PSE – Confrontation des humidités relatives mesurées et calculées en différents points.....	82
Figure IV-1 : Vue aérienne du bâtiment et vue de l'enveloppe avant réhabilitation.	83
Figure IV-2 : Vues des faces intérieures et extérieures des panneaux préfabriqués.	84
Figure IV-3 : Vues extérieure et intérieure de l'enveloppe après réhabilitation.....	84
Figure IV-4 : Localisation de l'instrumentation de la paroi Sud-Est (SE).....	86
Figure IV-5 : Aperçu des phénomènes physiques mis en jeu.	86
Figure IV-6 : Localisation et dénomination de l'instrumentation dans la lame d'air ventilée de la paroi SE.	87
Figure IV-7 : Éclairement solaire et températures de surface de bardage et dans la lame d'air ventilée de la paroi SE durant une période estivale.....	88

Figure IV-8 : Humidités relatives et pressions de vapeur dans la lame d'air ventilée de la paroi SE durant une période estivale.	88
Figure IV-9 : Localisation et dénomination de l'instrumentation dans le système d'ITE et la cavité d'air de la paroi SE.	89
Figure IV-10 : Températures et flux thermique dans le système d'ITE et la cavité d'air de la paroi SE durant une période hivernale.	90
Figure IV-11 : Humidités relatives et pressions de vapeur dans le système d'ITE et la cavité d'air de la paroi SE durant une période hivernale.	90
Figure IV-12 : Localisation et dénomination de l'instrumentation au niveau du nez de béton (gauche) et de l'encadrement de fenêtre (droite) de la paroi SE.	91
Figure IV-13 : Écarts de températures, d'humidité relative et de pression de vapeur entre le nez de béton et la partie courante de la paroi SE durant une période hivernale.	92
Figure IV-14 : Écarts de températures et d'humidité relative entre le haut (à proximité de l'encadrement de fenêtre) et la partie courante de la paroi SE.	92
Figure IV-15 : Moyenne journalière des températures, humidités relatives et pression de vapeur de l'air extérieur.	93
Figure IV-16 : Puissance solaire maximale et éclairage solaire journalier (gauche) et rose des vents (droite).	94
Figure IV-17 : Température, humidité relative et pression de vapeur moyenne journalière en différents points de la paroi SE.	95
Figure IV-18 : Comparaison des moyennes journalières de température, humidité relative et pression de vapeur moyenne de la paroi SE et de la paroi NO.	95
Figure IV-19 : Analyse de risque au regard de la limite du TOW derrière le pare-pluie (gauche) et en surface d'OSB du côté extérieur (droite) des parois SE et NO.	96
Figure IV-20 : Distribution cumulée des températures et humidités relatives pour trois périodes dans la salle de classe.	98
Figure IV-21 : Diagramme de Givoni et distribution cumulée de la concentration en CO ₂ dans la salle de classe durant les périodes de cours.	99
Figure IV-22 : Classe de charge thermohydrrique de la salle de classe.	99
Figure IV-23 : Aperçu des phénomènes physiques modélisés.	100
Figure IV-24 : Comparaison des températures et humidités relatives mesurées et simulées en surface de bardage et dans la lame d'air ventilée de la paroi SE durant une période hivernale.	102
Figure IV-25 : Comparaison des températures et de la densité de flux thermique mesurées et simulées dans le système d'ITE de la paroi SE durant une période hivernale.	103
Figure IV-26 : Comparaison des humidités relatives mesurées et simulées dans le système d'ITE de la paroi SE durant une période hivernale.	103
Figure IV-27 : Comparaison des températures et humidités relatives mesurées et simulées dans la paroi NO.	104
Figure IV-28 : Comparaison des températures et humidités relatives mesurées et simulées dans la lame d'air ventilée de la paroi SE durant une période hivernale.	104

Figure IV-29 : Comparaison des températures et humidités relatives mesurées et simulées dans la paroi SE (haut) et la paroi NO (bas).....	105
Figure A-1 : Mesures des sondes Sensirion et Rotronic dans les chambres intérieure et extérieure.....	115
Figure A-2 : Mesures de la vitesse d'air en sortie de groupe froid et de la température et de l'humidité relative au centre de l'enceinte extérieure.....	116
Figure A-3 : Vitesse et température mesurées à proximité des parois PSE et Biosourcée. ...	117
Figure A-4 : Schématisation de l'écoulement dans la chambre extérieure.....	117
Figure A-5 : Localisation de l'instrumentation pour la qualification thermohydrrique de la chambre extérieure.	117
Figure A-6 : Températures, humidités relatives et pression de vapeur mesurées au centre de l'enceinte et face aux systèmes d'ITE.	118
Figure B-1 : Influence du coefficient d'échange par convection.	119
Figure B-2 : Evaluation du coefficient d'échange (simulation saine).....	119
Figure C-1 : Champs de température et d'humidité relative initiaux dans le parpaing (simulation saine).	120
Figure D-1 : Comparaison des densités de flux de chaleur mesurée et calculée à l'humidité relative calculée en surface d'enduit.	120
Figure E-1 : Distribution cumulée des écarts entre la température moyenne et les températures minimales et maximales sur une période d'acquisition.	121
Figure E-2 : Distribution cumulée des écarts entre la moyenne et le maximum des puissances solaires et des vitesses de vent sur une période d'acquisition.....	121
Figure E-3 : Comparaison des évolutions de température (gauche) et distribution des écarts (droite).....	122
Figure E-4 : Comparaison des évolutions d'humidité relative et distribution des écarts.....	122
Figure E-5 : Comparaison des évolutions de pression de vapeur et distribution des écarts. .	123
Figure E-6 : Comparaison des évolutions d'éclairement solaire et distribution des écarts....	123

Table des tableaux

Tableau II-1 : Caractéristiques des 3 systèmes ITE.	26
Tableau II-2 : Synthèse de l'ensemble des propriétés mesurées.	29
Tableau II-3 : Coefficients du modèle de GAB pour les isothermes de sorption de quelques matériaux.	31
Tableau II-4 : Plage de fonctionnement des chambres climatiques.	32
Tableau II-5 : Températures de surface, densité de flux et résistance thermique de la paroi Parpaing.	42
Tableau II-6 : Calcul théorique de la résistance thermique de la paroi Parpaing.	42
Tableau II-7 : Paramètres utilisés pour le tracé des profils de la paroi parpaing.	43
Tableau II-8 : Résistances thermiques mesurées et calculées pour les systèmes d'ITE et les parois Laine de verre et Biosourcée.	47
Tableau II-9 : PSE - Résistances thermiques mesurées et calculées pour le système ITE et la paroi.	49
Tableau II-10 : Indicateurs HCD, DHCd et PHCd calculés pour la paroi Parpaing et pour les systèmes d'ITE lors du test 1.	53
Tableau II-11 : Propriétés thermiques des matériaux en surface extérieure des systèmes d'ITE.	55
Tableau II-12 : Evaluation des résistances thermiques des parois (conditions à risques).	58
Tableau III.1 : Coefficients de stockage et de transfert des équations de conservation.	60
Tableau III.2 : Paroi Parpaing - Propriétés des matériaux.	62
Tableau III.3 : Parois sous bardages - Propriétés matériaux.	69
Tableau III.4 : Paroi PSE - Synthèse des propriétés matériaux.	78
Tableau IV.1 : Fréquence et temps cumulé de dépassement de la courbe Isopleth.	97
Tableau IV.2 : Consommation de chauffage et de ventilation avant et après rénovation.	97
Tableau IV.3 : Conditions aux limites thermique et hydrique.	101
Tableau B-1 : Coefficients d'échange radiatif calculés en fonction de la température moyenne et de l'émissivité.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau B-2 : Dimensions et propriétés des matériaux utilisés pour le calcul numérique.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau B-3 : Comparaison des différentes résistances thermiques calculées et comparaison avec la mesure.	Erreur ! Signet non défini.

Nomenclature

C	Capacité thermique volumique	$[\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}]$
C_m	Concentration massique	$[\text{kg.m}^{-3}]$
CP	Potentiel de condensation	[Pa]
CPacc	Potentiel de condensation accumulé	[Pa.h]
c_p	Chaleur spécifique	$[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
D_l^{HR}	Coefficient de migration de l'eau liquide	$[\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}]$
D_l^T	Coefficient de thermomigration de l'eau liquide	$[\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
D_v^0	Coefficient de diffusion binaire de l'eau dans l'air	$[\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}]$
D_v^{HR}	Coefficient de diffusion de la vapeur	$[\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}]$
D_v^T	Coefficient de thermodiffusion de la vapeur	$[\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
Es	Eclairement solaire	$[\text{W.m}^{-2}]$
e	Epaisseur	[m]
F	Facteur de forme	[-]
H	Enthalpie volumique	$[\text{J.m}^{-3}]$
HR	Humidité relative	[-] ou [%]
h	Coefficient d'échange thermique	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
j	Flux massique	$[\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}]$
K	Taux de changement de phase	$[\text{kg.s}^{-1}]$
k	perméabilité	$[\text{m}^2]$
k_m	Coefficient d'échange par convection massique	$[\text{m.s}^{-1}]$
Le	Nombre de Lewis	[-]
Lv	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	$[\text{J.kg}^{-1}]$
l	Longueur	[m]
M	Indice de développement de moisissures	[-]
Mv	Masse molaire de l'eau	$[\text{kg.mol}^{-1}]$
P	Pression	[Pa]
Q_c	Source/puit de chaleur	$[\text{W.m}^{-3}]$
Q_m	Source/puit de matière	$[\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}]$
Q_v	Débit volumique	$[\text{m}^3.\text{s}^{-1}]$
R	Constante des gaz parfaits	$[\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
R_m	Résistance massique	$[\text{m.s}^{-1}]$
R_{th}	Résistance thermique	$[\text{K.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
S	Surface	$[\text{m}^2]$
Sd	Epaisseur d'air équivalente	[m]
T	Température	[K]
t	temps	[s], [h] ou [j]
TDR	Ratio de différence de température	[-]
TOW	Temps d'humidification	[h]

V	Volume	[m ³]
v	Vitesse	[m.s ⁻¹]
w _m	Teneur en eau massique base sèche	[kg _{eau} .kg _{mat,s} ⁻¹]

Symboles Grecs :

α	Absorptivité	[-]
δ_p	Perméabilité à la vapeur	[kg.m ⁻¹ .Pa ⁻¹ .s ⁻¹]
ε	Emissivité	[-]
φ	Densité de flux	[W.m ⁻²]
λ	Conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
μ	Viscosité dynamique	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
μ_{mat}	Facteur de résistance à la diffusion	[-]
ρ	Masse volumique	[kg.m ⁻³]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
ϑ	Porosité	[-]

Indices :

a	Air
adv	Advection
amb	Ambiance
app	Apparent
atm	Atmosphérique
bard	Bardage
CLO	Courte Longueur d'Onde
c	Capillaire
cav	Cavité
cd	Conduction
crit	Critique
cv	Convection
eq	Equivalent
ext	Extérieur
GLO	Grande Longueur d'Onde
g	Gaz

int	Intérieur
l	Liquide
lav	Lame d'air ventilée
m	Massique
mat	Matériau
max	Maximum
phase	Changement de phase
pp	Pare pluie
r	Relatif
ray	Rayonnement
ref	Référence
s	Sec
sat	Saturante
surf	Surface
v	Vapeur

Introduction

Le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire confondus) représente près de 45% de la consommation d'énergie finale et est responsable de plus de 20% des émissions de gaz à effet de serre en France (ADEME, 2017). Dans ce contexte et sous l'impulsion de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD 2010/31/UE), les lois Grenelle I et LTECV (Loi relative à la Transition Energétique pour la Croissance Verte) ont fixé des objectifs visant à réduire ces consommations et ces émissions. A titre d'exemple, pour les bâtiments neufs, la Réglementation Thermique RT 2012 est venue renforcer les prérogatives de la précédente réglementation en fixant l'objectif d'atteindre le seuil BBC. En 2016 a été lancé le label E⁺C⁻ (Energie + Carbone -) dont l'objectif est de converger vers des Bâtiments à Energie POSitive (BEPOS).

Cependant, il est également nécessaire de réduire la consommation énergétique des bâtiments existants. Par exemple, plus de la moitié des résidences principales bretonnes ont été construites avant toute réglementation thermique (soit avant 1975) et leur consommation moyenne est supérieure à 200 kWh.m⁻².an⁻¹ (Cellule Economique de Bretagne, 2013). Ainsi, pour les bâtiments existants, la réglementation de 2020 vise une réduction minimale de 38% des consommations d'énergie et de 50% des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Pour atteindre ces objectifs, il convient de définir une stratégie de rénovation de l'enveloppe et des systèmes énergétiques de l'habitat. A titre d'exemple, la Figure 1 présente les déperditions types d'un bâtiment non isolé, d'avant 1974, et souligne l'importance de travailler sur l'enveloppe du bâtiment (en intégrant une stratégie de ventilation et l'utilisation d'équipements performants).

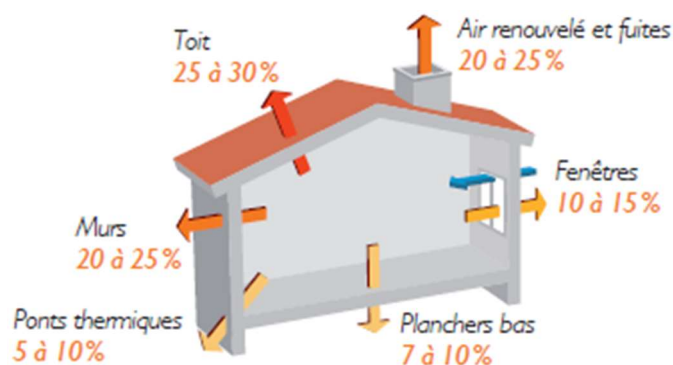


Figure 1 : Pertes de chaleur d'une maison non isolée d'avant 1974 (ADEME, 2013).

La rénovation énergétique de l'enveloppe du bâtiment peut se faire par la mise en œuvre d'une technique d'Isolation Thermique par l'Intérieur (ITI) ou une technique d'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE). Bien qu'abordable économiquement, intéressante d'un point de vue phonique et adaptée dans le cadre d'une préservation de l'architecture extérieure, l'ITI présente quelques inconvénients majeurs : la perte de surface habitable, le non-traitement des ponts thermiques et des risques de condensation. Malgré son coût légèrement plus élevé, l'ITE permet

de traiter un certain nombre de ces points et voit, en conséquence, sa part de marché croître au fil des années (Batirama, 2017).

Il existe trois grandes techniques d'ITE : l'ITE sous enduit (ou ETICS pour External Thermal Insulation Composite Systems), l'ITE sous bardage et l'ITE sous vêtture/vêtage (cf. Figure 2). L'ITE sous enduit est composée d'une isolation rigide (généralement du polystyrène, voire de la laine minérale), fixée à la paroi par collage et/ou mécaniquement à l'aide de chevilles ou de profilés, sur laquelle on vient rapporter un enduit pour assurer une protection aux intempéries. Cette technique, dite de filière humide, est la plus souvent utilisée et représentait près des 2/3 des chantiers en 2011 (Imbert et al., 2011). A titre d'exemple, l'économie d'énergie associée à l'application d'un système ETICS peut aller jusqu'à 60% pour des bâtiments existants (Rouni and Kirn, 2006). Dans le cas de l'ITE sous bardage, un système de fixation mécanique permet de fixer l'isolant et les tasseaux qui supportent le bardage. La lame d'air créée entre le bardage et l'isolant constitue une zone tampon permettant d'atténuer les sollicitations extérieures. Enfin, l'ITE sous vêtture/vêtage est une solution hybride : des panneaux sandwich isolants sont fixés mécaniquement à la paroi et directement recouverts d'un parement sans créer de lame d'air.

Les règles techniques de chacune de ces solutions sont détaillées dans plusieurs normes ainsi que dans de nombreux guides techniques (CSTB, 2013; ETAG 004, 2000; NF DTU 31.2, 2011; RAGE, 2015, 2014) pour s'assurer d'une bonne mise en œuvre et d'un fonctionnement durable de ces solutions. Cependant, des premiers retours d'expérience ont montré que des désordres pouvaient se produire. Certains ont été traités sous forme de « fiche pathologie » par l'Agence Qualité Construction. De manière plus exhaustive, Amaro et al. (Amaro et al., 2014, 2013) ont recensé un ensemble de pathologies sur des systèmes ETICS (cf. Figure 3). On peut trouver notamment des phénomènes de décoloration, des défauts mécaniques, de la corrosion (parties métalliques) ou encore le développement de moisissures.

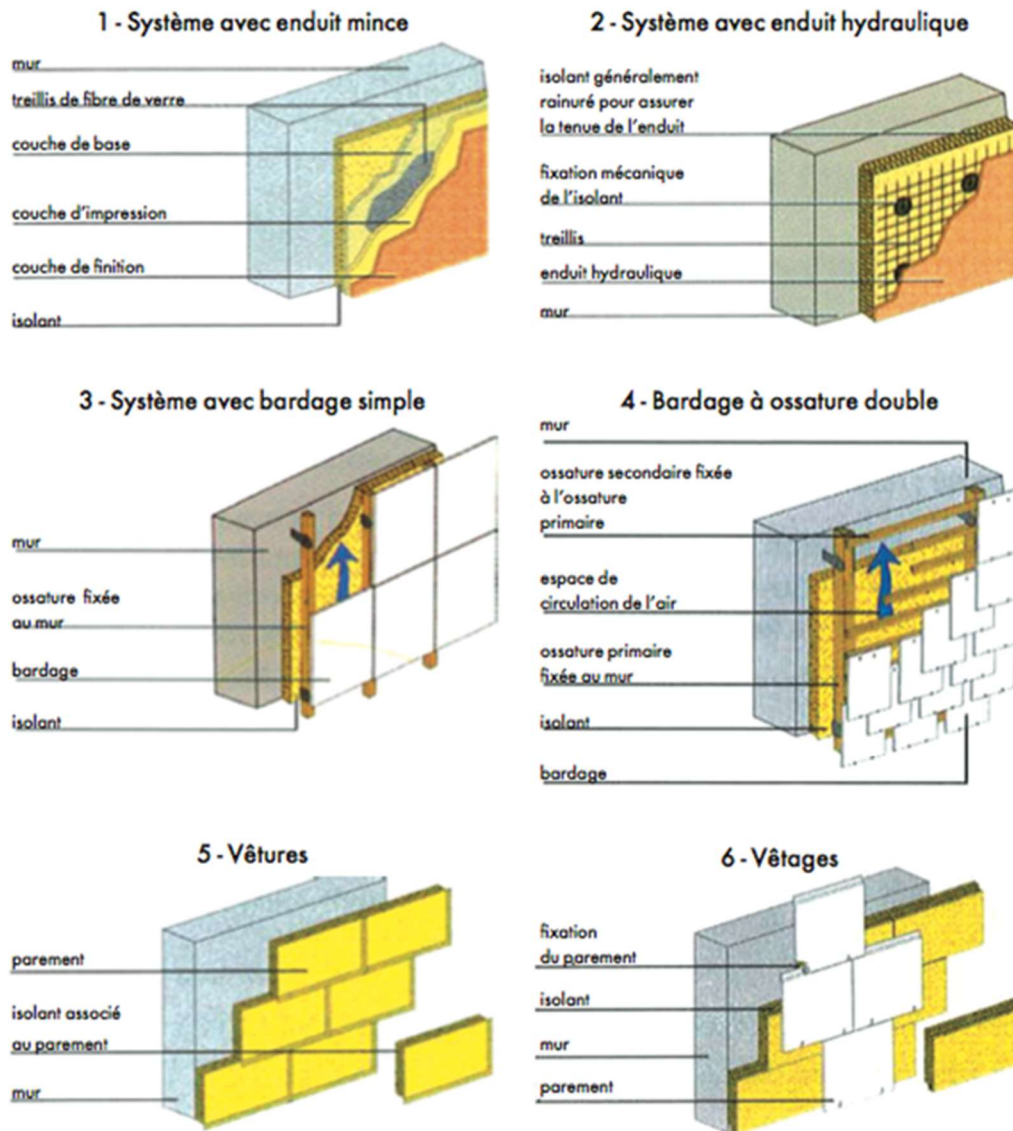


Figure 2 : Schématisation des ITE sous enduit, sous bardage et sous vêtture/vêtage (Turenne, 2013).

Le fait notable est que l'ensemble de ces pathologies présente un lien très étroit avec l'humidité. En conséquence, la constitution de la paroi, qui a un fort impact sur son comportement thermohydrrique, est un paramètre essentiel quant à la durabilité des ouvrages d'ITE. Cette question de durabilité, vis-à-vis de l'humidité, est d'autant plus pertinente que l'usage des matériaux biosourcés est en pleine croissance dans le secteur de la construction (Poggi, 2015; Reinteau, 2017). En effet, la parution du label « bâtiment biosourcé » a fourni un premier cadre pour l'usage de ces matériaux ; mais c'est surtout sous l'impulsion de l'expérimentation E⁺C⁻ que ceux-ci pourraient prendre leur essor. Cependant, la majorité des isolants biosourcés, telle que les laines de bois, de chanvre, de lin, la ouate de cellulose ou encore le liège expansé, présente un caractère fortement hygroscopique et donc une sensibilité à l'humidité. En conséquence se pose alors la question de leur intégration dans des solutions d'ITE.



Figure 3 : Différentes pathologies liées à l'humidité (Amaro et al., 2013).

C'est à cette question que les quatre chapitres de cette thèse vont essayer d'apporter des éléments de réponse sous la forme suivante. Dans le Chapitre 1, les phénomènes de transferts de chaleur et de masse au sein de milieux poreux et hygroscopiques, les indicateurs de durabilité ainsi que les études expérimentales et numériques sur les systèmes ITE sont présentés sous la forme d'un état de l'art succinct. Le Chapitre 2 présente l'expérimentation mise en œuvre au sein d'une enceinte biclimatique pour étudier la réponse thermohydrrique de trois systèmes ITE lors de leur pose ainsi que sous diverses sollicitations contrôlées de température et d'humidité relative. Dans le Chapitre 3, une modélisation et des simulations, en lien avec le chapitre précédent, sont effectuées pour les différents systèmes étudiés. Enfin, le Chapitre 4 présente une étude expérimentale et numérique en conditions réelles du comportement thermohydrrique de parois d'un bâtiment rénové thermiquement par l'extérieur.

Chapitre I : Etat de l'art

La première partie de ce chapitre introduit les phénomènes et les modèles pour décrire les transferts de chaleur et d'humidité au sein d'un milieu hygroscopique. Ensuite, des indicateurs pour quantifier les risques de condensation (au sein et en surfaces de parois) et les risques de développement biologique sont présentés. Enfin, une brève revue des travaux de la littérature est exposée.

I.1. Phénomènes de transferts thermohydriques dans les matériaux hygroscopiques

I.1.1. Les matériaux hygroscopiques à l'équilibre

Les matériaux de construction sont généralement des milieux poreux, composés d'une matrice solide et de pores. Les pores peuvent être de différentes dimensions (microscopique, mésoscopique ou macroscopique) et fermés ou ouverts (c'est-à-dire connectés vers l'extérieur) (Daïan, 2013). La porosité d'un matériau se définit comme le rapport entre le volume des pores et le volume total de l'échantillon :

$$\vartheta = \frac{V_{pores}}{V_{total}} \quad (I-1)$$

La porosité est une grandeur variable selon l'échelle à laquelle on se place. Pour des études à l'échelle macroscopique, on définit un Volume Élémentaire Représentatif (VER) au-delà duquel la porosité moyenne est constante (Figure I-1).

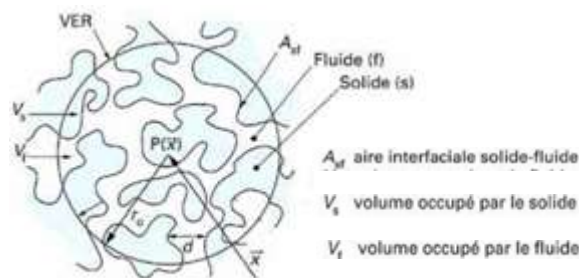


Figure I-1 : Représentation schématique d'un milieu poreux (Bories and Prat, 1995).

Au sein de matériaux hygroscopiques, l'eau peut se présenter sous forme vapeur (dans la phase gazeuse), adsorbée ou liquide. A faible humidité relative, l'eau est adsorbée en surface des pores, sous forme d'une couche monomoléculaire (adsorption de Langmuir), puis absorbée sous forme d'un agrégat multimoléculaire. A plus forte humidité relative, on assiste à la création de ménisques qui conduisent à de la condensation capillaire. Enfin, le matériau est considéré comme saturé (en eau) dès lors que tous les pores sont remplis d'eau liquide (Figure I-2).

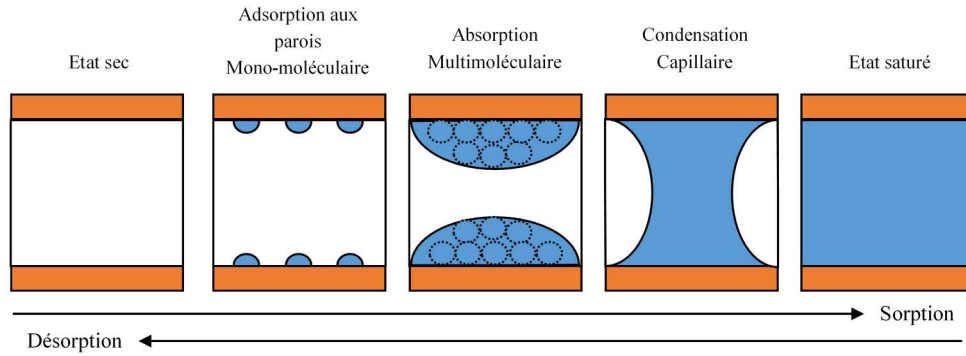


Figure I-2 : Etats de l'eau au sein des pores (Lelièvre, 2015).

L'humidité, présente en phases gazeuse et liquide, peut être quantifiée par la teneur en eau massique w_m ou par le taux de saturation S :

$$w_m = \frac{m_{eau}}{m_s} \quad (I-2)$$

$$S = \frac{w_m}{w_{sat}} \quad (I-3)$$

Avec m_{eau} la masse d'eau (liquide + vapeur) dans le matériau, m_s la masse de matériau sec et w_{sat} la teneur en eau à saturation.

Usuellement, on trouve deux types de courbe pour caractériser la teneur en eau d'un matériau : les courbes d'adsorption ou d'imbibition principale lorsque le matériau passe d'un état sec à un état saturé et les courbes de désorption ou de drainage principal dans le cas contraire. Les courbes d'adsorption et de désorption expriment l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative, alors que les courbes d'imbibition et de drainage décrivent la saturation en fonction de la pression capillaire. Lorsqu'un écart est observé entre ces courbes, cela traduit un effet d'hystérésis mis en évidence sur la Figure I-3. Ce phénomène, qui peut être décrit par différentes approches, induit une complexité supplémentaire si on souhaite simuler les transferts d'humidité en régime transitoire (Lelièvre, 2015). La température a également une influence sur ces états d'équilibre, notamment pour les matériaux organiques (Colinart and Glouannec, 2017; Poyet and Charles, 2009). On notera par ailleurs la complémentarité des courbes de sorption et de succion qui permettent de décrire les variations de teneur en eau (Figure I-3). Quelle que soit l'approche retenue, les propriétés d'équilibre sont propres à chaque matériau et sont généralement déterminées expérimentalement (EN ISO 12571, 2013).

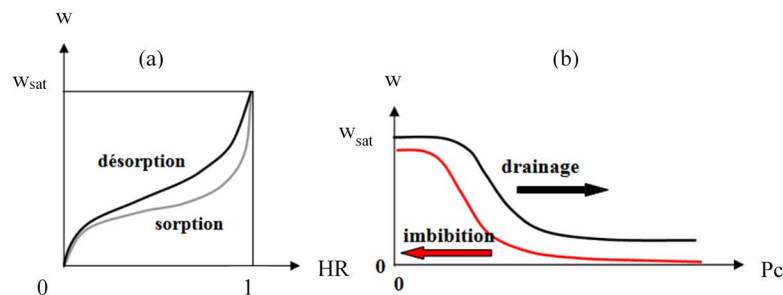


Figure I-3 : (a) Isothermes de sorption/désorption et (b) Courbes de succion/drainage (Daïan, 2013).

Dans la littérature, il existe de nombreux modèles, empiriques ou physiques, pour représenter les isothermes de sorption (Remache, 2011). La Figure I-4 présente trois modèles de sorption, ajustés pour représenter l'isotherme de sorption d'un béton (données WUFI) :

- Le modèle de Langmuir décrivant l'adsorption monomoléculaire qui peut être employé pour des faibles humidités relatives (< 20%) ;
- Le modèle de BET (Brunauer et al., 1938) décrivant l'adsorption multimoléculaire utilisé pour des humidités relatives allant jusqu'à 50% ;
- Le modèle de GAB (Anderson, 1946) est une variante du modèle de BET pour tenir compte de la condensation capillaire et accroître son domaine de validité jusqu'à 95%.

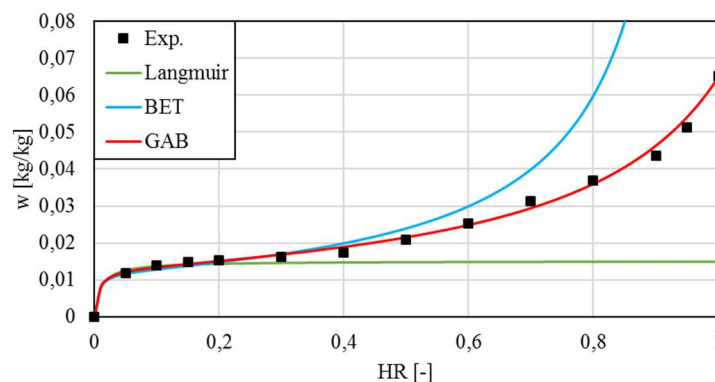


Figure I-4 : Comparaison de trois modèles d'isotherme de sorption du béton.

I.1.2. Transferts thermohydriques dans les matériaux hygroscopiques

I.1.2.1. Flux de chaleur et de masse

Dans le cadre de cette thèse, les hypothèses génériques suivantes sont retenues pour les transferts de chaleur et de masse : les matériaux sont indéformables et ne sont pas le siège de réactions chimiques ; un équilibre thermodynamique local est supposé entre les différentes phases (solide, liquide, gaz) ; la vapeur d'eau et l'air sec sont considérés comme des gaz parfaits et la phase liquide comme un fluide incompressible.

Transferts thermiques

La conduction thermique au sein d'un solide peut être exprimée par la loi de Fourier :

$$\varphi_{cd} = -\lambda_{app} \nabla T \quad (I-4)$$

Où λ_{app} est la conductivité thermique apparente du matériau. Cette propriété peut être déterminée expérimentalement en fonction de l'humidité et/ou de la température par différentes techniques dont certaines sont normalisées (Degiovanni, 1994) : plaque chaude gardée, fil chaud, ruban chaud...

Le flux de chaleur par advection est défini en fonction des flux massiques des divers constituants :

$$\varphi_{adv} = \left(\sum_{i=1}^m j_i c_{p_i} \right) \nabla T \quad (I-5)$$

Où j_i et c_{p_i} sont respectivement le flux de matière et la chaleur spécifique du composant i . Enfin, le flux de chaleur, lié aux changements de phase liquide/vapeur, s'exprime à partir du taux de changement de phase, K et de la chaleur latente de vaporisation de l'eau comme :

$$\varphi_{phase} = K L_v(T) \quad (I-6)$$

$$L_v(T) = L_v(T_{ref}) + (c_{p_v} - c_{p_l})(T - T_{ref}) \quad (I-7)$$

Avec T_{ref} la température de référence (273.15K).

Le taux de changement de phase est déduit de l'équation de conservation de la vapeur d'eau (eq. (I-24)).

Transferts de masse

Les transferts diffusifs de vapeur d'eau et d'air sec sont décrits par la loi de Fick :

$$j_v = -D_v \nabla C_v \quad (I-8)$$

$$j_a = -D_a \nabla C_a \quad (I-9)$$

Où j_i , D_i et C_i sont respectivement les flux, les coefficients de diffusion apparents et les concentrations du constituant i ($i=a$ ou v pour l'air et la vapeur d'eau).

Compte tenu de la définition de la concentration de vapeur d'eau, l'équation (I-8) peut s'écrire sous la forme :

$$j_v = - \left(D_v \frac{M_v p_{v_{sat}}(T)}{R T} \right) \nabla HR - \left(D_v \frac{M_v}{R T} HR \left(\frac{dp_{v_{sat}}(T)}{dT} - \frac{p_{v_{sat}}(T)}{T} \right) \right) \nabla T \quad (I-10)$$

Ou bien :

$$j_v = D_v^{HR} \nabla HR + D_v^T \nabla T \quad (I-11)$$

Avec D_v^{HR} et D_v^T les coefficients de diffusion et de thermo-diffusion de la vapeur d'eau.

Le transfert convectif des phases liquide et gazeuse est décrit par la loi de Darcy :

$$j_l = - \frac{k k_{rl}}{\mu_l} \nabla P_l \quad (I-12)$$

$$j_g = - \frac{k k_{rg}}{\mu_g} \nabla P_g \quad (I-13)$$

Avec k la perméabilité intrinsèque du matériau, k_{rl} et k_{rg} les perméabilités relatives des phases liquide et gazeuse (Lecharpentier, 2000) et μ_l et μ_g les viscosités dynamiques des phases liquide et gazeuse.

La pression totale est supposée constante et les flux d'air au sein des matériaux sont négligés, ($j_g \approx 0$). En introduisant la pression capillaire $P_c = P_g - P_l$, le flux massique de la phase liquide s'écrit alors :

$$j_l = \frac{k k_{rl}}{\mu_l} \nabla P_c \quad (\text{I-14})$$

En considérant un équilibre thermodynamique au sein du VER, la loi de Kelvin permet d'exprimer la pression capillaire en fonction de l'humidité relative et de la température ($P_c = -\frac{RT\rho_l}{M_l} \ln(HR)$), on peut alors écrire :

$$j_l = -\frac{k k_{rl}}{\mu_l} \frac{R\rho_l}{M_v} (T\nabla HR + \ln(HR) \nabla T) \quad (\text{I-15})$$

Avec R la constante des gaz parfaits, ρ_l la masse volumique de l'eau liquide et M_v la masse molaire de l'eau. L'équation (I-15) peut aussi être exprimée sous la forme :

$$j_l = D_l^{HR} \nabla HR + D_l^T \nabla T \quad (\text{I-16})$$

Où D_l^{HR} et D_l^T sont les coefficients de migration et de thermomigration de l'eau liquide.

Les difficultés majeures dans la quantification des transferts de masse sont la détermination du coefficient de diffusion de la vapeur D_v et des perméabilités relatives de la phase gazeuse et liquide, respectivement k_{rg} et k_{rl} .

Pour les matériaux de construction, la méthode de la coupelle (EN ISO 12572, 2016) est fréquemment employée pour mesurer le facteur de résistance à la diffusion de vapeur μ_{mat} défini par :

$$\mu_{mat} = \frac{D_v^0}{D_v} \quad (\text{I-17})$$

Avec D_v^0 , le coefficient de diffusion binaire de la vapeur d'eau dans l'air sec qui peut être approximé par la relation de Schirmer (Schirmer, 1938). En négligeant les termes de pression, on obtient :

$$D_v^0 = 2.17 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{273.15} \right)^{1.88} \quad (\text{I-18})$$

Dans le cas du test de la coupelle sèche (échantillon soumis à un gradient d'humidité relative entre 0 et 50%), il est généralement admis que le transfert d'humidité se fait uniquement sous forme vapeur. Le coefficient de diffusion de vapeur est alors donné par :

$$D_v = \frac{D_v^0}{\mu_{mat0}} \quad (\text{I-19})$$

Dans le cas du test de la coupelle humide (échantillon soumis à un gradient d'humidité relative compris entre 50 et 93%), les transferts en phase vapeur et en phase liquide coexistent. Künzle suggère alors d'exprimer le coefficient de migration de la phase liquide comme (Künzel, 1995) :

$$D_l^{HR} = D_v^0 \frac{M_v p_{v,sat}(T)}{R T} \left(\frac{1}{\mu_{mat}(HR)} - \frac{1}{\mu_{mat0}} \right) \quad (\text{I-20})$$

Où $\mu_{mat}(HR)$ représente la valeur du facteur de résistance à la diffusion de vapeur en fonction de l'humidité relative. Cependant, la relation (I-20) ne permet d'évaluer ce coefficient que pour une humidité relative au regard du test de la coupelle humide. D'autres formes de coefficient de transfert de la phase liquide sont proposées dans la littérature (Zakoune et al., 2012, 2013) :

$$D_l^{HR} = \frac{dw_m}{dHR} \exp(p1 + \frac{p2}{w_m}) \quad (I-21)$$

Avec p1 et p2 deux coefficients d'ajustement.

Enfin, il est fréquemment admis que la thermomigration en phase liquide peut être négligée (Crausse et al., 1996; Lelièvre, 2015; Tran Le, 2010) :

$$D_l^T = 0 \quad (I-22)$$

I.1.2.2. Equations de conservation

Les équations de conservation de l'énergie et de la masse des différents constituants (air sec, vapeur d'eau et eau liquide) peuvent se mettre sous la forme (Lelièvre, 2015) :

$$\frac{dH}{dt} = \nabla(\varphi_{cd} + \varphi_{phase} + \varphi_{adv}) \quad (I-23)$$

$$\frac{d\rho_v}{dt} + \nabla(j_v) = K \quad (I-24)$$

$$\frac{d\rho_l}{dt} + \nabla(j_l) = -K \quad (I-25)$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} + \nabla(j_a) = 0 \quad (I-26)$$

Où H est l'enthalpie volumique définie par :

$$H = \sum \rho_i c_{pi} T \quad (I-27)$$

Avec ρ_i la masse volumique et c_{pi} la chaleur spécifique du constituant i.

Étant donné qu'il est difficile de dissocier les phases vapeur et liquide, les modèles sont fréquemment développés en posant la conservation de l'humidité (Künzel, 1995; Steeman et al., 2010) :

$$\rho_s \frac{\partial w_m}{\partial t} = \nabla(j_v + j_l) \quad (I-28)$$

L'équation (I-28) suppose implicitement que les effets de la gravité, les remontées capillaires ainsi que les phénomènes d'hystérésis sont négligés.

I.1.2.3. Conditions aux limites et aux interfaces

I.1.2.3.a. Echanges entre une paroi et son environnement

Les conditions aux limites thermiques sont la combinaison des échanges convectifs, radiatifs (courtes et grandes longueurs d'onde) et par évaporation/condensation de l'eau en surface des parois (Figure I-5) :

$$\varphi_{T|x=0} = h_{cv} (T_{amb} - T_{|x=0}) + \varepsilon \sigma F (T_{ray}^4 - T_{|x=0}^4) + \alpha E_s + \varphi_{m|x=0} L_v \quad (I-29)$$

Avec h_c le coefficient d'échange par convection, ε l'émissivité GLO et σ la constante de Stefan-Boltzmann.

La valeur du coefficient d'échange par convection peut dépendre de la géométrie, de la température moyenne ou encore des conditions aérauliques. A titre d'exemple, Mirsadeghi *et al.* (Mirsadeghi et al., 2013) recensent et comparent de nombreuses corrélations de coefficient d'échange convectif extérieur. Dans le cas des apports solaires, α et E_s sont respectivement le coefficient d'absorption CLO et l'éclairement solaire reçu par la paroi.

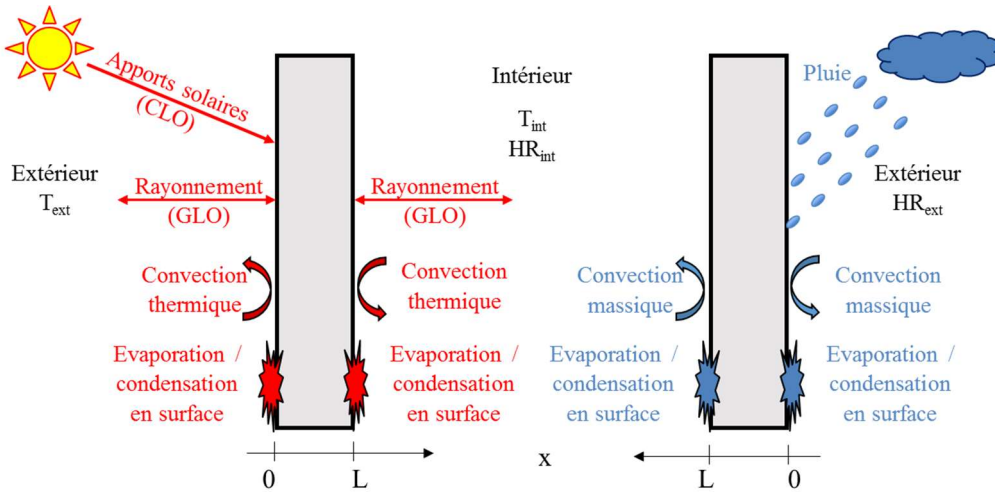


Figure I-5 : Conditions aux limites de parois de bâtiment (gauche : thermique ; droite : hydrique).

Les échanges d'humidité en surface sont la combinaison des échanges par diffusion de vapeur d'eau et des apports d'eau liquide par la pluie :

$$\varphi_{m|x=0} = k_m (C_{amb} - C_{|x=0}) + j_{pluie} \quad (I-30)$$

Ou encore :

$$\varphi_{m|x=0} = k_m \left(\frac{M_v}{R} \right) \left(\left(\frac{HR p_{v_{sat}}(T)}{T} \right)_{amb} - \left(\frac{HR p_{v_{sat}}(T)}{T} \right)_{|x=0} \right) + j_{pluie} \quad (I-31)$$

Avec k_m le coefficient d'échange massique. Celui-ci est fréquemment évalué par l'analogie de Chilton-Colburn. Lorsque le nombre de Lewis est proche de 1, la relation suivante est utilisée (Incropera and De Witt, 1985) :

$$k_m = \frac{h_{cv}}{\rho c_p Le^{2/3}} \quad (I-32)$$

D'autres expressions peuvent aussi être utilisées pour calculer ce coefficient (Steeman et al., 2009).

Les apports liés à la pluie peuvent être pris en compte au travers d'une source d'humidité surfacique :

$$j_{pluie} = Q_{m,s} \quad (I-33)$$

Où $Q_{m,s}$ est exprimé en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

I.1.2.3.b. Echanges aux interfaces entre deux matériaux

Dans le cas de parois multicouches, la plupart des modélisations du bâtiment supposent un contact parfait entre deux matériaux. Toutefois, certaines études ont mis en évidence la limite de cette hypothèse, en particulier à haute humidité relative (De Freitas et al., 1996; Derluyn et al., 2011; Tran Le, 2010). En effet, si on considère que la température et l'humidité relative sont continues, ce n'est pas le cas de la teneur en eau, comme le montre la comparaison des courbes de sorption de deux matériaux (Figure I-6). Pour une même humidité relative, les teneurs en eau ne sont pas égales, l'écart entre les courbes se creuse en fonction de la différence d'hygroscopicité des matériaux ainsi qu'avec l'augmentation de l'humidité relative.

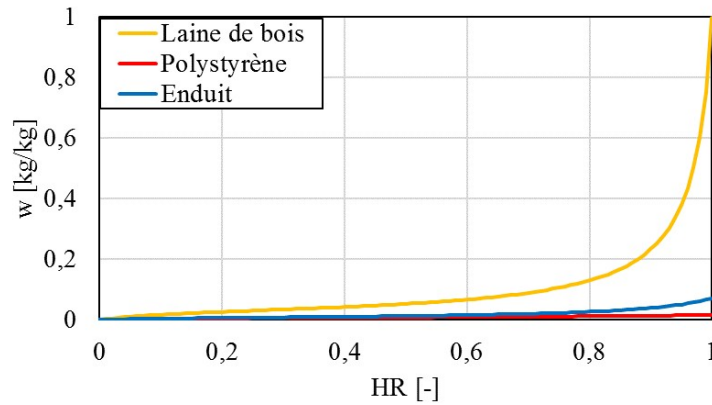


Figure I-6 : Confrontation de courbes de sorption "types" à l'aide du modèle de GAB.

Dès lors, deux hypothèses peuvent être retenues (De Freitas et al., 1996) :

- Le contact est parfait : on considère la continuité des températures et des humidités relatives, et donc de la pression de vapeur et de la pression capillaire ;
- Le contact est imparfait : une résistance de contact thermique et deux résistances de contact hydriques (pour le transfert des phases vapeur et liquide) sont introduites ;

$$R_{th} = -\frac{\Delta T}{\varphi_{th}} \quad (I-34)$$

$$R_{m,L} = -\frac{\Delta P_c}{j_l} \quad (I-35)$$

$$R_{m,v} = -\frac{\Delta p_v}{j_v} \quad (I-36)$$

Avec R_{th} , $R_{m,v}$, $R_{m,L}$ les résistances thermique et hydriques ; ces dernières sont généralement estimées de manière à obtenir une cohérence entre les résultats numériques et expérimentaux (Tran Le et al., 2009).

I.1.3. Cas particulier des espaces d'air (avec ou sans infiltrations)

Dans certaines parois, une cavité d'air, fermée ou ventilée, peut exister. Ces volumes d'air peuvent présenter certains avantages comme la rupture de la pression capillaire et une possibilité de drain de l'eau liquide en surface de la paroi (Straube and Finch, 2009). Ces cavités

peuvent être modélisées selon différentes approches en fonction des hypothèses retenues : modélisation fine des phénomènes mis en jeu par CFD ou modélisation simplifiée par une approche nodale (Figure I-7).

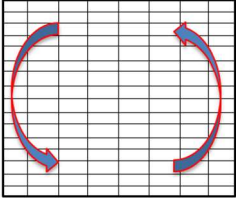
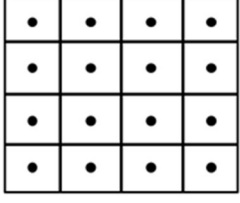
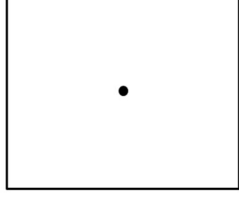
Approche CFD	Approche Nodale (plusieurs nœuds)	Approche Nodale (un nœud)
		
- Temps de calcul (très) long - Meilleure prise en compte de l'écoulement du (des) fluide(s) (Van Belleghem, 2013)	- Temps de calcul courts - Prise en compte de l'écoulement du (des) fluide(s) (Jiru and Haghighat, 2008)	- Temps de calcul plus courts - Précision atténuée (Dos Santos and Mendes, 2009)

Figure I-7 : Représentation schématique des trois approches de modélisation d'une cavité.

Si la première approche apporte un niveau de précision élevée, elle souffre de quelques inconvénients (nombreuses données d'entrée requises, temps de calcul élevé, etc.). A contrario, l'approche nodale à un nœud aboutit à poser un bilan d'énergie et de masse au sein de la cavité de la forme :

$$V_{cav} \left(C_{cav} \frac{dT_{cav}}{dt} + (L_{v_0} + c_{p_v} (T_{cav} - T_{ref})) \frac{M_v}{R \cdot T_{cav}} \left(\frac{dp_{v,cav}}{dt} - \frac{p_{v,cav}}{T_{cav}} \frac{dT_{cav}}{dt} \right) \right) = \sum (\varphi_{T,cav} S_{cav}) + Q_c \quad (I-37)$$

$$V_{cav} \frac{M_v}{R \cdot T_{cav}} \left(p_{v,sat}(T_{cav}) \frac{dHR_{cav}}{dt} + HR_{cav} \left(\frac{dp_{v,sat}(T_{cav})}{dT} - \frac{p_{v,sat}(T_{cav})}{T_{cav}} \right) \frac{dT_{cav}}{dt} \right) = \sum (\varphi_{m,cav} S_{cav}) + Q_m \quad (I-38)$$

Où $\varphi_{T,cav}$ et $\varphi_{m,cav}$ sont les flux de chaleur et d'humidité échangés avec les parois de la cavité :

$$\varphi_{T,cav} = h_{cv,cav} (T_{surf} - T_{cav}) + \varphi_{m,cav} L_{v_0} \quad (I-39)$$

$$\varphi_{m,cav} = k_{m,cav} \left(\frac{M_v}{R} \right) \left(\left(\frac{HR p_{v,sat}(T)}{T} \right)_{surf} - \left(\frac{HR p_{v,sat}(T)}{T} \right)_{cav} \right) \quad (I-40)$$

Avec $h_{cv,cav}$ et $k_{m,cav}$ les coefficients d'échanges par convection thermique et massique en surface, dépendants des aspects géométriques et des mouvements d'air au sein de la cavité.

Q_c et Q_m sont les termes sources/puits. Dans le cas d'une cavité fermée, ces termes sont nuls. A l'inverse, en présence d'écoulements d'air (ex : bardage ventilé), ces termes peuvent être exprimés sous la forme (Künzel, 1995) :

$$Q_c = Q_{air} \rho (H_{ext} - H_{cav}) \quad (I-41)$$

$$Q_m = Q_{air} (\rho_{ext} - \rho_{cav}) \quad (I-42)$$

Avec Q_{air} le débit d'air volumique.

Bien que cette approche soit plus simple, Van Belleghem *et al.* ont montré qu'elle pouvait conduire à une surestimation du séchage et de l'humidification des parois à lame d'air ventilée, en comparaison avec un modèle CFD (Van Belleghem et al., 2015).

I.2. Les pathologies liées à l'humidité et les indicateurs de durabilité associés

L'humidité est l'une des principales causes de dégradations des parois de bâtiments. D'une part, celle-ci altère les propriétés des matériaux (ex : augmentation de la conductivité thermique des isolants), d'autre part, elle induit des problèmes esthétiques (taches, fissuration des enduits...) et biologiques (développement de micro-organismes).

Il est donc nécessaire de prévoir ces risques afin d'améliorer la conception des ouvrages. Dans cette partie, des indicateurs de durabilité plus ou moins complexes issus de la littérature sont décrits.

I.2.1. La condensation

I.2.1.1. En surface intérieure et extérieure

I.2.1.1.a. Le potentiel de condensation en surface (CP)

La condensation en surface est définie lorsque l'humidité relative atteint 100%. Il existe différentes façons d'y parvenir (Figure I-8) : une baisse de la température de l'air à teneur en eau constante, une augmentation de la teneur en eau à température constante ou encore par combinaison des deux.

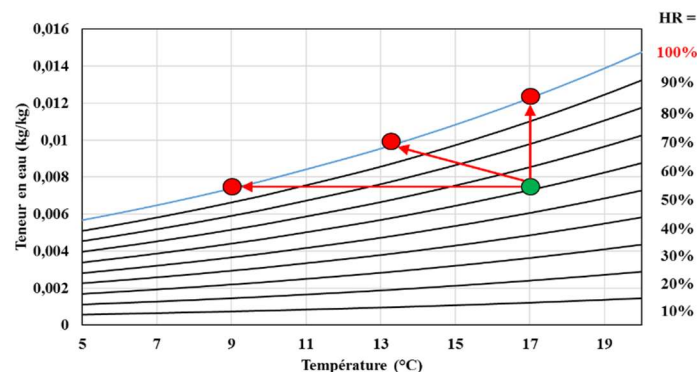


Figure I-8 : Illustration de la variation d'humidité relative suite à une baisse de température ($w=cste$).

Généralement la première approche est considérée et le risque de condensation peut être quantifié à l'aide d'un *potentiel de condensation en surface* défini par (Eva Barreira et al., 2013; Zheng et al., 2004) :

$$CP = p_{v,air} - p_{sat,surf} \quad (I-43)$$

Avec $p_{v,air}$ la pression de vapeur à proximité de la surface et $p_{vsat,surf}$ la pression de vapeur saturante en surface. Lorsque ce potentiel est positif, il existe un risque de condensation, à l'inverse, s'il est négatif aucun risque n'est attendu. Un indicateur similaire comparant la température de surface de la paroi avec la température de rosée de l'air peut être parfois rencontré (Zillig et al., 2003). Par ailleurs, ces deux indicateurs peuvent être intégrés sur le temps où un risque est rencontré :

$$CPacc = \int CP dt \approx \sum CP \Delta t \quad (I-44)$$

1.2.1.1.b. Le ratio de différence de température (TDR)

Dans le cas des surfaces intérieures de bâtiment, le TDR (Temperature Difference Ratio) prend en compte la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, vis-à-vis de la température de surface intérieure (EN ISO 13788, 2001; Oreszczyn and Pretlove, 1999) :

$$TDR = \frac{T_{int} - T_{surf,int}}{T_{int} - T_{ext}} \quad (I-45)$$

Les situations sont considérées comme critiques dès lors que ce ratio est supérieur à 0,3. Cet indicateur peut être extrapolé pour des assemblages multidimensionnels ou être utilisé pour déterminer l'impact d'un pont thermique par exemple. Cependant, le principal inconvénient du TDR vient du fait que l'humidité relative n'est pas prise en compte.

1.2.1.2. Au sein de la paroi : Le diagramme de Glaser

A l'instar de la condensation superficielle, la condensation interstitielle peut apparaître au cœur de la paroi dès lors que la pression de vapeur atteint la pression de vapeur saturante. Ces risques de condensation interstitielle peuvent être évalués en régime permanent par la méthode du diagramme de Glaser, en comparant les profils de pression de vapeur et de pression de vapeur saturante (Figure I-9). Cette méthode peut être appliquée pour des conditions critiques ou mois par mois, comme suggéré dans la norme ISO 13788.

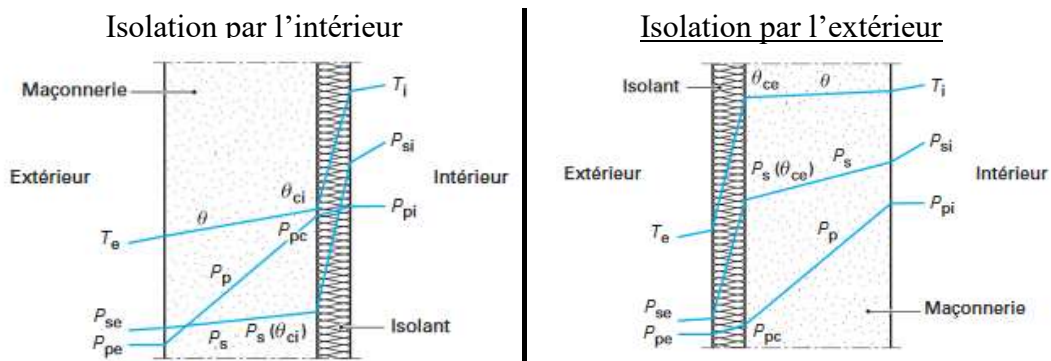


Figure I-9 : Exemples d'utilisation du diagramme de Glaser (Dahan, 2008).

Cependant, elle repose sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices (Galbraith and McLean, 1990; Hens, 2010) :

- Etude en régime permanent ;
- Prise en compte uniquement des transferts de vapeur par diffusion et des transferts thermiques par conduction ;
- Les propriétés des matériaux (perméabilité à la vapeur d'eau et conductivité thermique) sont supposées constantes ;
- Les conditions limites définies pour les calculs sont issues de moyennes mensuelles...

En conséquence, cette méthode ne permet que d'identifier les zones à risques et reste un outil d'évaluation plutôt que de prédiction. En effet, les différentes hypothèses de modélisation ne permettent pas de refléter le comportement thermohydrique d'une paroi. La diffusion liquide n'étant pas prise en compte, la répartition de l'humidité ne peut être représentative, surtout pour de hauts niveaux d'humidité relative (où la migration d'eau liquide devient généralement plus importante que la diffusion de vapeur). Par ailleurs, la prise de moyennes mensuelles, pour établir les conditions climatiques, ne reflète pas les conditions réelles que subit la paroi (EN ISO 13788, 2001).

Ces hypothèses simplificatrices mettent en avant la nécessité de considérer l'aspect transitoire du comportement thermohydrique d'une paroi. L'objectif étant d'obtenir des prédictions plus précises et plus réalistes (Hopfe and Hall, 2013). D'une part, les conditions limites sont mieux appréhendées (températures et humidités relatives extérieure et intérieure, rayonnement solaire, pluies battantes, sous-refroidissement nocturne...). D'autre part, les conditions initiales peuvent permettre de prendre en compte un comportement plus réaliste de la paroi (Cascione et al., 2017; EN ISO 15026, 2008; McLeod and Hopfe, 2013). Enfin, Cascione *et al.* comparent les régimes stationnaire et transitoire pour évaluer les risques d'humidité au sein de parois isolées (Cascione et al., 2017). Leurs conclusions mettent en avant que la prédiction des risques peut être différente selon le régime choisi. Toutefois, les simulations dynamiques nécessitent plus de paramètres d'entrée ainsi qu'une bonne appréhension des propriétés matériaux.

I.2.2. Les indicateurs de développement biologique

Le développement de moisissures a fait l'objet de nombreuses études et a conduit à l'établissement de courbes de niveau (isopleth), qui définissent un seuil au-delà duquel un risque de développement de moisissure existe. Ces courbes peuvent être définies par la température, l'humidité relative, le temps d'exposition, la nature du matériau... A titre d'exemple, l'Eq. (I-46) définit la courbe de niveau délimitant les conditions critiques de développement de moisissure en fonction d'un couple température-humidité relative :

$$HR_{crit} = A + B (T^2 - 54 T) \quad (I-46)$$

Où A et B sont calculés tels que :

$$A = HR_{crit}(T_1) - B * (T_1^2 - 54 * T_1) \quad (I-47)$$

$$B = \frac{HR_{crit}(T_1) - HR_{crit}(T_2)}{T_1^2 - T_2^2 - 54 * (T_1 - T_2)} \quad (I-48)$$

Avec T_{crit} , HR_{crit} des coefficients qui peuvent être déterminés sur la base d'expériences (Johansson et al., 2013). Même si plusieurs courbes sont disponibles dans la littérature, Vereecken et al (2012) constatent une bonne concordance entre elles.

Cependant, le développement de moisissures peut se caractériser également par leur taux de croissance. Des exemples de courbes de développement présentées en Figure I-10 permettent d'évaluer l'évolution en fonction des conditions subies.

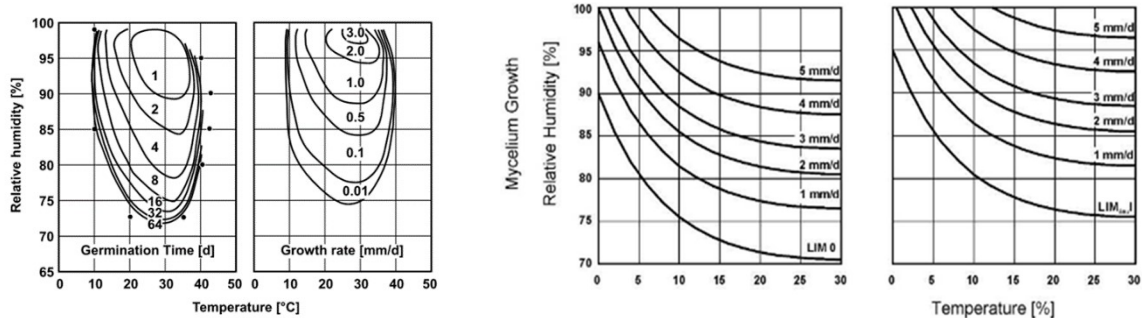


Figure I-10 : Exemples d'isocourbes de développement (Krus et al., 2001; Sedlbauer, K., 2011).

I.2.2.1. Temps d'humidification (TOW – Time Of Wetness)

Le concept du temps d'humidification est à la base exploité pour la corrosion des aciers (EN ISO 9223, 1992) et définit le temps durant lequel une surface métallique est susceptible d'être corrodée. Une évolution de la norme définit des conditions plus réelles à l'apparition de corrosion et fixe un niveau d'humidité relative critique. Une valeur de référence souvent retrouvée se situe à 80% d'humidité relative pour une température de 0°C. Dans le bâtiment, son utilisation peut être retrouvée dans les travaux de Salonvaara *et al.* où les auteurs évaluent les dommages potentiels d'un constituant de la paroi suivant son orientation (Salonvaara et al., 2010). Le TOW est défini par l'intégration du temps, en heure, où un couple température-humidité relative est supérieur à un niveau critique :

$$TOW = \sum t_{HR,T > HR_{crit}, T_{crit}} \quad (I-49)$$

L'inconvénient de cet outil est qu'il ne prend pas en compte l'éloignement entre un point et la courbe limite. En complément de cet indicateur, on peut donc utiliser l'index RHT. Celui-ci est défini par (Kočí et al., 2014; Salonvaara et al., 2010) :

$$RHT = \sum (T - T_l)(HR - HR_l) \quad (I-50)$$

Où T_l et HR_l sont les température et humidité relative limites de références (0°C, 80%).

I.2.2.2. Le modèle VTT et l'indice de développement M

Le modèle VTT a été développé par Hukka et Viitanen pour prédire le développement de moisissure sur du bois (Hukka and Viitanen, 1999). Un indice de développement M est défini tel que :

- $M=0$: Pas de développement ;

- M=1 : Présence légère en surface du matériau (au microscope), cette valeur est généralement considérée comme le seuil à ne pas dépasser ;
- M=2 : 10% de la surface du matériau est recouverte de moisissure ;
- M=3 : Moins de 50% de la surface du matériau est recouverte (au microscope) ;
- M=4 : Plus de 50% (mais moins de 70%) de la surface du matériau est recouverte (au microscope) ;
- M=5 : Plus de 70% de la surface du matériau est recouverte (visible à l'œil nu) ;
- M=6 : Près de toute la surface du matériau est recouverte.

La variation temporelle de M est donnée par :

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} \frac{k_1 k_2}{t_{M=1}} & | \text{ Quand } HR \geq HR_{crit} \\ k_3 & | \text{ Quand } HR < HR_{crit} \end{cases} \quad (I-51)$$

Avec HR_{crit} une humidité relative critique (semblable à la courbe isopleth) définie par :

$$HR_{crit} = \begin{cases} -0.00267 T^3 + 0.16 T^2 - 3.13 T + 100 & | \text{ Pour } T < 20^\circ C \\ 80 & | \text{ Pour } T > 20^\circ C \end{cases} \quad (I-52)$$

Et trois coefficients (k_1 , k_2 , k_3) qui permettent de tenir compte du taux de croissance en cas de conditions favorables, de pondérer l'évolution de l'indice vis-à-vis de sa valeur maximale et d'intégrer la décroissance provoquée par des conditions défavorables au développement respectivement. Ces trois coefficients k_1 , k_2 et k_3 sont définis tels que :

$$k_1 = \begin{cases} 1 & | \text{ Quand } M < 1 \\ \frac{2}{(t_{M=3}/t_{M=1}) - 1} & | \text{ Quand } M \geq 1 \end{cases} \quad (I-53)$$

$$k_2 = \begin{cases} 1 & | \text{ Quand } M < 4 \\ \max(1 - \exp(2.3(M - M_{max})), 0) & | \text{ Quand } M \geq 4 \end{cases} \quad (I-54)$$

$$k_3 = \begin{cases} -0.032 \times 7 & | \text{ Quand } t - t_{nf} \leq 6h \\ 0 & | \text{ Quand } 6h < t - t_{nf} \leq 24h \\ -0.016 \times 7 & | \text{ Quand } t - t_{nf} \geq 24h \end{cases} \quad (I-55)$$

$t_{M=1}$ et $t_{M=3}$ sont les temps (en semaines) nécessaires pour atteindre un indice M=1 et M=3 respectivement. Pour plus de détails, le lecteur peut se reporter à (Hukka and Viitanen, 1999; Vereecken and Roels, 2012).

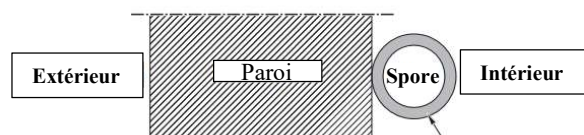
Bien que ce modèle reste simple et tienne compte de plusieurs paramètres prépondérants au développement de moisissures, il nécessite la connaissance de plusieurs variables propres à chaque matériau et une tentative d'extrapolation de ce modèle est proposée pour d'autres matériaux de construction (Viitanen et al., 2010). Par ailleurs, Colinart *et al.* montrent que le coefficient correcteur permettant d'intégrer la décroissance des moisissures (k_3) influence largement l'évolution de l'indice M (Thibaut Colinart et al., 2017).

I.2.2.3. Modèle Wufi-Bio

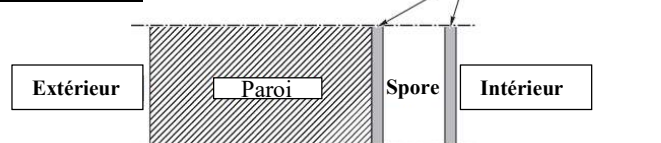
Le modèle WUFI biothermohydrique permet de prédire le taux de croissance des moisissures. Une couche de matériau, représentant les moisissures, est définie et des propriétés

thermiques et hydriques lui sont affectée (Krus et al., 2001) (Figure I-11). Dans un premier temps, les transferts de chaleur et de masses sont effectués (Modèle 1D - Figure I-11). Ensuite les valeurs calculées de part et d'autre du matériau équivalent (=moisissures) sont utilisées comme conditions aux limites pour déterminer la germination des spores (Modèle de la spore - Figure I-11).

Modèle proche de la réalité (taille de la spore exagérée)



Modèle 1D



Modèle de la spore

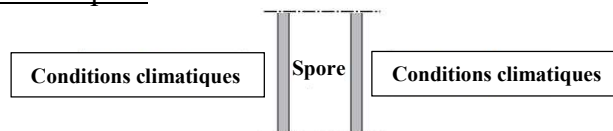


Figure I-11 : Représentation du modèle de la spore (Sedlbauer et al., 2001).

En comparant différents modèles de développement de moisissures, Vereecken *et al.* montrent que des différences peuvent être obtenues entre le modèle WUFI-Bio et le modèle VTT (Vereecken et al., 2011). Ces écarts sont dus aux différentes hypothèses choisies. Par exemple, le modèle WUFI-Bio repose sur des caractéristiques thermohydriques, dont la connaissance est incertaine, et ne tient pas compte de la décroissance des germes durant les conditions défavorables. Par ailleurs, la validité de ce modèle atteint ses limites au-delà d'un certain seuil de croissance (Vereecken et al. 2012).

I.3. Etat de l'art sur les études d'isolation par l'extérieur

En Europe, la plupart des travaux d'isolation par l'extérieur sont effectués à l'aide de systèmes ETICS ou à l'aide de systèmes à bardage ventilé (Figure I-12).

Les parois ETICS peuvent se différencier en fonction des isolants (isolant fibreux type laine minérale ou isolants « pleins » type PSE) ou bien de l'enduit de revêtement employé. Toutefois, pour ce dernier, les propriétés thermohydriques des produits disponibles sur le marché sont équivalentes (Barreira and De Freitas, 2015).

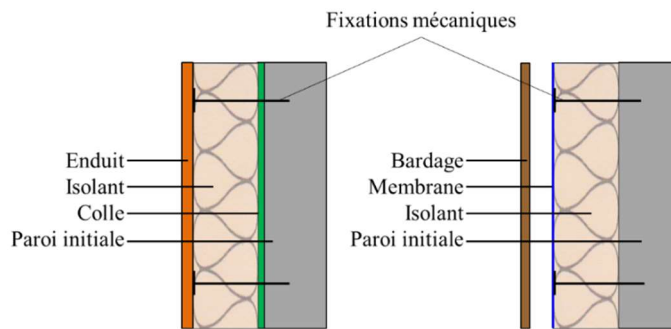


Figure I-12 : Schémas des deux types d'isolation par l'extérieur étudiés

Les parois disposant d'un bardage ventilé peuvent aussi être constituées de différents matériaux, que ce soit pour l'isolation, le frein vapeur ou le bardage. Par ailleurs, il existe plusieurs types de bardages (Figure I-13), les différences majeures portent sur les matériaux (bois, polymère, métal...), mais aussi sur les différentes ouvertures dont il dispose (Marinosci et al., 2011; Straube and Finch, 2009). On peut classer les bardages selon les ouvertures existantes : ils peuvent avoir une unique ouverture en bas (bardage aéré) ou une ouverture en haut et en bas (bardage ventilé). Des espaces peuvent aussi être créés entre les différentes jointures (à jointures ouvertes) (Labat et al., 2012; Suresh Kumar, 2000), ou non (à jointures fermées, bardages continus). Enfin, la maintenance d'un tel système d'isolation se révèle moins coûteuse et plus facile qu'un système ETICS (Stazi et al., 2013).

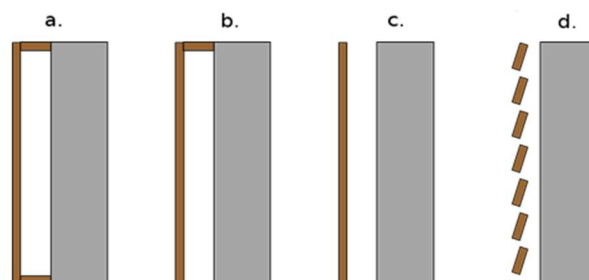


Figure I-13 : Différents types de bardage (a : fermé; b : aéré; c : ventilé; d : jointures ouvertes)

I.3.1. Etude thermique et intérêt énergétique

En hiver, l'isolation permet de limiter les déperditions de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur. Toutefois, les avantages d'une ITE, par rapport à une ITI, se portent sur la diminution des ponts thermiques (continuité de l'isolation) et sur un meilleur usage de l'inertie de la paroi (Rouni and Kirn, 2006). Cependant, les attaches utilisées pour le maintien du complexe d'isolation à la paroi sont autant de ponts thermiques qui peuvent avoir une influence importante sur la consommation du bâtiment (Petranek et al., 2013). De plus, les apports solaires des périodes estivales peuvent induire des surchauffes intérieures (Chvatal and Corvacho, 2009; Stazi et al., 2013). Toutefois, des études ont permis de mettre en avant le bénéfice énergétique d'un système ventilé, en comparaison avec un système traditionnel ETICS. En été, le bardage et la ventilation permettent de limiter les apports solaires, réduisant ainsi les températures intérieures (Gagliano et al., 2016; Stazi et al., 2013).

I.3.2. Etude thermohydrrique et risques

Comportement thermohydrrique (ETICS/Bardage)

Si la question de l'intérêt énergétique d'une ITE se pose, la question de la durabilité, notamment au regard de l'humidité, reste essentielle. A titre d'exemple, de nombreux problèmes liés à l'humidité peuvent être rencontrés dans le cas des systèmes ETICS, avec pour conséquence une réduction de 12% de la durabilité (Ximenes et al., 2015).

La rénovation des murs d'un bâtiment existant engendre une modification du comportement thermohydrrique des parois (Šadauskienė and Šeduikytė, 2014). L'ajout de constituants, qu'ils soient fortement ou faiblement perméables au passage de la vapeur, ajoute une résistance hydrrique à la paroi. Plus la paroi a une épaisseur d'air équivalente élevée et plus le temps nécessaire à l'évacuation de l'humidité est important. Par ailleurs, l'humidité contenue initialement dans le mur ou introduite par un système rapporté doit être évacuée. Dans le cas contraire, elle s'accumule et divers problèmes peuvent survenir (Hradil et al., 2014; Ramos et al., 2013). A titre d'exemple, un mur en bloc de béton cellulaire peut nécessiter plusieurs années avant d'évacuer la majeure partie de son eau de construction (Karagiozis and Salonvaara, 2001). L'étude de Liisma *et al.* (Liisma et al., 2014) montre, par exemple, que la teneur en eau initiale des matériaux va modifier la tenue mécanique des systèmes ETICS. Lorsque le PSE est utilisé, plus l'humidité relative initiale est élevée et plus la tenue mécanique de l'adhésif est importante, à l'inverse, pour des panneaux en isolant fibreux, la tenue mécanique de l'adhésif a tendance à diminuer avec des humidités relatives importantes. De fait, si une paroi n'est pas sèche lors de l'application de systèmes d'isolation, l'eau de gâchage peut nuire à la durabilité de l'installation. Enfin, la durée de vie d'un système d'isolation par l'extérieur est influencée par les défauts de conception (jointure entre les panneaux d'isolant par exemple, fixations mécaniques...) et de mise en œuvre (défauts lors de la pose, protections des matériaux face aux intempéries...) ainsi qu'aux défauts liés au cycle de vie des matériaux (vieillessement, entassement ou dommages liés à l'humidité) (Aïssani et al., 2016; Sulakatko et al., 2015)

Condensation superficielle

La condensation en surface des systèmes ETICS apparaît le plus souvent la nuit, lorsque la température de surface atteint la température de rosée (Eva Barreira et al., 2013; Barreira and De Freitas, 2008). En effet, quand le ciel est dégagé, les échanges radiatifs de grande longueur d'onde entre la paroi et la voûte céleste sont importants et engendrent une diminution conséquente de la température de surface. De ce fait, les facteurs prépondérants sont les conditions météo, l'émissivité GLO du matériau de parement et la présence d'obstacles aux échanges radiatifs (Barreira and De Freitas, 2014). Ainsi, une forte émissivité GLO, une humidité relative extérieure élevée, une faible couverture nuageuse ou l'absence de vent (limitant les échanges par convection) entraînent une élévation du risque de condensation en surface extérieure. La condensation en surface, qui favorise le développement biologique (Künzel et al., 2006), est donc en partie responsable de la détérioration de l'aspect esthétique d'une paroi (décoloration ou changement de couleur).

Condensation interstitielle et/ou Accumulation d'humidité (autre qu'initiale)

Afin d'éviter la formation de condensation interstitielle, une paroi doit pouvoir évacuer l'eau qu'elle absorbe lorsque les conditions sont défavorables (humidité relative – intérieure et/ou extérieure – élevée, pluie, condensation en surface...). Il est donc nécessaire d'assurer un équilibre entre l'eau qui est accumulée pendant les saisons froides et l'eau qui est évacuée pendant les saisons chaudes. Si cet équilibre n'est pas respecté, l'accumulation d'eau peut diminuer les performances de la paroi. Les paramètres qui influencent la formation de condensation sont (Baran et al., 2016) : les conditions climatiques intérieure et extérieure (température, humidité relative, sources de vapeur intérieure, ventilation...) ; les propriétés matériaux (porosité, hygroscopicité et perméabilité à la vapeur) ; la sévérité du climat (rayonnement solaire, pluie, vent) ; les sources d'humidité (remontées capillaires, fuite de tuyauterie...).

Des règles de conception suggèrent de limiter la diffusion de la vapeur vers l'extérieur, afin d'éviter tout risque de condensation interstitielle. Dans le cas des systèmes ETICS, l'isolant (PSE ou panneaux rigides d'isolant fibreux) fait généralement office de frein vapeur. Dans le cas des systèmes sous bardages, la règle professionnelle des 2/3 – 1/3 suggère qu'un pare-vapeur (membrane ou panneau) doit être placé au tiers de l'isolant (Figure I-14).

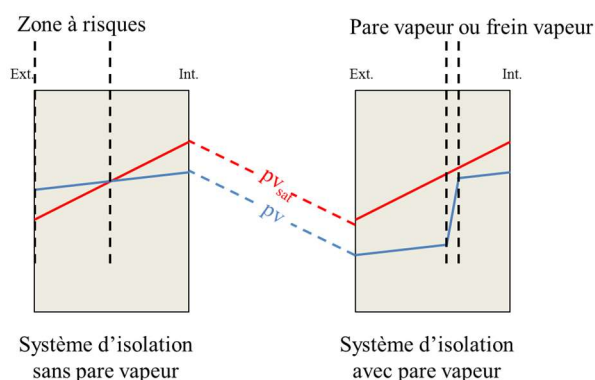


Figure I-14 : Illustration des bénéfices d'un pare vapeur ou d'un frein vapeur sur la condensation dans la masse

Cependant, des études ont montré que l'utilisation d'un frein vapeur était préférée à celle d'un pare-vapeur, de plus, le positionnement et le type de membrane utilisé peut induire des risques de condensation (Singh et al., 2010; Straube, 2001).

Enfin, la présence de protection ajoutant un système de lame d'air ventilée à la paroi permet de limiter les risques de condensation interstitielle (Baran et al., 2016).

Phénomènes de séchage

Alors que les phénomènes de condensation concernent les sources d'humidité, le potentiel de séchage exprime la capacité de la paroi à évacuer l'humidité par évaporation en surface. Une paroi peut sécher si la pression de vapeur saturante en surface est supérieure à la pression de vapeur extérieure (Eva Barreira et al., 2013; Hagentoft, 2001). Ce séchage peut s'effectuer par les surfaces côté intérieur, côté extérieur ou les deux. L'agencement de constituants de la paroi peut favoriser, ou non, le flux de vapeur vers l'une ou l'autre des surfaces. Les études de Karagiozis et Salonvaara montrent que l'ajout d'un système d'isolation sur une paroi diminue son potentiel de séchage (Karagiozis and Salonvaara, 2001). Ceci s'explique par l'augmentation de la résistance à la migration d'eau de la paroi (Kunzel and Leimer, 2001).

Dans le cas où un mur sèche vers l'intérieur, une humidité supplémentaire est ajoutée à l'ambiance, si cet apport est trop important des conditions d'inconfort peuvent être ressenties. L'humidité doit alors être évacuée au moyen de la ventilation (Salonvarra et al., 2007; Straube and Finch, 2009), entraînant une consommation énergétique supplémentaire. Lorsque la paroi sèche par l'extérieur, les facteurs influant sur le séchage varient selon le type de paroi.

Pour les systèmes ETICS, les facteurs qui influencent ce potentiel sont les conditions climatiques (la vitesse et l'orientation du vent ; température et humidité relative extérieures, couverture nuageuse...) et l'absorptivité CLO de l'enduit extérieur (influence sur la température de surface extérieure, et donc sur la pression de vapeur saturante en surface) (Eva Barreira et al., 2013; Barreira and De Freitas, 2015). L'orientation de la paroi a donc une influence sur son potentiel de séchage. Les façades les plus exposées au rayonnement solaire évacuent plus facilement l'humidité, car les températures de surface y sont plus importantes (Barreira and De Freitas, 2013). Par ailleurs, les travaux de Barreira *et al.* mettent en avant que les propriétés thermohydriques de la couche extérieure peuvent influencer le potentiel de séchage (migration de l'eau liquide et diffusion de la vapeur). Celui-ci est réduit avec la diminution de la perméabilité à la vapeur d'eau de ses constituants (E. Barreira et al., 2013; Barreira and De Freitas, 2015). En revanche, même si le séchage d'une paroi contribue à la durabilité d'un système, des phénomènes d'évaporation trop importants peuvent participer à la détérioration des enduits de parement des systèmes ETICS (Ramanauskas J. and Stankevicius V., 1998).

Dans le cas des systèmes sous bardage, le parement limite les apports solaires, mais la définition de la lame d'air est importante sur le séchage de la paroi. La littérature met en avant que le potentiel de séchage d'un bardage ventilé est plus efficace que celui des bardages aérés ou fermés (Künzel et al., 2008; Salonvarra et al., 2007; Straube and Finch, 2009). En effet, les effets de tirage thermique (fortement influencés par l'éclairement solaire) et les différences de pressions dues aux effets du vent sont les deux forces motrices de l'écoulement d'air dans ces cavités (Khadra et al., 2016; Labat et al., 2012; Straube and Finch, 2009). Ce flux d'air favorise le séchage lorsque les conditions sont favorables. A l'inverse, si les conditions extérieures sont défavorables, la lame d'air représente une source d'humidité pour la paroi.

Conclusion

La conception et la pose d'une paroi doit prendre en compte les phases d'humidification-séchage. En effet, les problèmes d'humidification par condensation doivent être évités lors des phases de conception. Toutefois, si ceux-ci sont rencontrés du fait de défauts de mise en œuvre, de vieillissement, ou d'infiltrations par exemple, l'humidité doit pouvoir s'évacuer. Alors que le séchage des systèmes ETICS dépend majoritairement des conditions climatiques, celui des systèmes sous bardage dépend également de la lame d'air ventilée. La perméabilité des matériaux ainsi que la lame d'air ventilée peuvent alors être exploités lors de la conception des parois pour maximiser le potentiel de séchage de l'enveloppe.

I.4. Conclusion et positionnement

Ce chapitre a permis d'introduire les phénomènes liés au transfert de chaleur et d'eau au sein des parois opaques de bâtiment. Par ailleurs, la description de modèles classiquement utilisés pour la prédiction numérique de ces transferts a montré la nécessité de connaître un ensemble de propriétés thermohydrriques.

L'état de l'art sur les systèmes d'isolation a mis en évidence d'une part que l'équilibre thermohydrrique des enveloppes pouvait être modifié suite à l'application d'une isolation thermique par l'extérieur (ITE). D'autre part, le comportement thermohydrrique de ces systèmes d'ITE était dépendant de facteurs comme les conditions climatiques ou leur design (type et agencement des matériaux, mode de mise en œuvre et de fixation). Par ailleurs, un certain nombre d'études ont fait état de risques de pathologies sur ces parois en lien avec l'humidité.

Pour prolonger et compléter cet état de l'art, cette thèse vise à évaluer si des risques liés à l'humidité peuvent être rencontrés dans l'enveloppe d'un bâtiment isolé par l'extérieur sous un climat océanique. Nous nous intéressons en particulier aux risques de condensation superficielle et interstitielle. Par ailleurs, les risques de développement biologiques sont évalués en condition réelle à l'aide d'une courbe limite, l'indicateur TOW est retenu dans ce cas. Trois systèmes d'ITE seront étudiés : un système de type ETICS, qui peut être vu comme un système de référence, et deux systèmes sous bardage, qui présentent l'originalité d'assurer l'étanchéité à l'air du bâtiment par l'extérieur. Ces deux systèmes se distinguent par la nature des isolants employés : de la laine de verre pour l'un et des isolants biosourcés pour l'autre. Au final, les travaux développés dans cette thèse doivent apporter des éléments de réponse aux problématiques suivantes :

- Quelle sont les influences des conditions de pose et du type d'isolant constituant les systèmes ITE sur la performance énergétique ainsi que sur la durabilité de l'enveloppe ?
- Est-ce que des isolants biosourcés peuvent être intégrés durablement dans des systèmes ITE sujets à un climat océanique ?

Chapitre II : Etudes expérimentales de systèmes ITE

Ce chapitre concerne l'étude expérimentale, dans une chambre biclimatique, de la réponse thermohydrrique de solutions d'isolation thermique par l'extérieur (ITE). Trois solutions sont mises en œuvre pour isoler une paroi parpaing existante : un système ETICS (mise en œuvre par voie humide) et deux systèmes sous bardage (mise en œuvre par voie sèche), dont un incluant des matériaux biosourcés.

Dans un premier temps, le design de ces systèmes et les propriétés thermiques et hydriques des matériaux sont présentés. Dans un second temps, on s'attache à présenter le dispositif expérimental d'étude et l'instrumentation mise en œuvre (thermocouples, capteurs d'humidité, fluxmètre). Enfin, une analyse des résultats expérimentaux est proposée en trois temps :

- Le suivi de l'état hydrique de la paroi parpaing avant la mise en œuvre des systèmes d'ITE et la conséquence de la pose (Section III),
- La réponse thermohydrrique des systèmes d'ITE à une sollicitation « modérée » en température et humidité relative, c'est-à-dire sans risques liés à l'humidité (Section IV),
- La réponse thermohydrrique des systèmes d'ITE lorsque les conditions climatiques sont susceptibles de conduire à des risques de condensation (Section V).

II.1. Systèmes d'isolation et matériaux employés

Dans le cadre de cette étude, trois systèmes ITE sont installés sur une paroi parpaing, dont la face extérieure est recouverte d'un enduit-ciment.

La composition de ces systèmes et leur implantation sont tout d'abord présentées. Par la suite, la caractérisation thermique et hydrique des matériaux est décrite.

II.1.1. Présentation des solutions d'ITE étudiées

Les trois systèmes ITE étudiés sont :

- Un système « polystyrène sous enduit » (type ETICS) composé de deux panneaux de polystyrène collés entre eux et de deux couches d'enduit (dégrossi et finition) appliquées sur la face extérieure du système (Figure II-1-A).
- Deux systèmes sous bardage composés, de l'intérieur vers l'extérieur, d'une première couche d'isolant, d'un panneau de contreventement, d'une seconde couche d'isolant, insérée dans une ossature en bois, d'un pare-pluie, d'une lame d'air ventilée et enfin de bardages. L'originalité de cette solution tient dans le fait d'une part que l'isolation thermique est associée à une ossature bois (Figure II-1-B et Figure II-1-C), et d'autre part que l'étanchéité à l'air est effectuée par l'extérieur. Ces deux systèmes se distinguent par la nature des isolants et des bardages employés :

- Dans le premier, deux types de panneaux de laines de verre ont été utilisés : de l'Isofaçade® avec des propriétés de résistance au feu et d'imputrescibilité, et de l'Isoconfort® en seconde couche. Un bardage bois est associé à ce système (Figure II-1-B).
- Le second système intègre des isolants biosourcés : de la ouate de cellulose assure la continuité de l'isolation avec le mur existant alors que de la laine de bois est associée à l'ossature bois (Figure II-1-C). Le bardage utilisé est en fibres-ciment.

Un aperçu des trois systèmes ITE est présenté sur la Figure II-1. On peut notamment observer que la laine de verre remplit de manière inhomogène l'ossature bois en raison de sa forte compressibilité.

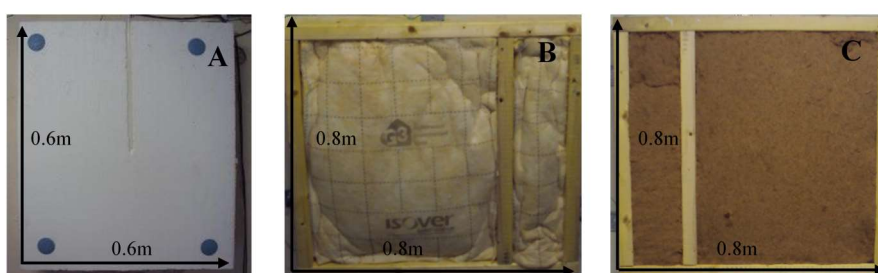


Figure II-1 : Aperçu des différents isolants utilisés dans les systèmes d'ITE (A : polystyrène ; B : laine de verre ; C : laine de bois).

Chacune des solutions d'ITE a été dimensionnée pour présenter une résistance thermique théorique supérieure à $3.5 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ (Tableau II-1). L'épaisseur de chaque système ITE, hors bardage, est de 15cm.

Système	Composition	$\lambda \text{ [W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	$R_{th} \text{ [K.m}^2.\text{W}^{-1}]$	$S_d \text{ [m]}$	$S \text{ [m}^2]$
PSE	Polystyrène (13.5cm) Enduits (1.6cm)	0.035 0.4	3.9	5.9	0.6 x 0.6
Laine de verre	Laine de verre (4cm) OSB (1cm) Laine de verre (10cm)	0.035 0.1 0.035	4.1	1	0.8 x 0.8
Biosourcé	Ouate de cellulose (4cm) OSB (1cm) Laine de bois (10cm)	0.039 0.13 0.042	3.5	1.2	0.8 x 0.8

Tableau II-1 : Caractéristiques des 3 systèmes ITE.

Ces trois systèmes ont été rapportés sur un mur en parpaing creux (B40) d'une surface de $2\text{m} \times 2.1\text{m}$, enduit sur sa surface extérieure (Monolor ZF) et laissée brute sur sa surface intérieure. La Figure II-2 montre la localisation des systèmes et un aperçu des parois testées. Par ailleurs, une partie non isolée du mur parpaing a été conservée. Enfin, les espaces entre chaque système sont comblés par une isolation thermique et une étanchéité à la vapeur complémentaire afin de limiter les effets de bords.

Par la suite, les trois systèmes d'ITE sont nommés respectivement « Paroi PSE », « Paroi Laine de verre » et « Paroi Biosourcée » et la partie de mur non isolée est nommée « Paroi Parpaing ».

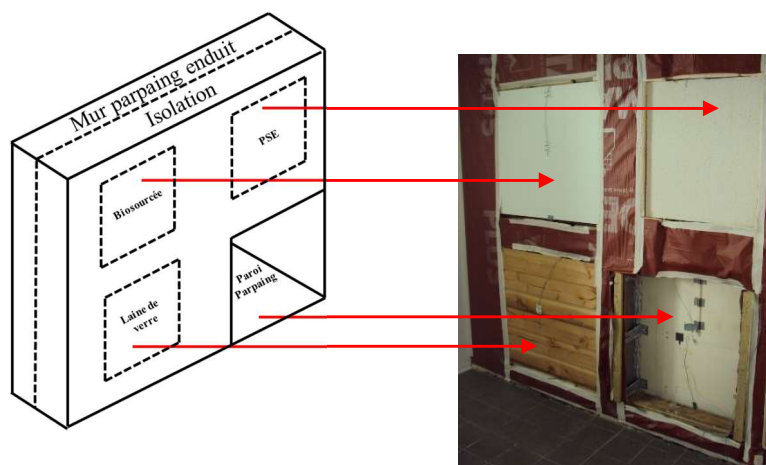


Figure II-2 : Aperçu final de la face extérieure de la paroi étudiée.

II.1.2. Caractérisation des matériaux

Les différents matériaux employés ont fait l'objet d'une caractérisation de leurs propriétés thermiques (capacité, conductivité thermique et émissivité) et hydriques (isothermes de sorption et perméabilités à la vapeur). Sauf indication contraire, les mesures ont été effectuées sur des échantillons prismatiques de surface 10cm x 10cm et d'épaisseur suffisante pour avoir un Volume Élémentaire Représentatif (voir Figure II-3). Par ailleurs, pour toutes les mesures, l'état sec est défini après un séchage en étuve à 60°C. Enfin, l'ensemble des mesures a été répété au minimum trois fois.



Figure II-3 : Aperçu des matériaux utilisés pour la caractérisation thermohydrigue.

II.1.2.1. Méthodes de caractérisation

Masse volumique sèche

La masse volumique sèche est évaluée à l'aide d'un pied à coulisse électronique et d'une balance électronique. L'incertitude associée à cette mesure peut aller jusqu'à 15%.

Propriétés thermiques

La capacité thermique massique des matériaux secs est mesurée à l'aide d'un microcalorimètre (Setaram Instrumentation μ DSC3 evo) sur la gamme de température [1-40°C]. L'incertitude associée à cette mesure est inférieure à 5%.

La conductivité thermique est mesurée à l'aide d'un dispositif de plaque chaude gardée développé au laboratoire (Carré and Legall, 1990) à une température moyenne de 20°C (les consignes des plaques froide et chaude sont fixées à 15 et 25°C). Deux campagnes d'essais ont été menées, la première sur l'ensemble des matériaux secs et la seconde sur quelques échantillons conditionnés à différentes humidités. L'incertitude associée à cette mesure est de 6%.

La réflectivité hémisphérique de matériaux conditionnés à 50% d'humidité relative est mesurée à l'aide d'un spectromètre infrarouge (Bruker Vertex 70 équipé d'une sphère intégrante A562) sur la gamme de longueur d'onde [2-25 μ m]. L'émissivité est déduite en supposant les échantillons comme étant des corps gris et opaques. L'incertitude associée à cette mesure est de 5%.

Propriétés hydriques

Les isothermes de sorption sont déterminées à température ambiante ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) par la méthode gravimétrique (NF EN ISO 12571). Pour les isothermes d'adsorption et de désorption, les échantillons sont respectivement séchés en étuve à 60°C et partiellement imbibés, avant d'être conditionnés à différentes humidités dans des dessiccateurs (Figure II-4) en parallèle à 36, 50, 75 et 97% ($\pm 3\%$). L'incertitude associée aux mesures des dimensions et de masse des échantillons est de 5%.



Figure II-4 : Aperçu du conditionnement en dessiccateur pour la mesure des isothermes de sorption.

Les facteurs de résistance à la diffusion de vapeur sont déterminés à 23°C par les méthodes de la coupelle sèche et humide (NF EN ISO 12572). Les ambiances sont maintenues respectivement par du gel de silice ($4 \pm 2\%$) et une solution saline saturée de KNO_3 ($94 \pm 2\%$). Les incertitudes associées à cette mesure sont de l'ordre de 10%.

II.1.2.2. Résultats

L'ensemble des mesures est reporté dans le Tableau II-2. Globalement, les ordres de grandeur sont retrouvés pour tous les matériaux au regard des données constructeur et de la littérature (Desta et al., 2011; Lelièvre, 2015; Talukdar et al., 2007; Vololonirina et al., 2014). Concernant la valeur de conductivité thermique des cloisons de parpaing, une valeur issue de la littérature est retenue (Hens, 2010).

Matériau	Masse volumique sèche [kg.m ⁻³]	Capacité thermique massique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Conductivité thermique sèche [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Emissivité [2-25 µm] [-]	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur sec [-]	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur humide [-]
Parpaing	1890	790	1.3	0.74	21.5	8.6
Enduits	1250-1600	810-840	0.32-0.44	0.75	31-10.6	24-9
Isoconfort	15	870	0.042	-	2.4	1.6
Isofaçade	34	860	0.035	-	2.9	2.1
Laine de bois	47	1330	0.041	-	3.6	1.6
Ouate de cellulose	55	1200	0.044	-	-	-
Polystyrène	16	1210	0.036	0.46	37.4	13
Bois peint	450	-	0.1	-	109	22
Bois	430	1280	0.1	0.54	72	18
OSB	560	1320	0.097	-	62	42
Durelis	678	1270	0.11	-	46	35
Pare-pluie	-	-	-	0.7	433	303

Tableau II-2 : Synthèse de l'ensemble des propriétés mesurées.

Un certain nombre de commentaires s'imposent :

- En raison de leur forte compressibilité, les masses volumiques des isolants présentent de grandes variabilités.
- Du fait de la dépendance de la capacité thermique à la température et à l'état hydrique (sec ou humide), la comparaison des mesures avec les données de la littérature n'est pas toujours aisée.
- Les conductivités thermiques indiquées par les constructeurs sont généralement mesurées à 10°C selon la procédure Acermi, et non à 20°C comme dans ce travail.
- Enfin, les mesures de perméabilité à la vapeur ont souligné l'importance de la préparation des matériaux, notamment des enduits (Rouchier et al., 2012), et de la mise en œuvre de la méthode, surtout pour les matériaux résistants.

S'il est largement admis que la présence d'humidité pénalise la conductivité thermique des matériaux, la seconde campagne de mesure de conductivité a mis en exergue quelques points :

- Dans le cas des matériaux isolants et faiblement hygroscopiques (PSE, laine de verre), les quantités d'eau adsorbées sont si faibles que leur effet sur la conductivité thermique est du second ordre comparé à l'incertitude de la mesure. Par exemple, Abdou et Budaiwi (Abdou et Budaiwi, 2013) notent une variation de la conductivité thermique de la laine de verre de 2% dans le domaine hygroscopique, comparé aux 6% d'incertitudes. Pour ces matériaux, il sera fait l'hypothèse d'une conductivité thermique constante.
- A contrario, dans le cas des matériaux plus fortement hygroscopiques, on observe un impact plus significatif de l'humidité. Les valeurs mesurées pour l'OSB et la laine de bois (Figure II-5) sont comparées à celles présentées par Vololonirina *et al.* (Vololonirina et al., 2014) : l'ordre de grandeur et la dépendance à la teneur en eau sont proches.

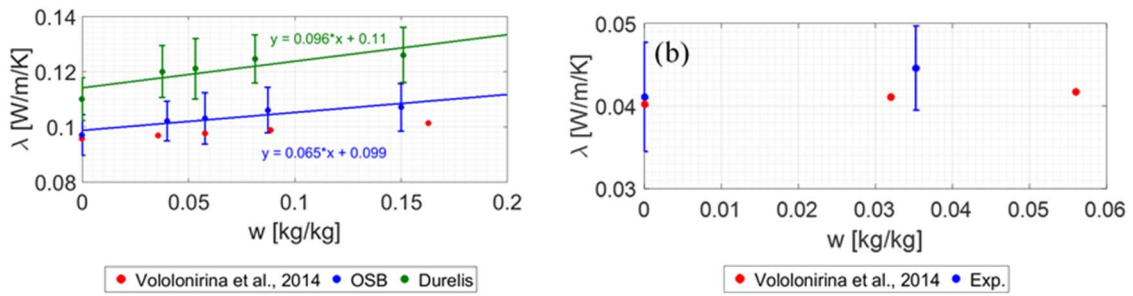


Figure II-5 : Conductivité thermique des OSB (a) et de la laine de bois (b) en fonction de la teneur en eau.

Enfin, les isothermes de sorption mesurées sont présentées et confrontées aux données de la littérature sur la Figure II-6. D'une manière générale, les écarts observés entre les mesures et les données de la littérature peuvent s'expliquer par le type de matériau testé (identique ou non), les dimensions des éprouvettes (VER) ou encore les conditions de mesure (définition de l'état sec, atteinte de l'équilibre hydrique). Par ailleurs, dans le cas des matériaux faiblement hygroscopiques (parpaing, enduit, laine de verre), l'incertitude de la mesure est plus élevée en raison des faibles variations de masse.

En vue de la simulation numérique, les courbes de sorption sont ajustées par le modèle de GAB (II-1), défini comme :

$$w_m = \frac{W_{GAB} C_{GAB} K_{GAB} HR}{(1 - K_{GAB} HR)(1 - K_{GAB} HR + C_{GAB} K_{GAB} HR)} \quad (II-1)$$

Avec W_{GAB} , C_{GAB} et K_{GAB} trois constantes évaluées à l'aide de la méthode des moindres carrés. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau II-3.

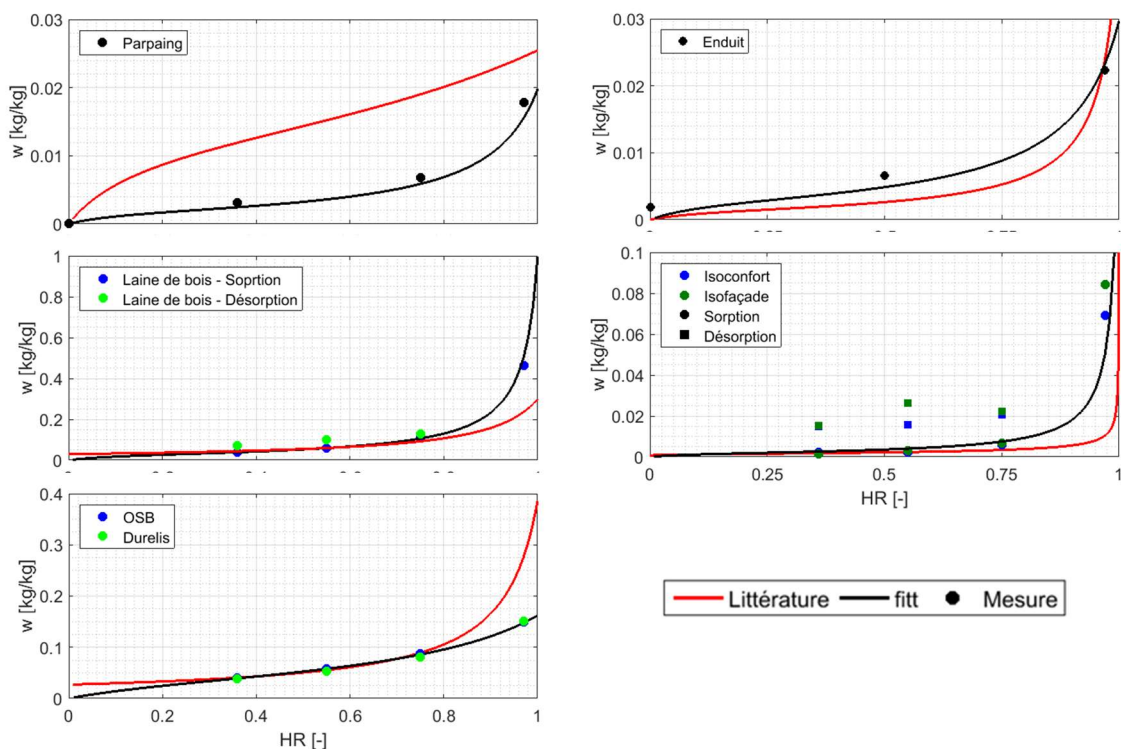


Figure II-6 : Isothermes de sorption mesurées et « fittées » avec le modèle de GAB.

	Béton	Enduits	Laine de verre	Laine de bois	OSB
W_{GAB}	0.002	0.003	0.002	0.03	0.03
C_{GAB}	10	10	10	10	200
K_{GAB}	0.9	0.9	0.99	0.97	0.8

Tableau II-3 : Coefficients du modèle de GAB pour les isothermes de sorption.

II.2. Moyens et méthodes de caractérisation thermohydrigue des parois

Afin de caractériser le comportement thermohydrigue de la paroi parpaing et des systèmes d'isolation, une enceinte biclimatique est utilisée. Le dispositif expérimental ainsi que l'instrumentation associée sont présentés. Puis, l'approche méthodologique pour appréhender le comportement thermohydrigue des parois est décrite.

II.2.1. Présentation de l'enceinte biclimatique

Un dispositif d'essai en enceinte biclimatique est disponible au laboratoire pour étudier la réponse en température et en humidité de parois de bâtiment. Il est constitué de deux chambres climatiques, nommées respectivement chambres intérieure et extérieure, séparées par la paroi étudiée (Figure II-7). Chaque chambre est isolée de l'ambiance du laboratoire par des panneaux sandwich en polyuréthane et est équipée d'un système de chauffage, d'un générateur d'humidité et d'un groupe froid (permettant de refroidir et déshumidifier). Les consignes en température et en humidité relative sont contrôlées à l'aide de régulateurs. Les pages de

fonctionnement des chambres sont présentées dans le Tableau II-4. Enfin, Les températures et les humidités relatives de l'air sont mesurées au centre de chaque chambre à l'aide de capteurs d'humidité de type *Sensirion SHT75* et de capteurs Rotronic HC2S ($\Delta T = \pm 0.5^{\circ}\text{C}$; $\Delta \text{HR} = \pm 5\%$) avec un pas de 10 min.

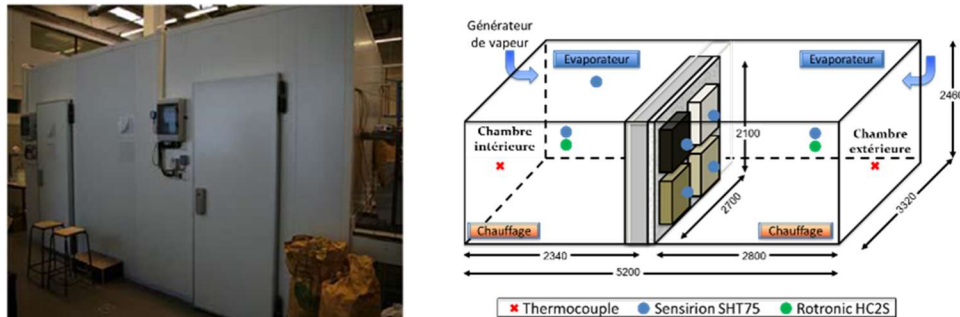


Figure II-7 : Vue extérieure et schématisation de l'enceinte biclimatique.

	Chambre intérieure	Chambre extérieure
Température	18 – 27°C	-5 – 35°C
Humidité relative	30 – 60%	30 – 90%

Tableau II-4 : Plage de fonctionnement des chambres climatiques.

En Annexe A sont présentées différentes expérimentations qui ont permis de qualifier l'ambiance extérieure. Les constats sont les suivants :

- Une corrélation très nette entre le déclenchement du groupe froid et les mesures de température et d'humidité relative au centre de la chambre est constatée pour des périodes de courte durée (inférieures à 4h). Cependant, une prise de moyenne sur 2h (ou plus) des mesures tend à lisser les variations constatées localement.
- Enfin, une forte hétérogénéité des champs de température, d'humidité relative et pression de vapeur est observée dans la chambre extérieure. Une instrumentation locale a donc été réalisée au niveau de chaque paroi étudiée.

II.2.2. Instrumentation des parois

L'instrumentation mise en œuvre pour appréhender le comportement thermohydrrique des systèmes étudiés est présentée en Figure II-8. Le mur parpaing est instrumenté de façon identique aux 4 emplacements étudiés, l'instrumentation comprend :

- Des thermocouples de type K ($\Delta T = \pm 0.5^{\circ}\text{C}$) placés en surface de parpaing (côté chambre intérieure), à l'interface parpaing-enduit, en surface d'enduit, ainsi que dans chaque alvéole,
- Des capteurs d'humidité (*Sensirion SHT 75*) insérés dans les alvéoles de parpaing,
- Des fluxmètres, 80 x 80 mm², collés en surface d'enduit ($\Delta \varphi = \pm 15\%$).

Dans le cas de la paroi Parpaing, des thermocouples supplémentaires sont placés en surface des différentes cloisons du parpaing. Au sein des trois systèmes d'ITE, des

thermocouples et des capteurs d'humidité ont été positionnés aux différentes interfaces entre matériaux et au cœur de l'isolant. De plus, des thermocouples ont été placés en surface de bardage et des capteurs d'humidités ont été positionnés aux entrée et sortie des lames d'air pour les systèmes sous bardage. Enfin, des mesures de vitesse sont effectuées ponctuellement à l'aide d'un anémomètre omnidirectionnel (TSI 8465, incertitude de $\pm 2\%$) dans les différentes lames d'air.

Lorsqu'ils ne sont pas pris en sandwich entre deux matériaux, les thermocouples sont insérés dans les aspérités de surface. Les capteurs d'humidité sont quant à eux glissés dans des tubes en plastique rigide et positionnés perpendiculairement aux flux thermique et hydrique, hormis pour les mesures dans les alvéoles de parpaing où les tubes sont placés dans le sens des flux. Une fois les sondes introduites, les tubes sont bouchés à l'aide de mastic. Enfin, certains capteurs ont été placés en doublon, à différentes hauteurs, pour quantifier d'éventuels effets 2D.

Les capteurs d'humidité sont connectés à des boîtiers *National Instruments* alors que les autres instruments de mesure sont raccordés à des centrales d'acquisition *Keithley*. Le pas d'acquisition de l'ensemble des capteurs (84 au total) est fixé à 10 minutes, sauf contre-indication.

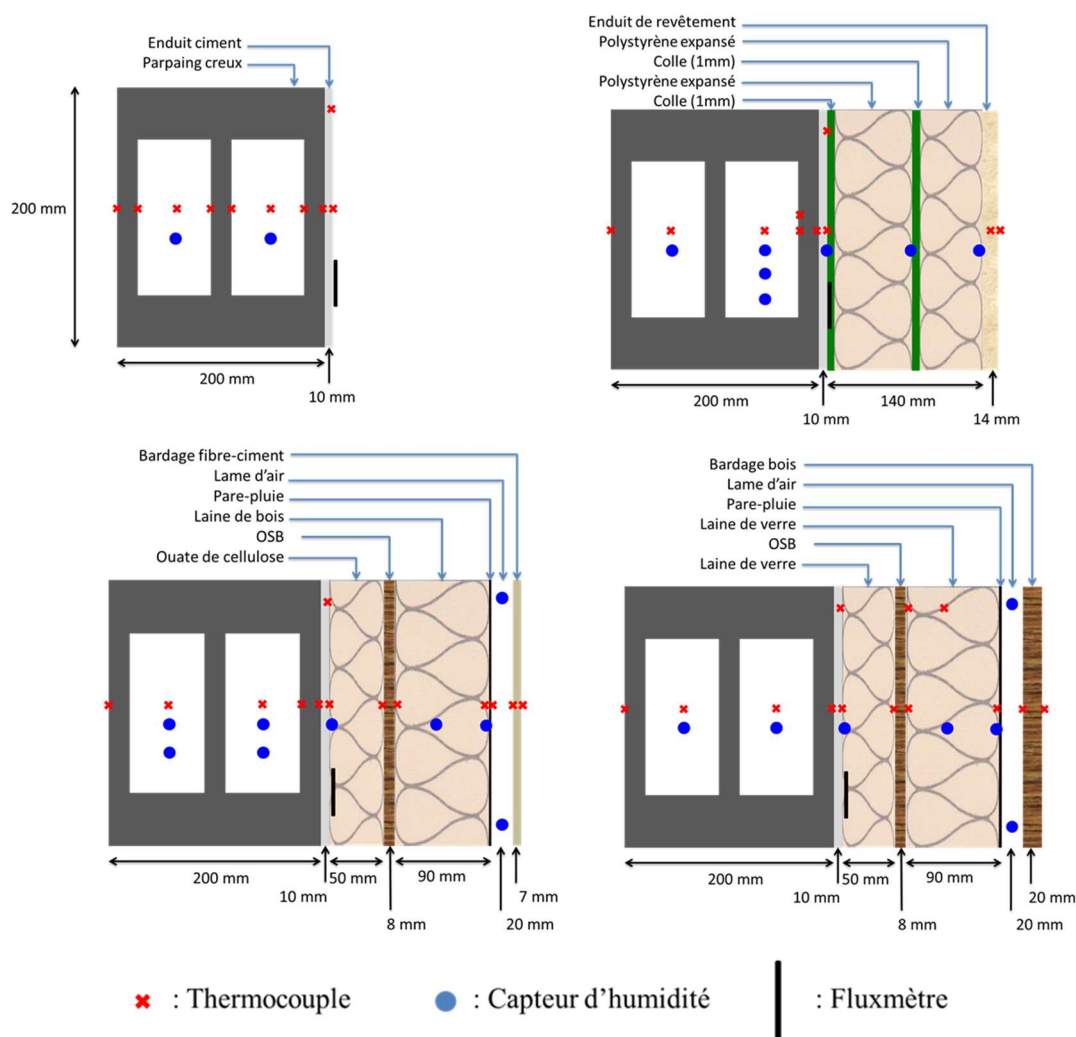


Figure II-8 : Composition et instrumentation des différentes parois étudiées (A : Parpaing, B : PSE, C : Laine de verre, D : Biosourcée).

II.2.3. Approche méthodologique

La construction et les expérimentations se sont échelonnées sur une période de près de 2 ans (cf. Figure II-9) avec trois axes objectifs :

- Le suivi de l'état hydrique de la paroi parpaing avant la mise en œuvre des systèmes d'ITE et la conséquence de la pose (Section II.3),
- La réponse thermohydrrique des systèmes d'ITE à une sollicitation « modérée » en température et en humidité relative (Section II.4),
- Le comportement thermohydrrique des systèmes d'ITE dans des conditions à risques (Section II.5).

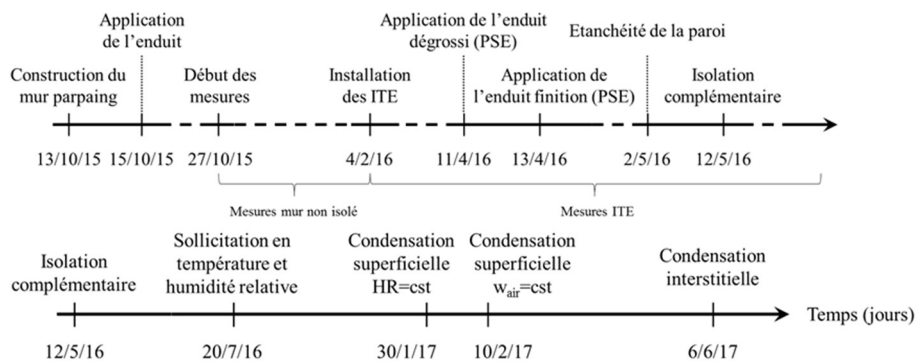


Figure II-9 : Aperçu des grandes étapes de construction et d'expérimentation.

II.3. Analyse de la mise en œuvre des systèmes d'ITE

La première partie de la frise chronologique présentée sur la Figure II-9 met en évidence deux grandes étapes lors de la mise en place du dispositif expérimental : la construction et le suivi du séchage du mur parpaing, puis la pose des systèmes.

Dans un premier temps, le suivi du séchage de la paroi parpaing est présenté. Dans un second temps, les conséquences de l'application des différents systèmes d'isolation sont mises en avant. Enfin, un bilan succinct sur la mise en œuvre du dispositif expérimental est proposé.

II.3.1. Suivi du séchage du mur parpaing

La construction du mur parpaing et l'application de l'enduit-ciment sur la face externe du mur ont duré trois jours. La première étape a consisté à évacuer une grande partie de l'eau de gâchage durant une période d'environ 4 mois avant de réaliser la pose des ITE. La Figure II-10 présente les conditions imposées dans chacune des chambres à compter du début de l'acquisition (soit 12 jours après l'application de l'enduit) : les niveaux moyens d'humidité relative oscillent autour de 50%, alors que les températures varient de 25 à 12°C dans la chambre intérieure et de 25 à -10°C dans la chambre extérieure au cours de cette séquence. L'observation des graphiques montre quelques interruptions de l'acquisition en raison de

coupures électriques dans le laboratoire. On peut aussi observer des variations de température et d'humidité relative, non contrôlées, dans les deux chambres du fait d'une difficulté de régulation des systèmes énergétiques.

La Figure II-11 présente les évolutions d'humidité relative et de pression de vapeur mesurées dans les alvéoles des parpaings. Les humidités relatives présentent des niveaux proches de la saturation après la construction du mur, puis entament une lente décroissance durant les 45 premiers jours. A compter du 50^{ème} jour, on note que les pressions de vapeur dans les alvéoles sont comprises entre celles des ambiances intérieure et extérieure (excepté entre le 65^{ème} et le 72^{ème} jour) alors que les humidités relatives restent supérieures, y compris à l'issue de la phase de séchage. Au final, une partie de l'humidité apportée lors de la construction a été évacuée ; cependant, le mur parpaing n'est pas sec avant la pose des systèmes d'ITE.

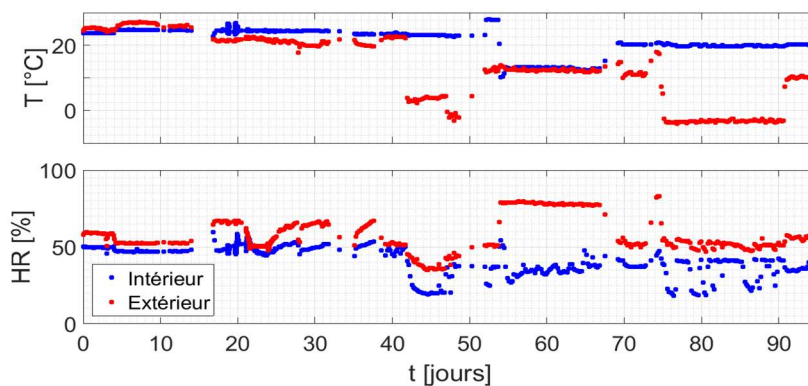


Figure II-10 : Conditions de température et d'humidité relative dans les chambres intérieure et extérieure durant l'étude préliminaire du mur parpaing.

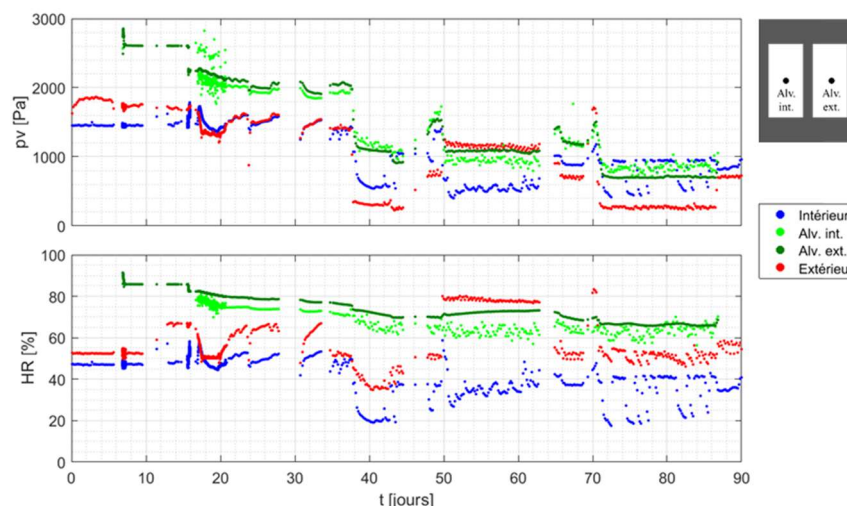


Figure II-11 : Evolution des pressions de vapeur et des humidités relatives dans les alvéoles des parpaings durant l'étude préliminaire.

II.3.2. Suivi des conséquences de la pose des systèmes d'ITE

Suite à la phase de séchage du mur, les systèmes ont été installés. Dans le cas des parois sous bardage, les ITE sont mises en œuvre par voie sèche : les ossatures sont fixées au mur à l'aide d'équerres et l'espace compris entre le mur et l'ossature bois est rempli d'isolant. Le système PSE est quant à lui mis en œuvre en deux temps : les panneaux d'isolant sont d'abord fixés au mur parpaing à l'aide d'une colle adhésive et de rosaces de fixations. Les enduits de dégrossi et de finition sont ensuite appliqués (après 60 jours).

La Figure II-12 présente les conditions ambiantes avant et après la pose des systèmes d'ITE (l'instant $t = 0$ correspond au début des travaux). Durant chaque période d'intervention (deux fois 2 à 3 jours), les températures de la chambre extérieure étaient de l'ordre de 18°C . En dehors de ces périodes, des consignes de 10°C et 55% ont été imposées. Côté chambre intérieure, les consignes ont été maintenues en permanence à 20°C et 40%. Les mesures indiquent que les consignes sont globalement respectées.

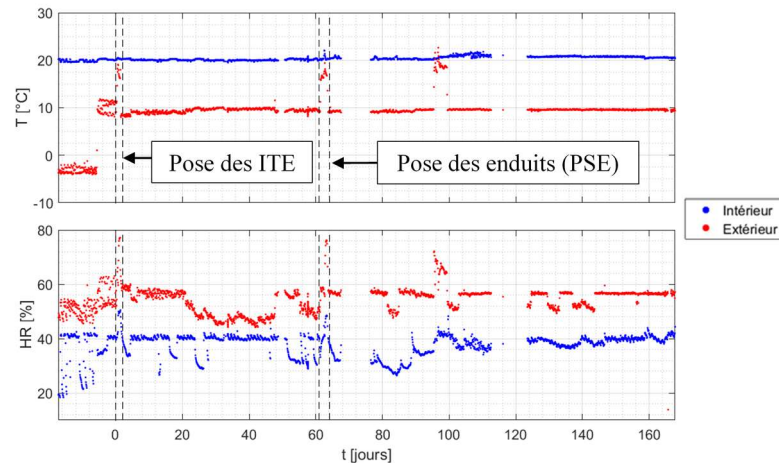


Figure II-12 : Conditions de température et d'humidité relative dans les chambres intérieure et extérieure durant la pose des systèmes d'ITE.

La Figure II-13a présente les évolutions des humidités relatives à l'interface entre le mur parpaing et chacun des systèmes d'ITE. Pour les systèmes mis en œuvre par voie sèche, on observe que les niveaux d'humidité sont légèrement supérieurs à ceux des ambiances : l'application du système d'ITE vient limiter les transferts hydriques. Cela est illustré par une légère augmentation de l'humidité relative dans l'alvéole de parpaing, côté extérieur, juste après la pose des systèmes (cf. Figure II-13b). Cependant, l'humidité s'évacue de la paroi comme l'atteste la lente diminution de l'humidité relative et la convergence vers un état d'équilibre 160 jours après la pose. Par ailleurs, on observe des évolutions similaires pour les deux systèmes (Laine de verre et Biosourcé).

Pour le système PSE, mis en œuvre par voie humide, on observe qu'un état de saturation est atteint en raison de l'apport d'humidité dû à la colle. Cet apport s'illustre également par une nette augmentation de l'humidité relative au sein des alvéoles des parpaings comme l'atteste la Figure II-13b. L'humidité relative à l'interface mur-ITE diminue à compter du 35^{ème} jour

jusqu'à la pose des enduits, sans forcément atteindre un état d'équilibre : la faible perméabilité du polystyrène associée à une quantité élevée d'eau a pour conséquence de limiter le séchage de la paroi parpaing. Bien que la pose des enduits constitue un apport d'humidité supplémentaire en surface de paroi, cette étape a plutôt eu pour effet de ralentir le séchage de la paroi, notamment à l'interface mur-ITE. Au final, l'équilibre hydrique n'est pas atteint après 160 jours pour la paroi PSE.

Enfin, la Figure II-13c présente l'évolution des densités de flux de chaleur. La pose des systèmes d'ITE permet de réduire les flux thermiques à moins de 3W/m^2 (contre 15 à $t=-5$ jours). Par ailleurs, le régime thermique est rapidement établi et les fluctuations observées sont en accord avec les évolutions de température. Enfin, on note une baisse ponctuelle du flux de la paroi PSE autour du 35^{ème} jour, en lien avec un décrochage du niveau de saturation mesuré à l'interface mur-polystyrène.

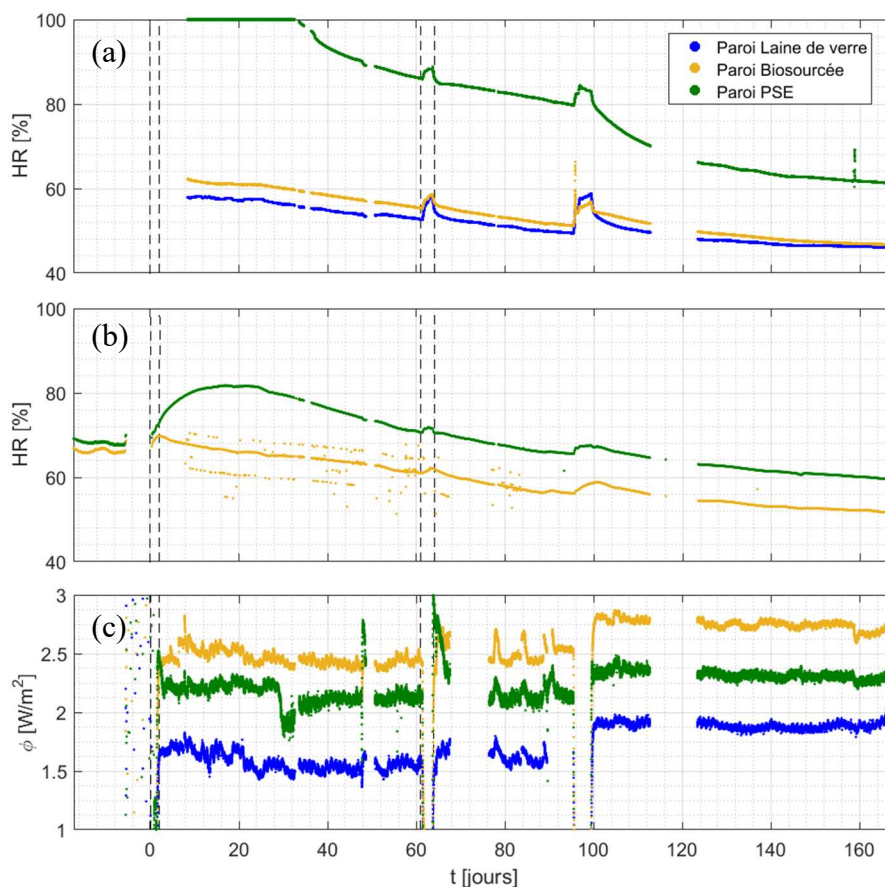


Figure II-13 : Evolutions des humidités relatives dans les alvéoles de parpaings, côté extérieure, (a), aux interfaces mur-ITE (b) et évolution des densités de flux de chaleur après la pose des systèmes d'ITE (c).

II.3.3. Bilan sur la mise en œuvre des systèmes d'ITE

Concernant la paroi parpaing, on peut noter qu'une période de 40 jours a été nécessaire pour évacuer la majeure partie de l'eau. Toutefois, l'équilibre thermohydrique de cette paroi n'est pas complètement atteint 90 jours après la pose de l'enduit. L'application des systèmes ITE est venue ensuite limiter les transferts de chaleur et d'humidité. Comme aucune source

d'humidité n'a été ajoutée lors de la pose des systèmes d'ITE sous bardage, on observe la finalisation du séchage de la paroi parpaing et la convergence vers un état d'équilibre hydrique 160 jours après l'application des ITE. En revanche, la pose d'un système PSE qui nécessite un apport d'eau à la paroi, induit des niveaux d'humidité relative proches de la saturation. Compte tenu la grande résistance à la diffusion de la vapeur d'eau du polystyrène expansé, le séchage de cette paroi est lent et l'équilibre hydrique n'est toujours pas atteint 160 jours après l'application des ITE.

II.4. Comportement thermohydrique des parois

Dans cette partie, les conditions imposées dans les deux chambres correspondent à des conditions pour lesquelles aucun risque de condensation ne peut, *a priori*, être rencontré. Les consignes appliquées à l'issue de la séquence de mesure précédente sont les suivantes : augmentation de la température de 7°C à 27°C et de l'humidité relative de 60% à 70% pour la chambre extérieure et maintien des conditions dans la chambre intérieure à 20°C et 50%. Les mesures des conditions ambiantes, présentées sur la Figure II-14, indiquent un bon respect des consignes de température durant toute la séquence ce qui n'est pas le cas pour l'humidité du fait d'un dysfonctionnement de la régulation et des humidificateurs.

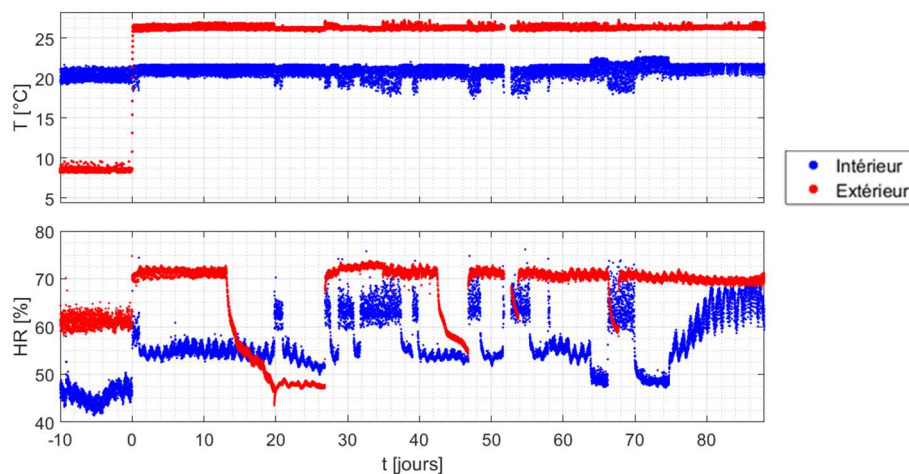


Figure II-14 : Conditions de température et d'humidité relative dans les chambres intérieure et extérieure durant la séquence sans risques de condensation.

L'analyse des différents systèmes (paroi Parpaing, ITE sous bardage et PSE) est réalisée selon le même schéma : évaluation des conditions limites locales, étude de la réponse thermohydrique des parois durant les 10 premiers jours et analyse du régime permanent avant et après la sollicitation.

II.4.1. Paroi Parpaing

II.4.1.1. Conditions limites locales

Les conditions de température, d'humidité relative et de pression de vapeur, ainsi que les vitesses d'air mesurées à proximité de la surface extérieure de la paroi parpaing sont présentées respectivement sur la Figure II-15, la Figure II-16 et la Figure II-17. Deux comportements sont observés :

- Lorsque la consigne extérieure est à 7°C, le groupe froid est activé ce qui entraîne un brassage de l'air dans la chambre : les vitesses mesurées à proximité sont de 0.02 m/s en moyenne. La température extérieure locale est supérieure d'environ 2°C à la température mesurée au centre de la chambre extérieure, mais inférieure à la température en surface d'enduit.
- Lorsque l'enceinte extérieure est à 28°C, le groupe froid n'est plus activé : les vitesses mesurées sont quasi-nulles. La température à proximité de la paroi Parpaing est inférieure d'environ 2°C à la température mesurée au centre de l'enceinte ; elle est comprise entre cette température extérieure et celle de l'enduit.

L'humidité relative mesurée à proximité de la paroi Parpaing présente des niveaux initiaux et finaux légèrement différents de ceux de la chambre extérieure et un pic d'humidité relative durant le transitoire. Compte tenu de ces remarques, le capteur situé à proximité de la paroi sera utilisé dans la suite de l'analyse, tout en sachant que les conditions aérauliques sont variables.

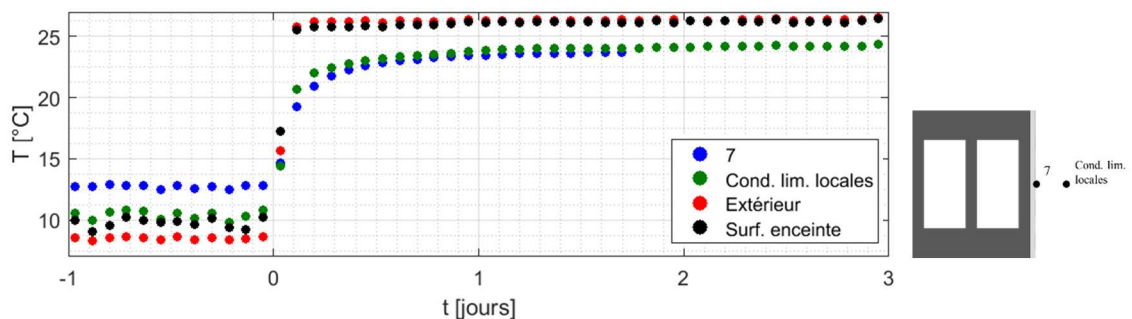


Figure II-15 : Températures mesurées à proximité de la surface extérieure de la paroi Parpaing et comparaison avec la mesure de la chambre extérieure.

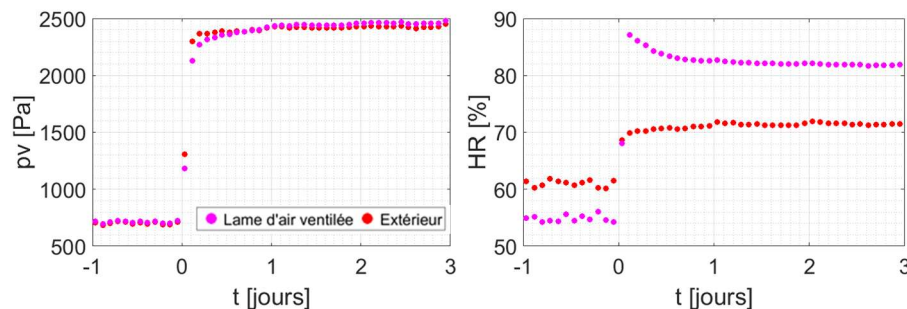


Figure II-16 : Pressions de vapeur et humidités relatives mesurées à proximité de la surface extérieure de la paroi Parpaing et comparaison avec la mesure au centre de la chambre.

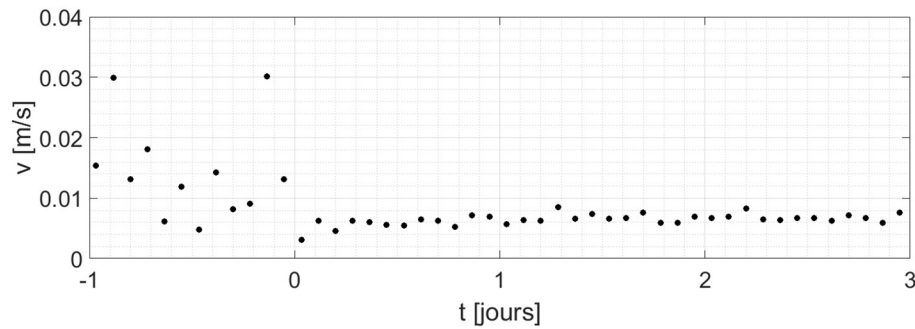


Figure II-17 : Vitesses d'air mesurées à proximité de la paroi Parpaing.

II.4.1.2. Etude de la réponse thermohydraulique

Durant le transitoire, les températures mesurées en surface des cloisons de parpaing et d'enduit évoluent significativement durant 2 jours (Figure II-18). La Figure II-19 montre l'évolution (non moyennée) de la densité de flux thermique mesurée en surface d'enduit. On observe des variations de cette mesure qui sont corrélées au fonctionnement du groupe froid. De plus, La densité de flux thermique atteint d'abord un minimum avant de converger vers sa valeur finale. Cette évolution transitoire est corrélée aux écarts de température entre la surface d'enduit et l'air mettant en évidence les échanges convectifs en surface d'enduit.

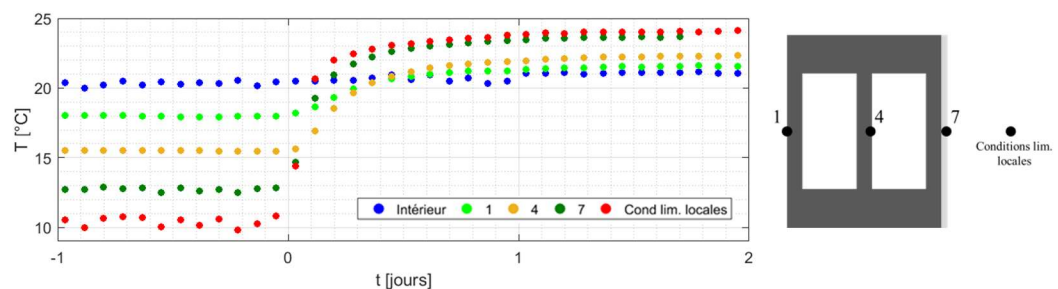


Figure II-18 : Réponse en température de la paroi Parpaing.

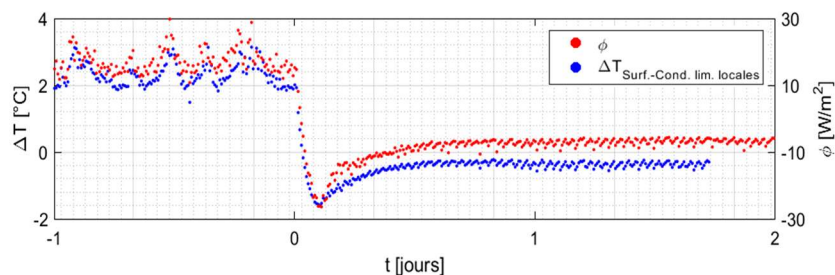


Figure II-19 : Densité de flux de chaleur en surface extérieure de la paroi Parpaing et écarts de température entre la surface d'enduit et l'air.

La Figure II-20 montre une bonne concordance entre les températures d'air relevées par les sondes *Sensirion* et les thermocouples dans les deux alvéoles. En revanche, ces mesures dans l'air ne sont pas systématiquement comprises entre les mesures de température des surfaces adjacentes (en particulier après la sollicitation). D'une part, la mesure d'une

température de surface est difficile, à cela s'ajoute la présence de l'adhésif, rendant la mesure intrusive. D'autre part, la position des capteurs dans les alvéoles n'est pas connue avec précision. Enfin, les alvéoles sont le siège d'écoulements convectifs complexes. Des études numériques 2D ou 3D des transferts de chaleur dans des matériaux alvéolaires (Sun and Fang, 2009; Svoboda and Kubr, 2011) ont mis en évidence que les champs de température n'y sont pas homogènes et que, localement, les températures atteignent des niveaux supérieurs/inférieurs à celles de surface d'alvéoles. Par conséquent, la température mesurée par les capteurs d'humidité dans les alvéoles ne peut donc pas être exploitée quantitativement.

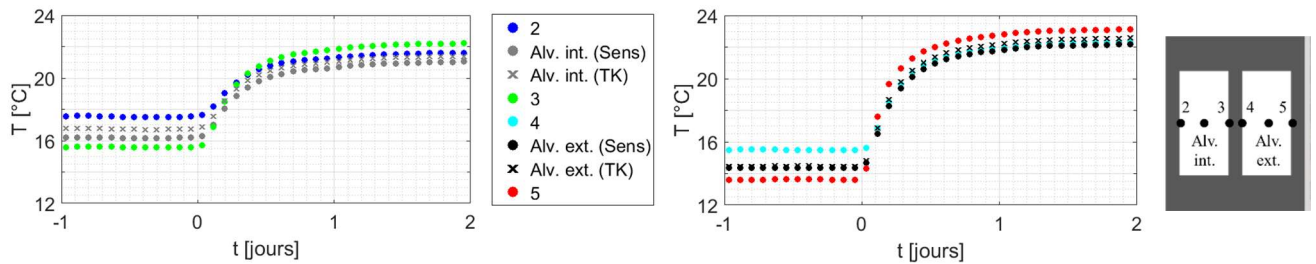


Figure II-20 : Relevé des températures des sondes Sensirion et des thermocouples dans les alvéoles de la paroi Parpaing.

Enfin, les évolutions de l'humidité relative et de la pression de vapeur dans les alvéoles et dans les ambiances sont présentées sur la Figure II-21. Les mesures d'humidité relative et de pression de vapeur dans les alvéoles sont cohérentes avec la sollicitation. Cela s'explique par le fait que les transferts d'humidité dans les alvéoles sont moins impactés par des effets multidimensionnels que les transferts thermiques en raison du caractère isolant des cloisons de parpaing. En conséquence, ces informations pourront être à minima exploitées de manière qualitative. Par ailleurs, on constate que l'équilibre hydrique n'est toujours pas atteint au bout de 10 jours.

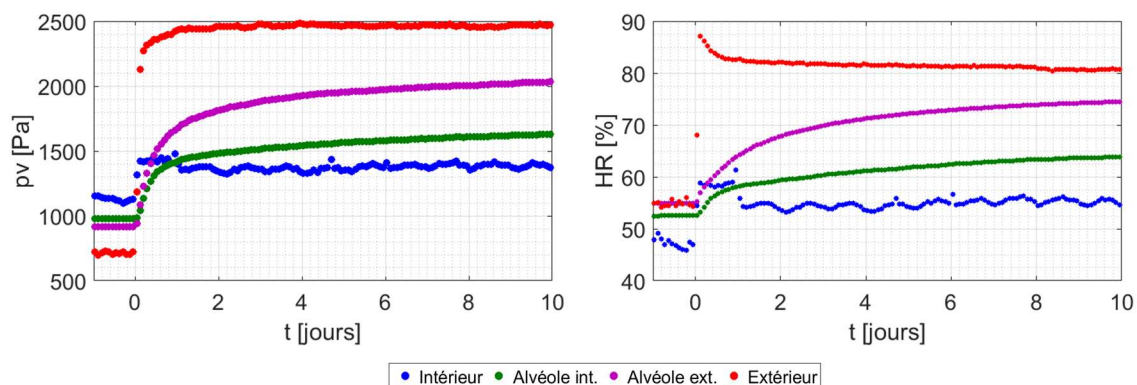


Figure II-21 : Pressions de vapeur et humidités relatives mesurées dans les alvéoles de la paroi Parpaing.

II.4.1.3. Analyse du régime permanent

II.4.1.3.a. Détermination expérimentale de la résistance thermique de la paroi parpaing

La résistance thermique d'une paroi a été évaluée à partir des mesures de température de surface et de la densité de flux thermique selon la norme (EN ISO 9869, 2014) :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\phi} \quad (\text{II-2})$$

Les grandeurs mesurées ont été moyennées sur une période de 4h. Étant donné que les variations de températures sont limitées, l'incertitude maximale définie à 28% dans la norme ISO 9869 peut être ramenée à 13%. Les résultats sont présentés dans le Tableau II-5.

T_1	T_7	Φ	R_{mur}
[°C]	[°C]	[W.m ⁻²]	[K.m ² .W ⁻¹]
18 ± 1	13 ± 1	17	0.29

Tableau II-5 : Températures de surface, densité de flux et résistance thermique de la paroi Parpaing.

Ces résistances thermiques estimées peuvent être comparées à des grandeurs obtenues selon une méthode de calcul définie dans la norme ISO 6946. Cette méthode requiert la connaissance de grandeurs géométriques et thermiques (conductivité thermique des parties solides, émissivités des surfaces et coefficient d'échange thermique dans les alvéoles). Le calcul 2D, qui tient compte de la conduction thermique dans les parties solides du parpaing (entre les alvéoles) et dans le mortier, conduit évidemment à des valeurs plus faibles que celles du calcul 1D. La résistance thermique de la paroi s'échelonne alors de 0.35 à 0.41 K.m².W⁻¹ pour un calcul 2D et se rapproche de la grandeur déterminée *in situ*.

	ISO 6946 (1D)	ISO 6946 (2D)
R_{th} (K.m ² .W ⁻¹)	0.45-0.80	0.35-0.41

Tableau II-6 : Calcul théorique de la résistance thermique de la paroi Parpaing.

II.4.1.3.b. Comparaison des profils théoriques et expérimentaux

Pour corroborer les résultats précédents, une comparaison des profils théoriques et expérimentaux de température et d'humidité relative est proposée en utilisant les propriétés rappelées dans le Tableau II-7. Les coefficients d'échanges par convection thermique sont fixés à 5W/m²/K à proximité des surfaces intérieure et extérieure de la paroi Parpaing. Pour ce calcul, on considère également du rayonnement GLO entre les surfaces des parois et les surfaces des chambres ainsi qu'au sein du parpaing, entre les surfaces de cloisons en vis-à-vis. La Figure II-22 présente les profils de température mesurés et calculés, on observe un bon accord entre théorie et expérience.

	Parpaing	Mortier	Enduit-ciment
λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	1.3	1.3	0.36
μ [-]	21	21	15
ε [-]	0.75	-	0.75

Tableau II-7 : Paramètres utilisés pour le tracé des profils de la paroi parpaing.

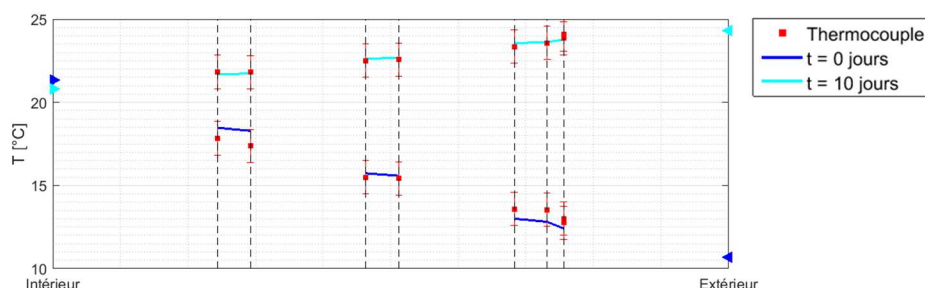


Figure II-22 : Profils de température mesurés et calculés dans la paroi Parpaing à 0 et 10 jours.

En complément, la Figure II-23 présente une comparaison des profils théoriques et expérimentaux d'humidité relative et de pression de vapeur. Bien que la mesure dans les alvéoles soit approximative, on note un bon accord entre théorie et expérience.

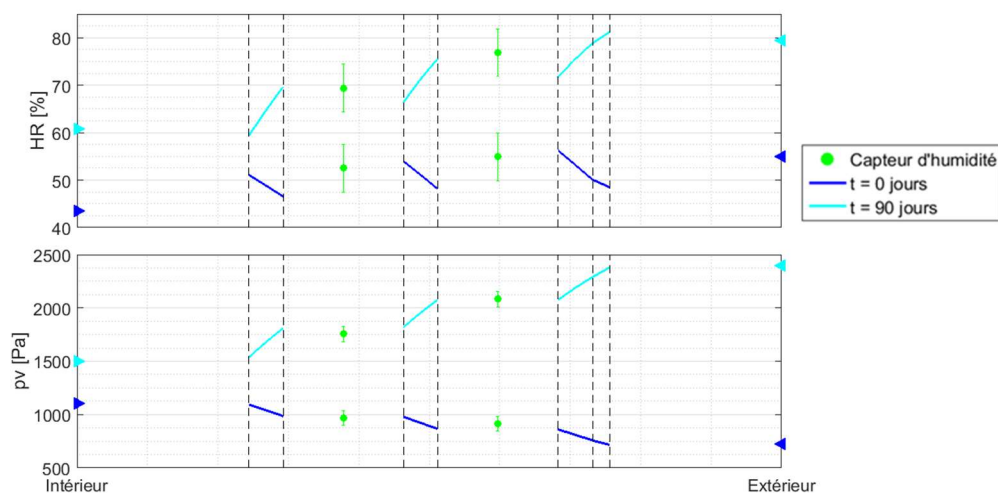


Figure II-23 : Profils d'humidité relative et de pression de vapeur calculés et mesurés dans la paroi Parpaing à 0 et 90 jours.

II.4.2. Systèmes d'ITE mis en œuvre par voie sèche

II.4.2.1. Conditions aux limites locales

Dans le cas des systèmes d'ITE sous bardage, une attention particulière est portée sur les lames d'air ventilées. Les vitesses d'air mesurées dans ces espaces varient de 0.15 à 0.3m.s⁻¹ lorsque le groupe froid est en fonctionnement (Figure II-24). En dehors de ces périodes, aucun écoulement significatif n'est constaté pour les conditions imposées dans la chambre. Ces observations prévalent tant pour la paroi Laine de verre que pour la paroi Biosourcée.

Les températures et pressions de vapeur mesurées par les capteurs d'humidité placés en haut et bas de bardage sont présentées sur la Figure II-25. Des écarts inférieurs à 0.5°C et 20Pa entre les deux extrémités témoignent d'une bonne homogénéité des températures et des humidités relatives dans les lames d'air ventilées en présence d'écoulement d'air. En revanche, des différences entre les deux extrémités sont constatées en l'absence d'écoulement : les niveaux les plus faibles de température et de pression de vapeur sont observés en bas de bardage et les écarts atteignent respectivement 0.6°C et 40Pa en régime permanent, avec des maximums allant jusqu'à 3°C et 200Pa durant le régime transitoire. Du point de vue thermique, ces mesures semblent cohérentes vis-à-vis des phénomènes de convection naturelle. Cependant, les bilans thermiques d'une lame d'air ventilée restent complexes et font intervenir des échanges avec les systèmes d'ITE, mais aussi avec le bardage. Du point de vue hydrique, outre la convection naturelle, ces remarques suggèrent un apport d'humidité dans la lame d'air ventilée en provenance des systèmes d'ITE. Par la suite les valeurs moyennes sont retenues comme indicatives des conditions de température et de pression de vapeur dans les lames d'air.

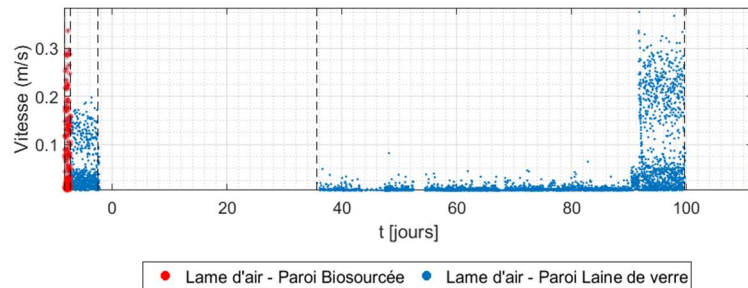


Figure II-24 : Vitesses d'air mesurées dans les lames d'air des systèmes d'ITE sous bardage.

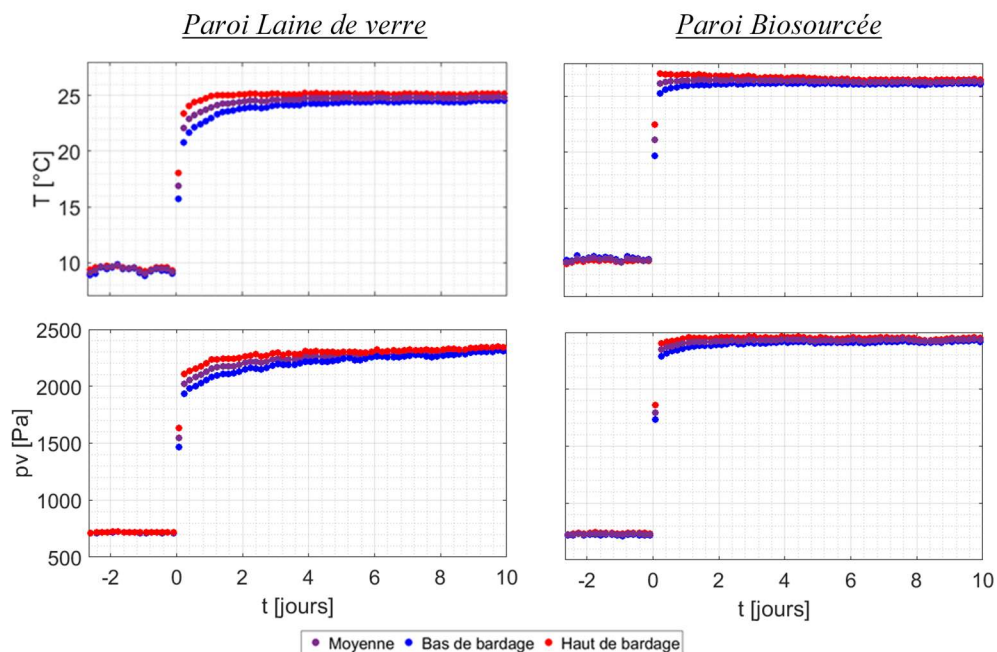


Figure II-25 : Températures mesurées et pressions de vapeur calculées aux extrémités de la lame d'air ventilée des parois Laine de verre et Biosourcée.

II.4.2.2. Etude de la réponse thermohydrrique

La Figure II-26 présente les différentes mesures de températures réalisées à l'interface mur-ITE et près de l'OSB de la paroi Laine de verre. On observe des écarts entre les mesures faites par thermocouple et par sonde d'humidité, mettant en évidence le caractère intrusif des tubes employés pour ces dernières à l'interface mur-ITE. En revanche, les mesures effectuées à différentes positions n'indiquent pas d'effets 2D significatifs.

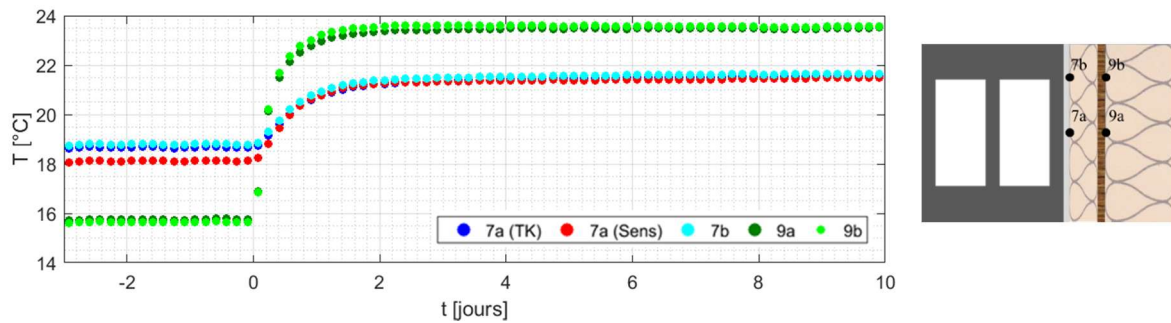


Figure II-26 : Confrontation des différentes températures mesurées à l'interface mur-ITE et près de l'OSB pour la paroi Laine de verre.

Les évolutions de température mesurées en différents points de la paroi Laine de verre et la densité de flux sont présentées sur la Figure II-27. Les gradients de température dans le mur parpaing sont faibles et la température à l'interface mur-ITE évolue peu lors de cette séquence de mesure. Compte tenu de la faible inertie thermique du système d'ITE, aucun déphasage significatif n'est à observer entre les différentes températures. En revanche, on note que la densité de flux thermique diminue après la sollicitation et atteint un minimum après 1 jour avant de croître légèrement. Cette évolution est corrélée à la différence de température entre l'interface mur-ITE et l'OSB. Enfin, on peut noter que le régime permanent est quasiment atteint après 2 jours. Les évolutions de pression de vapeur en différents points de la paroi Laine de verre sont présentées sur la Figure II-28. Compte tenu du fait que le mur parpaing et le système d'ITE présentent des résistances à la vapeur d'eau équivalentes (la somme des Sd de chaque constituant des deux systèmes aboutit respectivement à 1.2m et 0.9m), la pression de vapeur à l'interface mur-ITE évolue significativement pour cette séquence de mesure. De même, des écarts de 120 à 140 Pa sont observés, avant et après le changement de consigne respectivement, entre la lame d'air ventilée et le pare-pluie, soulignant le caractère résistif de ce dernier. Par ailleurs, on relève un déphasage entre les mesures effectuées de part et d'autre de l'OSB, reflétant le caractère légèrement inertiel du système d'isolation. Enfin, comme pour la paroi Parpaing, le régime permanent hydrique n'est pas atteint après 10 jours.

Des comportements analogues en température, densité de flux et pression de vapeur sont observés pour la paroi Biosourcée et ne sont pas présentés ici. En revanche, une comparaison des variations relatives des grandeurs mesurées à l'interface mur-ITE des parois Laine de verre et Biosourcée est proposée sur la Figure II-29. Étonnamment, la réponse en température de la

paroi Laine de verre est plus lente que celle de la paroi Biosourcée, et ceci malgré sa plus faible capacité thermique. En revanche, sa réponse en pression de vapeur est légèrement plus rapide.

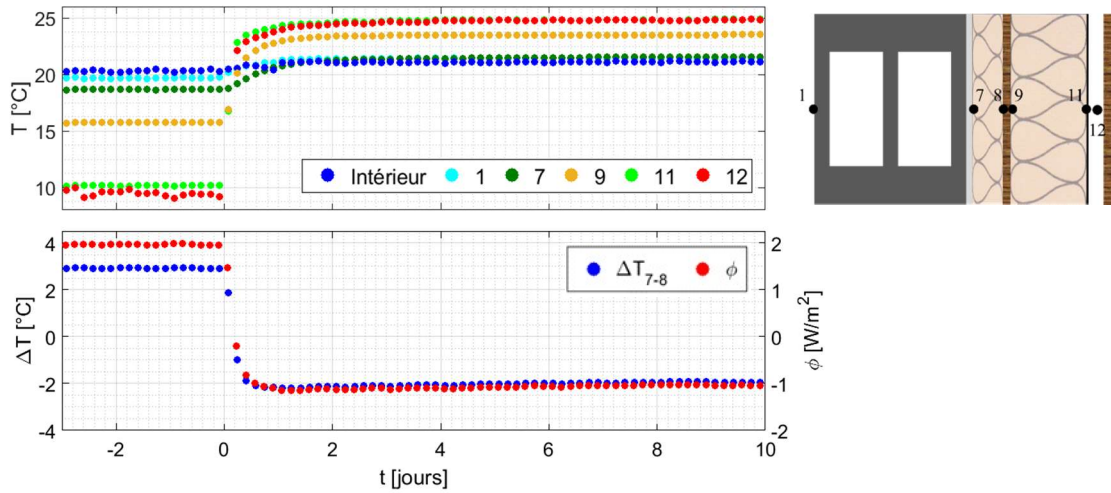


Figure II-27 : Températures mesurées en différents points de la paroi Laine de verre (a) et densité de flux mesurée à l'interface mur-ITE (b).

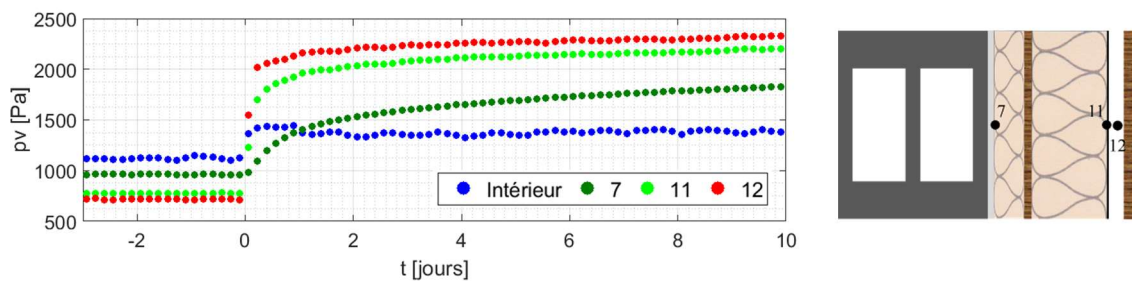


Figure II-28 : Pressions de vapeur mesurées en différents points de la paroi Laine de verre.

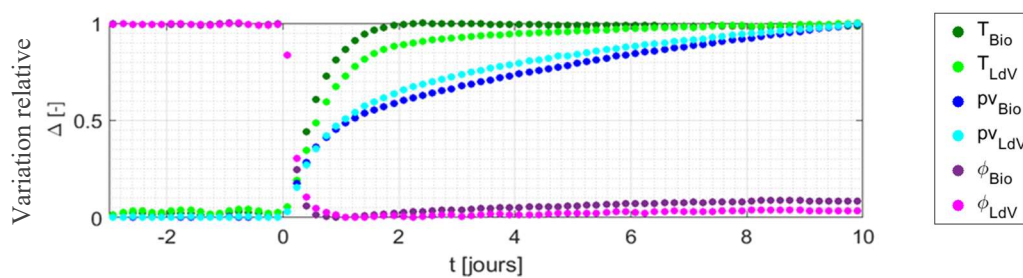


Figure II-29 : Variations relatives de la température, de la densité de flux et de la pression de vapeur à l'interface mur-ITE des parois Laine de verre et Biosourcée.

II.4.2.3. Analyse du régime permanent

II.4.2.3.a. Détermination in-situ des résistances thermiques

Les résistances thermiques des parois Laine de verre et Biosourcée, ainsi que des systèmes d'ITE seuls ont été évaluées selon la norme ISO 9869 à partir des mesures de

température de surface. Compte tenu des faibles variations de température dans le mur parpaing, les calculs de résistance thermique sont effectués sur le système ITE seulement. Les résultats sont présentés dans le Tableau II-8 et sont comparés aux valeurs théoriques obtenues par un calcul 2D selon la norme ISO 6946. Les valeurs estimées sont du même ordre de grandeur que les valeurs théoriques pour chaque paroi.

$R_{th} [Km^{-2}.W^{-1}]$	Laine de verre				Biosourcée			
	Mur parpaing + ITE		ITE		Mur parpaing + ITE		ITE	
	Mesure	Calcul	Mesure	Calcul	Mesure	Calcul	Mesure	Calcul
	4.5	4.3	4	4	3.3	3.4	3	3.1

Tableau II-8 : Résistances thermiques mesurées et calculées pour les systèmes d'ITE et les parois Laine de verre et Biosourcée.

II.4.2.3.b. Comparaison des profils théoriques et expérimentaux

La Figure II-30 et la Figure II-31 présentent les profils en régime permanent des parois Laine de verre et Biosourcée. On note un bon accord entre les profils de température et de pression de vapeur calculés et les mesures obtenues pour chacune des parois. En revanche, concernant les humidités relatives, des différences existent entre les profils calculés et les mesures qui peuvent s'expliquer par le cumul des incertitudes associées à la température et la pression de vapeur.

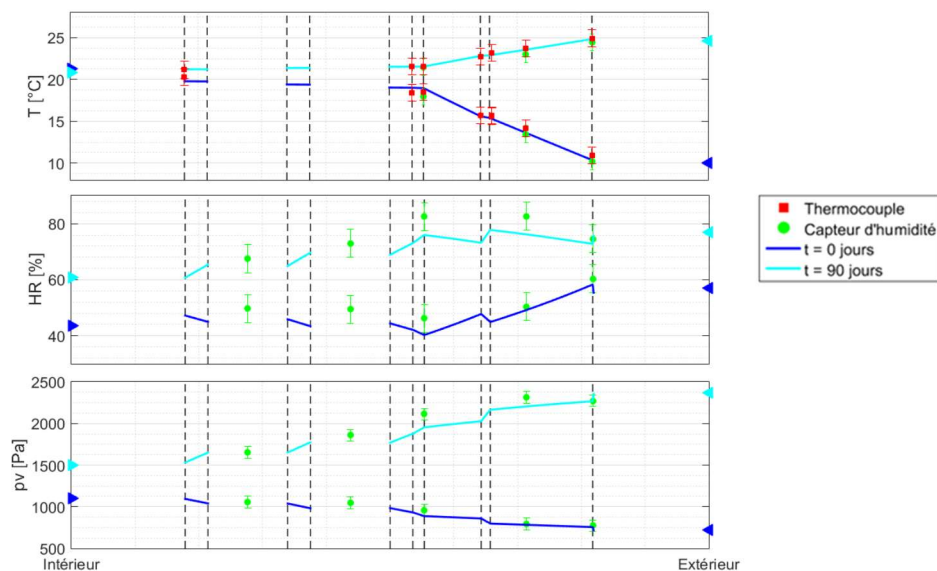


Figure II-30 : Profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur dans la paroi Laine de verre à 0 et 90 jours.

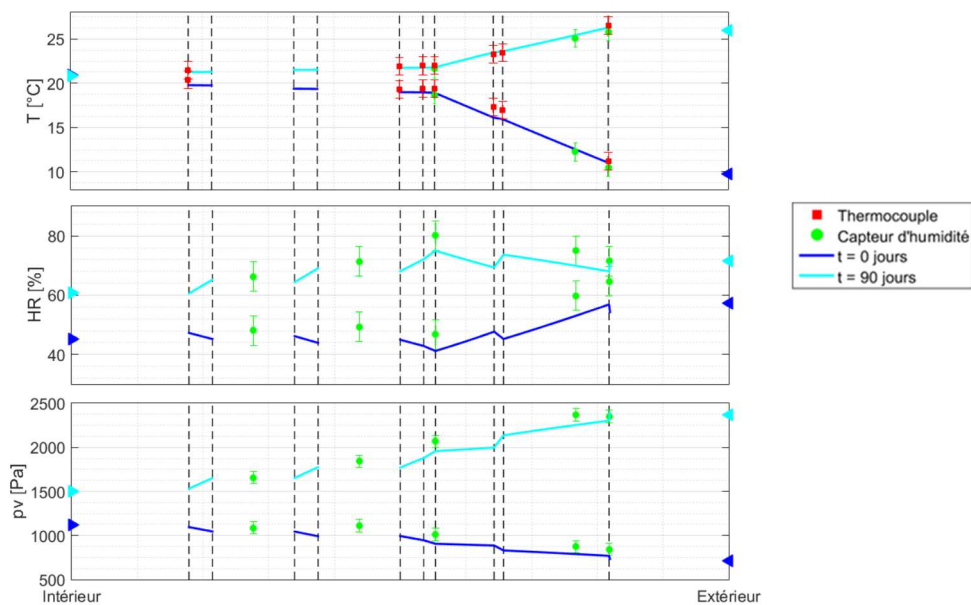


Figure II-31 : Profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur dans la paroi Biosourcée à 0 et 90 jours.

II.4.3. Système d'ITE mis en œuvre par voie humide

II.4.3.1. Etude de la réponse thermohydrrique

Les températures et les pressions de vapeur mesurées au sein de la paroi PSE sont présentées sur la Figure II-32 et comparées aux conditions relevées au centre de la chambre extérieure. La réponse thermique de la paroi est conforme aux sollicitations et aucun déphasage significatif n'est observé compte tenu de la faible inertie thermique du système d'ITE. D'un point de vue hydrique, les capteurs répondent logiquement à la sollicitation. Avant la sollicitation, les niveaux de pressions de vapeur à l'interface mur-ITE et dans l'isolant sont supérieurs à ceux des ambiances, indiquant que la paroi n'a pas encore atteint un état d'équilibre thermohydrrique. Ce point est confirmé après la sollicitation : on note des différences de pression de vapeur sensiblement identiques au sein du mur parpaing et du système d'ITE alors que la résistance à la diffusion du système ITE (PSE + colle + enduit) est nettement supérieure (la somme des Sd conduit à une valeur de 4m) à celle du mur parpaing. De ce fait, les mesures de pression de vapeur à l'interface mur-ITE et dans l'isolant sont trop élevées vis-à-vis des résultats attendus. Ce constat est mis en avant lors de l'analyse du régime permanent. En revanche, compte tenu de la faible épaisseur des enduits, on observe peu de différences entre les mesures effectuées dans la chambre extérieure et celles relevées entre l'enduit de revêtement et le polystyrène, confortant les données à cet endroit.

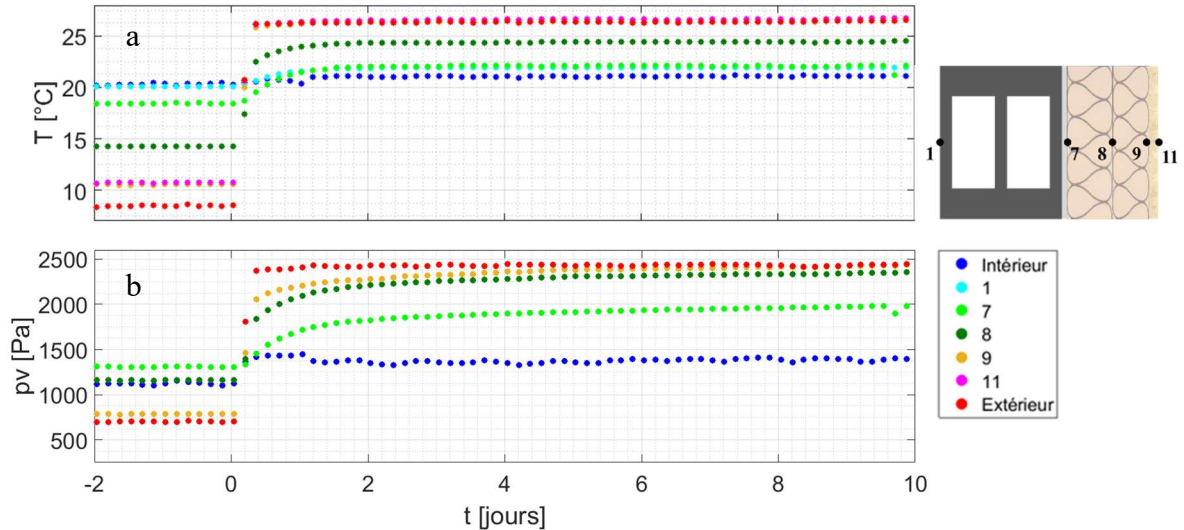


Figure II-32 : Température et pression de vapeur mesurées en différents points de la paroi PSE.

II.4.3.2. Analyse du régime permanent

II.4.3.2.a. Détermination de la résistance thermique du système ITE et de la paroi

Les résistances thermiques de la paroi PSE, ainsi que du système d'ITE seul ont été évaluées à partir des mesures de température et de flux. Les résultats sont présentés dans le Tableau II-9 et sont comparés aux valeurs théoriques obtenues par un calcul 2D selon la norme ISO 9869. A nouveau, on observe un bon accord entre théorie et expérience.

	Mur parpaing + ITE		ITE	
	Mesure	Calcul	Mesure	Calcul
$R_{th} [K \cdot m^2 \cdot W^{-1}]$	4.1	4.1	3.7	3.8

Tableau II-9 : PSE - Résistances thermiques mesurées et calculées pour le système ITE et la paroi.

II.4.3.2.b. Comparaison des profils théoriques et expérimentaux

La Figure II-33 compare les profils obtenus à partir des mesures (température, humidité relative avec deux profils théoriques : un premier qui ne prend pas en compte la colle et un second en considérant une couche de colle entre les panneaux de PSE avec une résistance thermique R_{th} de $0.0033 K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$ et une couche d'air équivalente S_d de 3m (Hens, 2010). La prise en compte de cette couche de colle ne modifie pas les profils de température et un bon accord avec les données expérimentales est à nouveau observé. En revanche, la colle influence les profils d'humidité relative et de pression de vapeur. Cependant, compte tenu que cette paroi n'a toujours pas atteint un état d'équilibre thermohydrrique, il n'y a pas de concordance entre les profils théorique et expérimentaux d'humidité relative et de pression de vapeur.

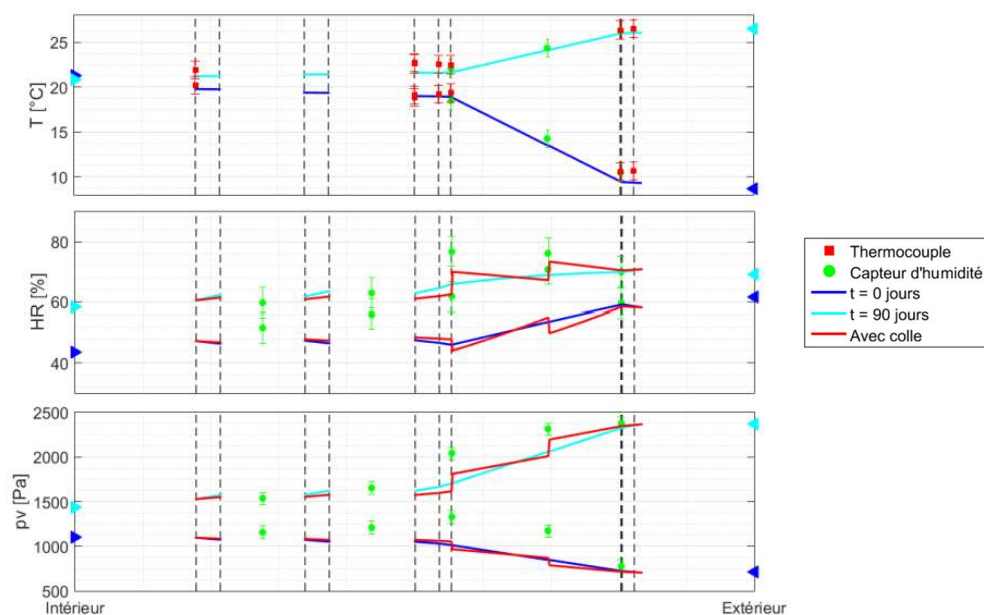


Figure II-33 : Profils de température, d'humidité relative et de pression de vapeur dans la paroi PSE (sans et avec prise en compte de la colle) à 0 et 90 jours.

II.4.4. Synthèse de l'étude sans risques de condensation

Cette étude a pu mettre en évidence que le comportement thermohydrrique observé au sein des différentes parois répondait logiquement aux sollicitations mesurées localement. Contrairement aux mesures dans les matériaux, les mesures dans les cavités (alvéoles de parpaing ou lame d'air) se sont avérées délicates.

Cependant, l'analyse des régimes permanents a permis de mettre en avant les points suivants :

- Un bon accord est constaté entre théorie et expérience pour les profils de température ainsi que pour les résistances thermiques des parois isolées ;
- Les profils d'humidité (HR, pv) des parois mis en œuvre par voie sèche sont bien prédits, alors que des écarts sont observés pour la paroi PSE ; l'origine de ces écarts tient dans le fait que d'une part l'équilibre thermohydrrique ne semble pas atteint pour cette paroi et que d'autre part la présence de la colle peut influencer de manière significative son comportement thermohydrrique.

II.5. Etudes de situations avec des risques de condensation

Dans cette partie, nous nous intéressons aux comportements thermohydrriques des différentes parois (non isolée et isolées) soumis à une sollicitation pour laquelle des risques de condensation peuvent, *a priori*, être rencontrés. Ici, deux types d'expériences sont menés : la première vise à mettre en évidence des phénomènes de condensation superficielle, la seconde des phénomènes de condensation interstitielle.

II.5.1. Etude de la condensation superficielle

Cette section s'attache à évaluer les risques de condensation superficielle pour les 3 systèmes d'ITE et la paroi Parpaing en comparant la température de la surface étudiée T_{surf} à la température de rosée $T_{rosée}$ de l'air proche de cette surface : si $T_{surf} < T_{rosée}$, alors il y a risque de condensation superficielle. Ici, les températures de surface de chaque paroi et de bardage dans le cas des systèmes d'ITE sous bardage, sont mesurées à l'aide d'un thermocouple. En revanche, en l'absence de mesure directement à proximité des surfaces, les températures de rosée sont évaluées à partir des mesures d'humidité :

$$T_{rosée} [K] = \frac{5120}{13.7 - \ln\left(\frac{w}{0.622 + w}\right)} \quad (II-3)$$

avec $w = \frac{0.622 p_v}{p_{atm} - p_v}$ la teneur en eau de l'air humide.

La Figure II-34 permet de localiser la mesure de température de surface de la paroi Parpaing et d'identifier la température de rosée à laquelle elle est comparée.

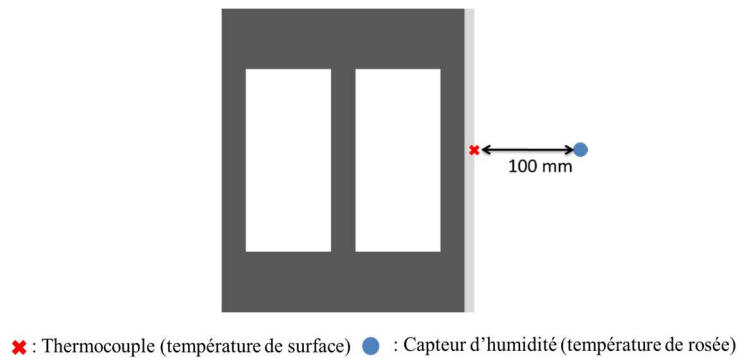


Figure II-34 : Localisation des mesures de température de surface et de rosée (vue de dessus).

La quantification de la condensation superficielle se fait sur la base de plusieurs indicateurs (Barreira and De Freitas, 2014; Zheng et al., 2004; Zillig et al., 2003) :

- L'accumulation temporelle HdC (Heures de Condensation, en h) : accumulation du nombre d'heures durant lesquelles $T_{surf} < T_{rosée}$.
- Le potentiel de condensation accumulé DHdC (Degrés Heures de Condensation en °C.h) ou PHdC (Pascals Heures de Condensation en Pa.h) : à la manière des DJU, on multiplie le temps durant lequel un risque est identifié soit par l'écart $(T_{rosée} - T_{surf})$, soit par l'écart $(p_v^{sat}(T_{rosée}) - p_v^{sat}(T_{surf}))$.

Bien que similaires, l'indicateur basé sur la pression de vapeur fournit des variations plus amples en raison de la variation exponentielle de la pression de vapeur saturante en fonction de la température.

Cette méthodologie est appliquée et discutée ci-après pour deux types de sollicitations : une augmentation de la température extérieure combinée soit à un maintien de l'humidité relative constante à 90%, soit à une absence de régulation de l'humidité relative. Pour chaque essai, les conditions intérieures sont maintenues à 20°C et 50%.

II.5.1.1. Test 1 : augmentation de la température à humidité relative constante

Les conditions de température et d'humidité relative, ainsi que les températures de rosée mesurées dans l'enceinte extérieure et à proximité de chacun des systèmes sont présentées sur la Figure II-35, l'instant $t=0$ correspondant à l'application de la sollicitation. Deux comportements se dégagent : un premier pour les parois situées près du sol (Parpaing et Laine de verre) et un second pour les parois situées en hauteur (Biosourcée et PSE). Enfin, en raison d'une perte d'information de certains capteurs d'humidité due aux niveaux très élevés d'humidité, l'étude se limitera à 30h après la sollicitation.

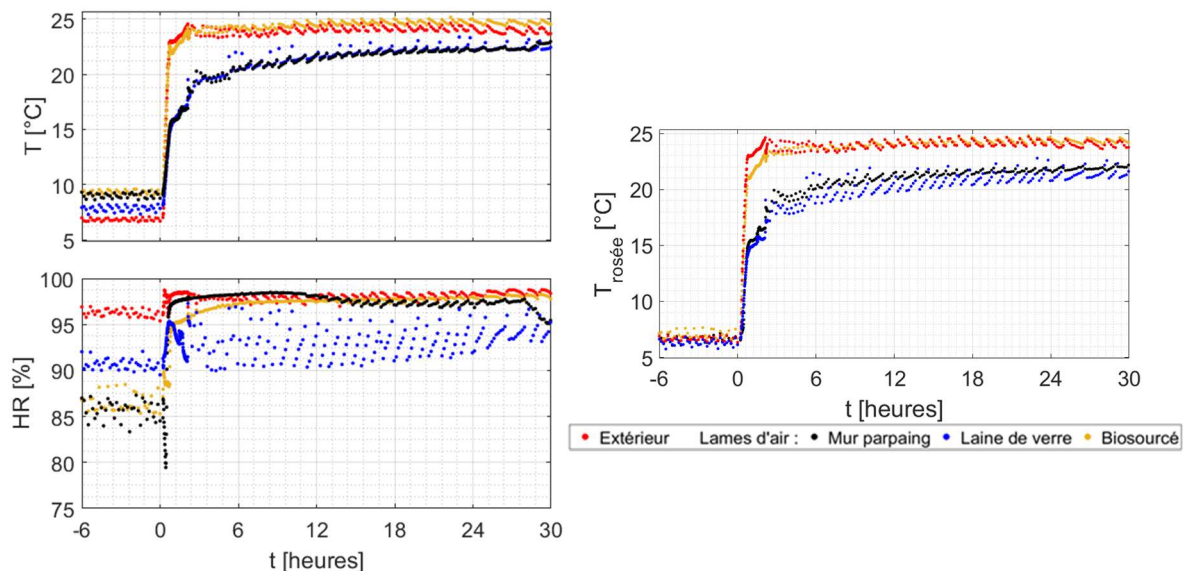


Figure II-35 : Températures, humidités relatives et températures de rosée mesurées localement pour les différentes parois lors du test 1.

La Figure II-36 montre l'évolution des températures de surface ainsi que leur différence avec les températures de rosée : le risque de condensation superficielle apparaît dès les premiers instants pour toutes les parois et existe significativement durant 1 à 2 heures pour les systèmes d'ITE et au minimum 6 heures pour la paroi Parpaing. Ces risques ont été confirmés par une inspection visuelle des parois. Enfin, on note que les fluctuations enregistrées par les capteurs d'humidité peuvent perturber l'analyse, en particulier l'identification de la fin du risque de condensation.

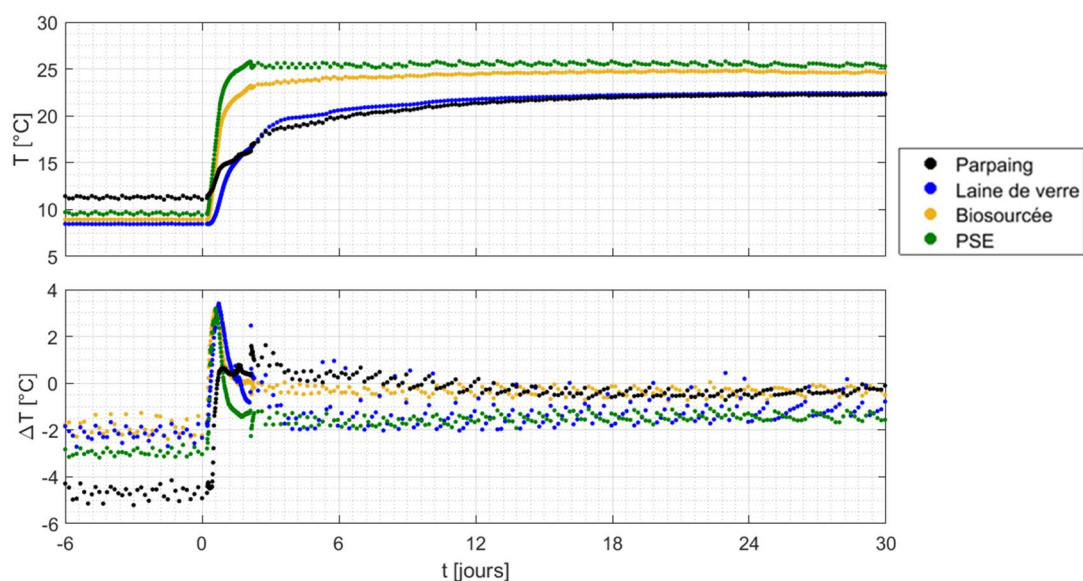


Figure II-36 : Évolution des températures de surface de la paroi Parpaing et des systèmes d'ITE et écarts avec la température de rosée lors du test 1.

Les indicateurs de risque de condensation superficielle sont évalués dans le Tableau II-10. Il apparaît que les risques les plus importants sont rencontrés pour la paroi Parpaing et les moins importants pour la paroi PSE. Cependant, les conditions aux limites n'étant pas strictement identiques, cette comparaison n'est que qualitative. On peut également noter des risques de condensation au niveau des bardages pour les systèmes d'ITE mis en œuvre par voie sèche.

	Parpaing	Laine de verre			Biosourcée			PSE
T_{surface}	Enduit	Pare pluie	Bardage	Bardage	Pare pluie	Bardage	Bardage	Enduit
$T_{\text{rosée}}$	Locale	Lame d'air	Lame d'air	Extérieur	Lame d'air	Lame d'air	Extérieur	Extérieur
HdC [h]	9.3	3.6	1.8	29	2.2	0.24	0.46	0.60
DHdC [°C.h]	3.9	2.8	1.8	52	1.8	0.08	0.40	0.98
PHdC [Pa.h]	510	320	190	8000	220	7.5	49	130

Tableau II-10 : Indicateurs HCd, DHdC et PHdC calculés pour la paroi Parpaing et pour les systèmes d'ITE lors du test 1.

II.5.1.2. Test 2 : augmentation de la température à humidité relative variable

Lors de cet essai, le générateur d'humidité de la chambre extérieure est désactivé après la sollicitation. Les conditions relevées à proximité de chacun des systèmes sont présentées sur la Figure II-37, l'instant $t=0$ correspondant à l'application de la sollicitation. Les réponses en température sont similaires à celles du test précédent, tant en termes de niveau de température que de distribution. En revanche, on note d'abord une diminution rapide de l'humidité relative, qui induit une baisse de la température de rosée durant la première heure : contrairement au test 1, les conditions associées au risque de condensation superficielle ne sont pas, ou peu,

rencontrées. Par conséquent, les indicateurs de risque présentent des niveaux plus faibles, voire nuls, pour ce second test (cf. Figure II-38).

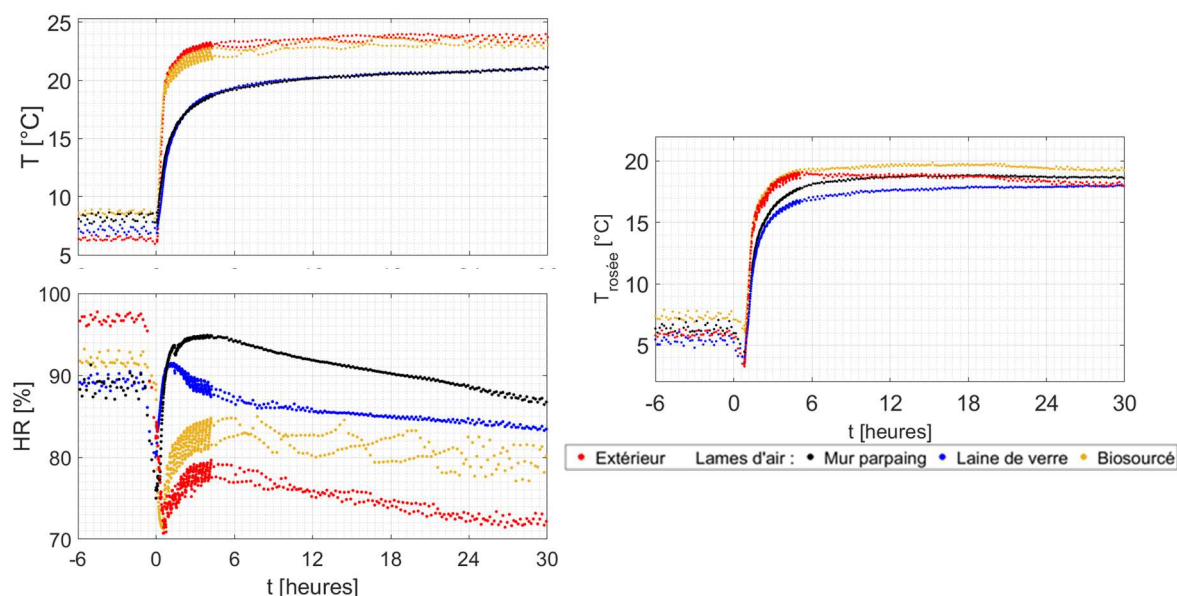


Figure II-37 : Températures, humidités relatives et températures de rosée mesurées localement pour les différentes parois lors du test 2.

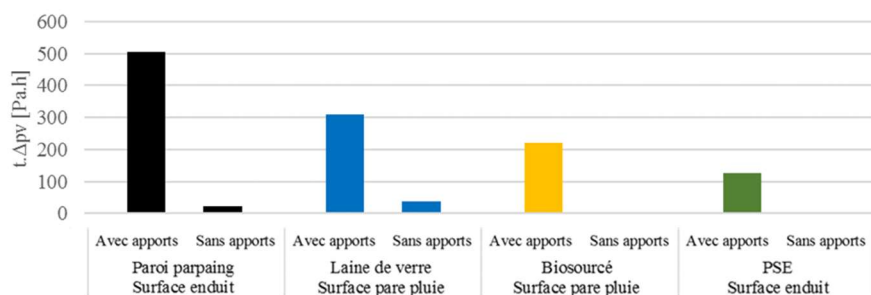


Figure II-38 : Comparaison des indicateurs PHCd calculés pour la paroi Parpaing et pour les systèmes d'ITE lors des tests 1&2.

II.5.1.3. Synthèse de l'étude sur la condensation superficielle

L'évaluation des risques de condensation superficielle dépend de la température de surface d'une part et de la température de rosée d'autre part. A sollicitation identique, les variations des températures de surface sont dépendantes de l'effusivité thermique des matériaux de la paroi. Ces dernières sont rappelées sur le Tableau II-11 et soulignent la valeur plus élevée de l'enduit par rapport aux isolants. Toutefois, l'évolution des températures de surface dépend également des conditions locales et des échanges radiatifs de grande longueur d'onde. Concernant la température de rosée, si la présence ou l'absence d'un bardage peut influencer son évolution, cette première reste largement dépendante des évolutions de l'air ambiant. Au final, les risques de condensation superficielle sont susceptibles d'apparaître aux premiers instants après une variation importante de température. En revanche, il est difficile d'identifier

un système d'ITE présentant un meilleur comportement vis-à-vis de la condensation superficielle.

	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	ρ [kg.m ⁻³]	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Effusivité [J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-0,5}]
Enduit (polystyrène)	0.32	1257	836	580
Laine de verre	0.033	15	869	21
Laine de bois	0.041	47	1333	51

Tableau II-11 : Propriétés thermiques des matériaux en surface extérieure des systèmes d'ITE.

II.5.2. Etude de la condensation interstitielle

Cette section vise à étudier le comportement thermohydrrique des parois soumises à des conditions de température et d'humidité relative pouvant conduire à de la condensation interstitielle. Pour définir ces conditions, des études préliminaires de type Glaser ont été menées. A titre d'exemple, la Figure II-39 montre que la saturation est théoriquement atteinte autour de l'interface mur-ITE des parois Laine de verre et Biosourcée lorsque les conditions intérieure et extérieure sont fixées respectivement à 17°C / 70% et 32°C / 80%.

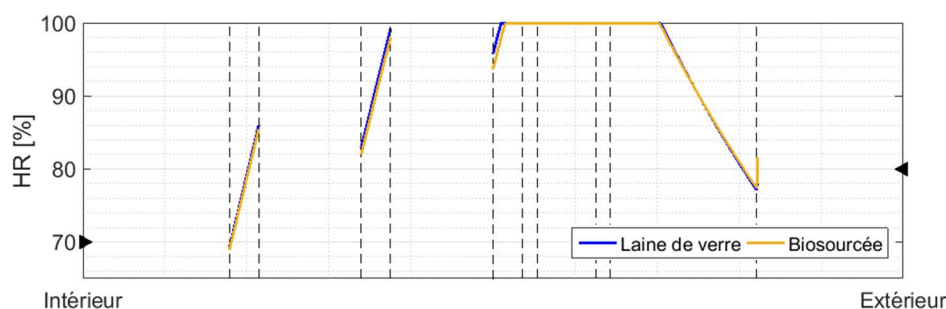


Figure II-39 : Profil théorique d'humidité relative dans les parois Laine de verre et Biosourcée en présence de condensation interstitielle.

II.5.2.1. Séquence expérimentale

Les conditions définies précédemment ont été appliquées durant 40 jours. Leurs évolutions sont présentées sur la Figure II-40. On note un bon respect des consignes durant cette séquence expérimentale. Il convient de préciser que cet essai a été réalisé après une mise à niveau des systèmes énergétiques de la chambre extérieure et de la régulation.

Pour l'ensemble des parois, les températures répondent logiquement à la sollicitation et ne sont donc pas présentées. La Figure II-41 présente l'évolution des humidités relatives à l'interface mur-ITE et à une autre position dans le système d'ITE (près de l'OSB pour les systèmes sous bardage et entre les deux couches d'isolant pour la paroi PSE). Pour la paroi Laine de verre, les humidités relatives mesurées à l'interface mur-ITE augmentent rapidement dès le début de la sollicitation. Cependant, le capteur à cette position a subi plusieurs défaillances qui ont conduit à une absence de donnée entre le 1^{er} et 31^{ème} jour. Après 35 jours, la saturation est atteinte.

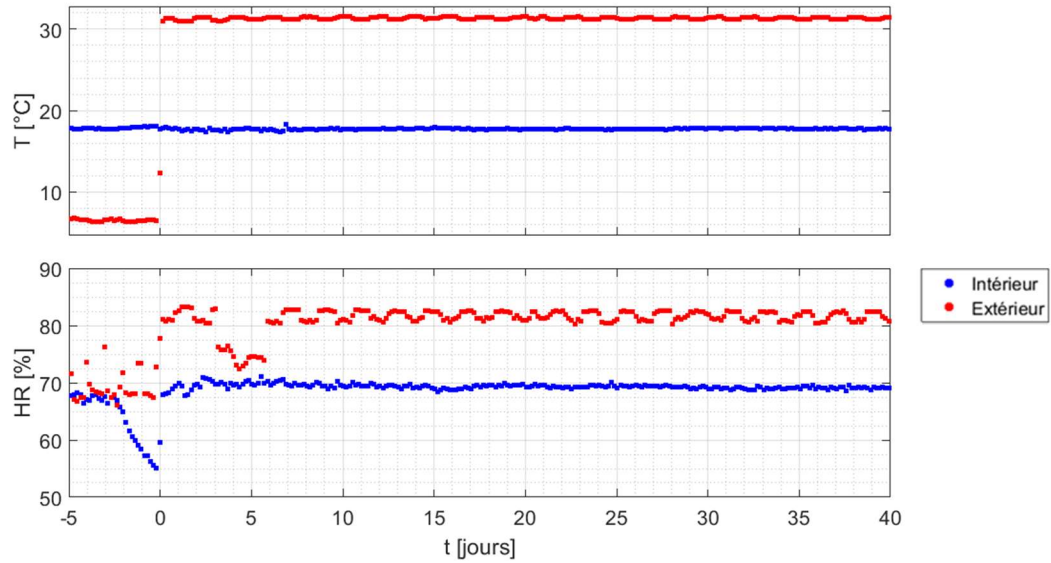


Figure II-40 : Conditions de température et d'humidité relative dans les chambres intérieure et extérieure lors de l'étude sur la condensation interstitielle.

L'humidité relative près de l'OSB de la paroi Laine de verre augmente également durant toute la séquence. En revanche, la légère hausse ponctuelle observée après 6 jours est corrélée à une augmentation importante de l'humidité relative à l'interface isolant-pare pluie dont l'origine peut être corrélée à une diminution de température (Figure II-42). Dans le cas de la paroi Biosourcée, les humidités relatives augmentent également, mais avec une dynamique plus lente et des niveaux plus faibles, en raison d'une plus grande capacité hydrique. Enfin, le même type de comportement est observé pour la paroi PSE, même si on peut noter que l'humidité relative à l'interface mur-ITE a soudainement convergé vers des niveaux de saturation sans lien apparent avec les mécanismes de transfert hydrique dans les parois.

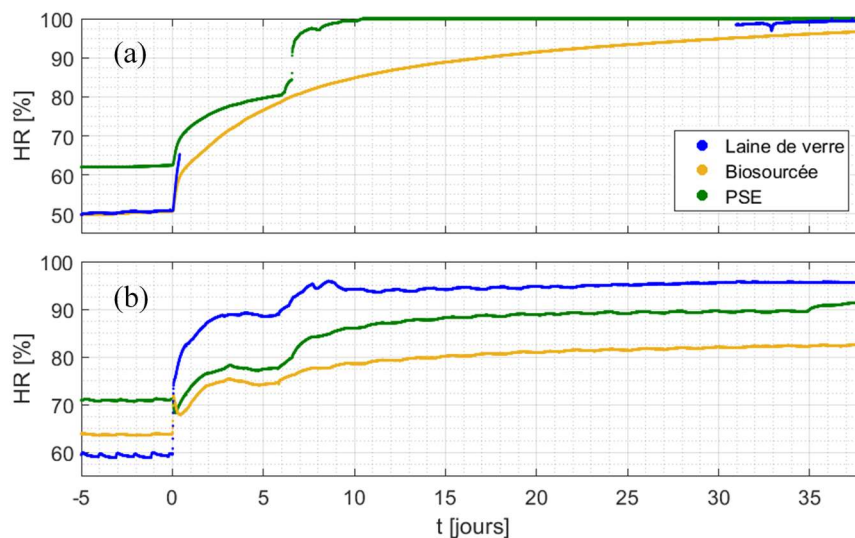


Figure II-41 : Evolution des humidités relatives mesurées aux interfaces mur-ITE (a) et au sein des ITE (b) lors de l'étude sur la condensation interstitielle.

Au final, les profils d'humidité relative mesurés après 35 jours sont confrontés aux calculs théoriques sur la Figure II-43. La comparaison confirme qu'un régime thermohydrique permanent est atteint pour la paroi Laine de verre et que la paroi PSE a également quasiment atteint son état d'équilibre. En revanche, pour la paroi Biosourcée, seule la mesure à l'interface mur-ITE semble avoir atteint son équilibre, les autres mesures étant encore 5 à 10% de leur valeur théorique.

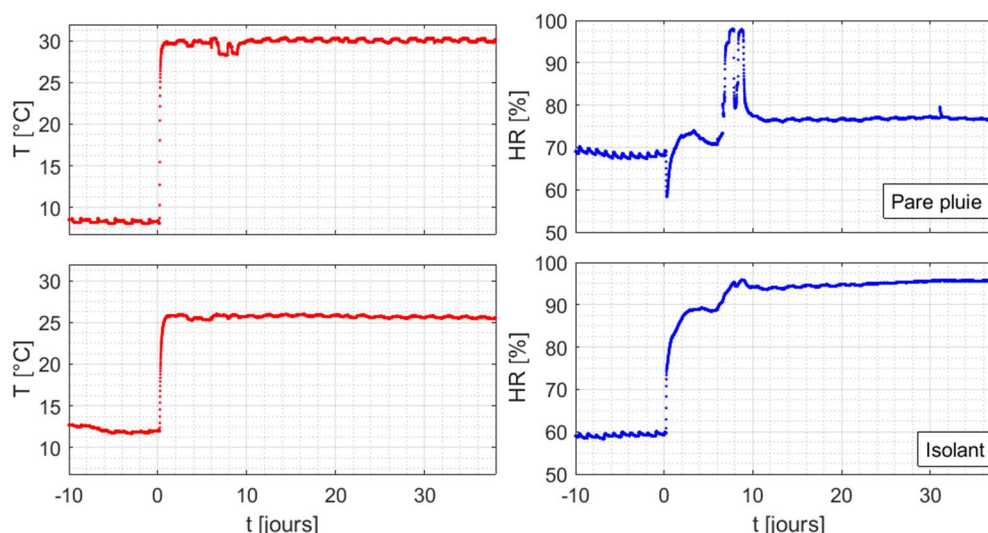


Figure II-42 : Laine de verre – Températures et humidité relatives mesurées au proche du pare pluie et dans l'isolant.

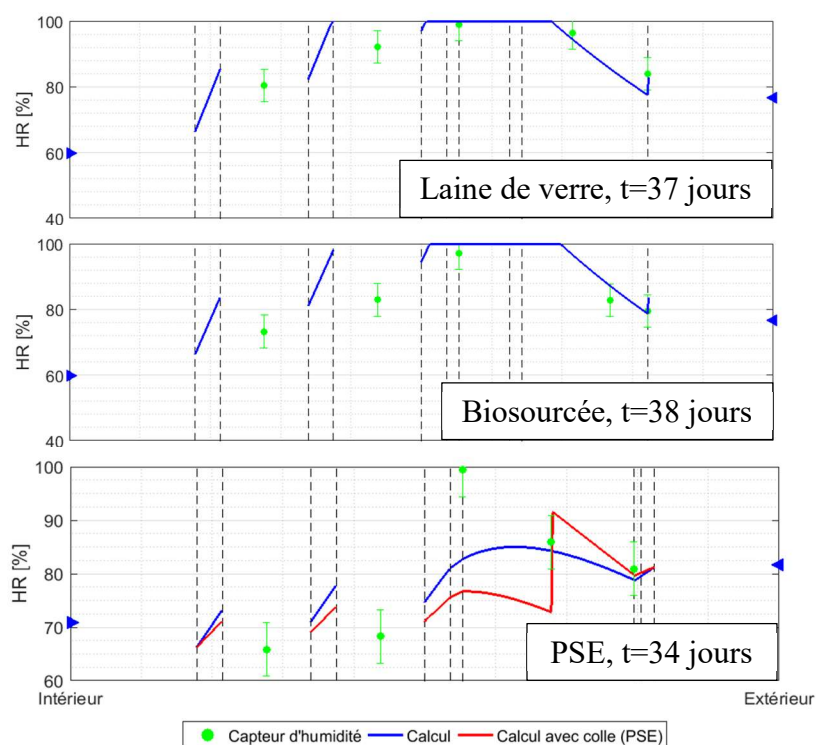


Figure II-43 : Profils théoriques d'humidité relative pour chaque paroi et confrontation aux mesures après 35 jours.

II.5.2.2. Analyse du régime permanent

Cette séquence est également mise à profit pour évaluer les résistances thermiques des différents systèmes d'isolation. Les résultats sont reportés dans le Tableau II-12 et comparés aux résultats de la Section II.4, obtenus pour des différences de température plus faibles et des parois plus sèches.

On constate une diminution des résistances thermiques des parois sous bardage en lien avec la sensibilité à l'humidité des conductivités thermiques des isolants. En ce qui concerne la résistance thermique de la paroi PSE celle-ci a uniquement légèrement diminuée.

Paroi	Laine de verre	Biosourcée	PSE
R_{th} [$K.m^{-2}.W^{-1}$] (situation à risque)	3.8	2.4	4
R_{th} [$K.m^{-2}.W^{-1}$] (situation sans risque)	4.5	3.3	4.1

Tableau II-12 : Résistances thermiques des parois (conditions à risques)

II.5.2.3. Synthèse de l'étude sur la condensation interstitielle

Cette étude a permis de mettre en exergue plusieurs points :

- La mesure de l'humidité relative dans une paroi sujette à de la condensation interstitielle reste difficile et peut conduire à des évolutions qui ne peuvent s'expliquer aisément.
- La dynamique de la réponse hydrique des différentes parois est variable. En particulier, l'influence de la capacité de stockage de la paroi Biosourcée pour retarder et limiter l'augmentation de l'humidité relative est mise en évidence. Contrairement aux autres parois, le régime permanent n'est toujours pas atteint au bout de 35 jours.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre l'expérimentation mise en place et l'analyse de différentes séquences de test ont permis de mettre en avant les points suivants. La pose des systèmes d'ITE modifie le comportement thermohydrique de la paroi : dans le cas des systèmes sous bardage, un ralentissement du séchage de la paroi parpaing a été observé ; dans le cas du système PSE, la colle utilisée pour sa fixation a constitué une source d'humidité importante, qui a eu pour conséquence de saturer localement la paroi. Lors de la séquence sans risque de condensation, il a été constaté que le comportement thermohydrique observé au sein des différentes parois répondait logiquement aux sollicitations mesurées localement. Par ailleurs, une analyse du régime permanent a souligné un bon accord entre théorie et expérience pour les profils de température et d'humidité relative ainsi que pour les résistances thermiques de la paroi Parpaing et des systèmes sous bardage. En revanche, le rôle important de la colle dans le comportement thermohydrique du système PSE a été confirmé, même si cette paroi n'a pas atteint un état d'équilibre. Enfin, le rôle positif d'un isolant biosourcé a été mis en évidence lors de la séquence avec risque de condensation, notamment en raison de sa capacité hydrique plus élevée qu'un isolant minéral, toutefois il est important de relever que sa conductivité thermique est sensible à l'humidité relative.

Chapitre III : Simulation du comportement thermohydrigue de parois isolées par l'extérieur

Ce chapitre concerne la modélisation et la simulation des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les systèmes testés au chapitre précédent. Des confrontations simulations expérience sont réalisées. Dans un premier temps, les hypothèses de modélisation et le modèle retenu pour la paroi parpaing sont décrits. Le comportement thermohydrigue de la paroi Parpaing et des systèmes sous bardage est ensuite simulé pour les séquences sans et avec risque de condensation présenté au chapitre II. Le cas particulier du système PSE est traité dans un dernier temps. Ces études numériques sont complétées par des études de sensibilité.

III.1. Modélisation des transferts de chaleur et d'humidité

Différents modèles de transferts de chaleur et de masse au sein de parois existent dans la littérature (Künzel, 1995; Nicolai et al., 2010) et leurs différences résident sur les hypothèses choisies (potentiel moteur, expressions des flux, prise en compte de l'hystérésis...).

Le modèle développé dans cette thèse est basé sur les hypothèses suivantes :

- Au sein du VER on suppose un équilibre thermodynamique local entre les différentes phases (solide, liquide, gaz).
- Les matériaux sont considérés comme indéformables, isotropes, et leurs propriétés sont supposées indépendantes de la température ;
- La phase gazeuse est composée de vapeur d'eau ;
- La pression totale de la phase gazeuse est supposée constante (i.e. pas de gradients de pression) ;
- La phase liquide est incompressible ;
- Les phénomènes d'hystérésis et la thermodépendance des isothermes de sorption sont négligés ;
- On ne considère pas de réactions chimiques ni d'effet de la gravité.

En prenant la température et l'humidité relative comme potentiels moteurs, les équations décrivant les transferts de chaleur et d'humidité dans les matériaux s'écrivent :

$$C_{eq} \frac{dT}{dt} = \nabla(-\lambda_{app} \nabla T + K L_v) \quad (III-1)$$

$$\rho_s \frac{dw_m}{dHR} \frac{dHR}{dt} = \nabla \left((D_v^{HR} + D_l^{HR}) \nabla HR + D_v^T \nabla T \right) \quad (III-2)$$

Avec C_{eq} la capacité thermique volumique, λ_{app} la conductivité apparente, K et L_v le taux et la chaleur latente de changement de phase, ρ_s la masse volumique sèche, w_m la teneur en eau massique. Enfin, D_v^{HR} , D_l^{HR} et D_v^T sont respectivement les coefficients de diffusion de la vapeur, de migration de l'eau liquide et de thermo-diffusion de la vapeur. Le Tableau III.1 donne les expressions de ces différents termes.

Energie	C_{eq}	λ_{app}	K	L_v
	$\rho_s * (cp_s + w_m cp_l)$	$\lambda_s + \alpha w_m$	$D_v^{HR} \nabla HR + D_v^T \nabla T$	$L_v(T_{ref}) + (cp_v - cp_l)(T - T_{ref})$
Masse	w_m	D_v^{HR}	D_l^{HR}	D_v^T
	Modèle de GAB	$D_v \frac{M_v p_{v,sat}(T)}{R T}$	$\frac{dw_m}{dHR} \exp(p1 + \frac{p2}{w_m})$	$D_v \frac{M_v}{R T} HR \left(\frac{dp_{v,sat}(T)}{dT} - \frac{p_{v,sat}(T)}{T} \right)$

Tableau III.1 : Coefficients de stockage et de transfert des équations de conservation.

III.2. Simulation du comportement thermohydrrique de la paroi parpaing

III.2.1. Présentation du modèle

La Figure III-1 présente la géométrie considérée (parpaing + enduit) et les conditions aux limites.

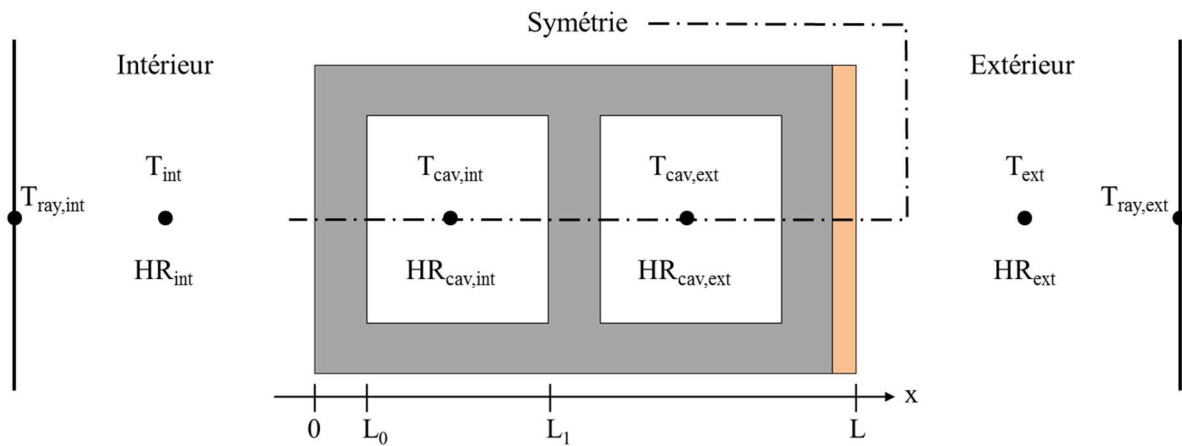


Figure III-1 : Paroi Parpaing – Géométrie considérée et conditions limites associées.

Bilans au sein des cavités

En supposant la température et l'humidité relative de l'air homogène dans chaque alvéole, les bilans d'énergie et de masse s'écrivent :

$$V_{cav} \left(C_{cav} \frac{dT_{cav}}{dt} + (L_{v_0} + c_{p_v} (T_{cav} - T_{ref})) \frac{M_v}{R \cdot T_{cav}} \left(\frac{dp_{v,cav}}{dt} - \frac{p_{v,cav}}{T_{cav}} \frac{dT_{cav}}{dt} \right) \right) = \sum (\varphi_{T,cav} S_{cav}) \quad (III-3)$$

$$V_{cav} \frac{M_v}{R T_{cav}} \left(p_{v,sat}(T_{cav}) \frac{dHR_{cav}}{dt} + HR_{cav} \left(\frac{dp_{v,sat}(T_{cav})}{dT} - \frac{p_{v,sat}(T_{cav})}{T_{cav}} \right) \frac{dT_{cav}}{dt} \right) = \sum (\varphi_{m,cav} S_{cav}) \quad (III-4)$$

Où V_{cav} et C_{cav} sont respectivement le volume et la capacité thermique volumique de la cavité. S_{cav} représente la surface d'échange entre le volume d'air et les différents cloisons.

$\varphi_{T,cav}$ et $\varphi_{m,cav}$ expriment les densités de flux de chaleur et de masse échangées avec les surfaces de chaque cavité :

$$\varphi_{T,cav} = h_{cv,cav} (T_{cav} - \overline{T_{surf}}) + \varphi_{m,cav} L_{v_0} \quad (III-5)$$

$$\varphi_{m,cav} = k_{m,cav} \left(\frac{M_v}{R} \right) \left(\left(\frac{HR p_{v_{sat}}(T)}{T} \right)_{cav} - \left(\frac{\overline{HR_{surf}} p_{v_{sat}}(\overline{T_{surf}})}{\overline{T_{surf}}} \right) \right) \quad (III-6)$$

Avec :

$h_{cv,cav}$ et $k_{m,cav}$, les coefficients d'échange par convection thermique et massique, $\overline{T_{surf}}$ et $\overline{HR_{surf}}$, la température et l'humidité relative moyenne en surface de chaque cloison.

Les transferts radiatifs entre les faces internes des cloisons de parpaing sont linéarisés, le flux net échangé entre les parois en $x=L_0$ et $x=L_1$ est de la forme :

$$\varphi_{ray-GLO|x=L_0} = h_{ray} (\overline{T_{surf|x=L_0}} - \overline{T_{surf|x=L_1}}) \quad (III-7)$$

Avec :

$\overline{T_{surf|x=L_0}}$ et $\overline{T_{surf|x=L_1}}$, les températures moyennes en surface des cloisons en vis-à-vis, h_r le coefficient d'échange par rayonnement linéarisé :

$$h_{ray} = 4\varepsilon\sigma \left(\frac{\overline{T_{surf|x=L_0}} + \overline{T_{surf|x=L_1}}}{2} \right)^3 \quad (III-8)$$

Conditions aux limites externes

Les 2 faces externes de la paroi sont soumises à des échanges thermiques par convection, évaporation/condensation et rayonnement de grande longueur d'onde.

En $x=L$, on peut poser :

$$\varphi_{T|x=L} = h_{cv} (T_{|x=L} - T_{amb}) + \varepsilon \sigma (T_{|x=L}^4 - T_{ray}^4) + \varphi_{m|x=L} L_v \quad (III-9)$$

Avec :

T_{amb} la température ambiante mesurée au sein des chambres climatiques et T_{ray} la température de surface en regard avec la paroi.

Pour les échanges radiatifs, les surfaces internes des parois de l'enceinte climatique et du sol sont considérées à une même température.

Pour les transferts de masse en surface des parois la relation suivante est retenue :

$$\varphi_{m|x=L} = k_m \left(\frac{M_v}{R} \right) \left(\frac{HR_{|x=L} p_{v_{sat}}(T_{|x=L})}{T_{|x=L}} - \frac{HR_{amb} p_{v_{sat}}(T_{amb})}{T_{amb}} \right) \quad (III-10)$$

III.2.2. Propriétés des matériaux

Les valeurs des propriétés utilisées pour les simulations sont données dans le Tableau III.2. Les tracés de l'isotherme de sorption et de l'évolution des coefficients de diffusion massique en fonction de la teneur en eau sont présentés sur la Figure III-2. Ces propriétés sont tirées du Chapitre II. A titre indicatif, les coefficients de diffusion D_v^W et D_l^W , fonctions de la teneur en

eau, sont liés aux coefficients de diffusion massique D_v^{HR} et D_l^{HR} par la pente de l'isotherme de sorption θ tel que :

$$D_i^W = \theta D_i^{HR} \quad (III-11)$$

Où $i = v$ ou l pour le coefficient de diffusion de vapeur d'eau et de migration d'eau liquide respectivement.

	λ_{app}	ρ_s	C_{ps}	ε	μ	W_{GAB}	C_{GAB}	K_{GAB}	p_1	p_2
Parpaing	1.3	1890	800	0.75	20	0.002	10	0.9	-12	-0.01
Enduit	0.36	1560	830	0.75	15	0.003	10	0.9	-13.5	-0.015

Tableau III.2 : Paroi Parpaing - Propriétés des matériaux.

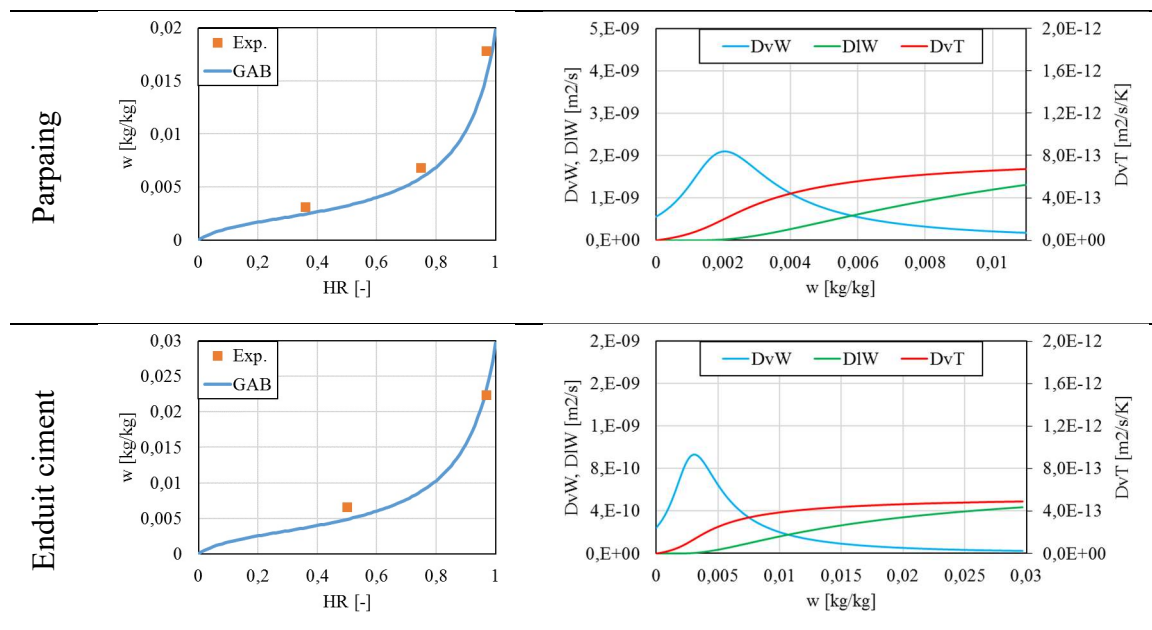


Figure III-2 : Paroi Parpaing - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion massique

III.2.3. Confrontation simulation expérience

Les simulations sont réalisées en exploitant deux séquences de mesures décrites au chapitre II et qui correspondent aux scénarios :

- Sans risque de condensation (simulation « saine », II.4),
- Avec risque de condensation interstitielle (simulation « à risques », II.5.2).

Les coefficients d'échange par convection sont fixés aux valeurs retenues dans le chapitre II : $5W.m^{-2}.K^{-1}$ pour les surfaces externes de la paroi et $2.5W.m^{-2}.K^{-1}$ dans les alvéoles. Une étude de sensibilité menée sur le coefficient d'échange par convection avec l'ambiance est donnée en Annexe B. Les équations sont résolues à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics.

Suite à une étude de sensibilité numérique, les paramètres suivants ont été retenus pour les simulations. Le pas de temps de calcul maximal est fixé à 600 secondes, la tolérance relative est fixée à 10^{-3} et le maillage est constitué de 310 éléments.

Pour fixer les conditions initiales, un calcul des profils de température et d'humidité relative est réalisé en supposant un régime stationnaire avant l'application de la sollicitation. Un rappel des

températures et des humidités relatives des chambres intérieure et extérieure est donné sur la Figure III-3.

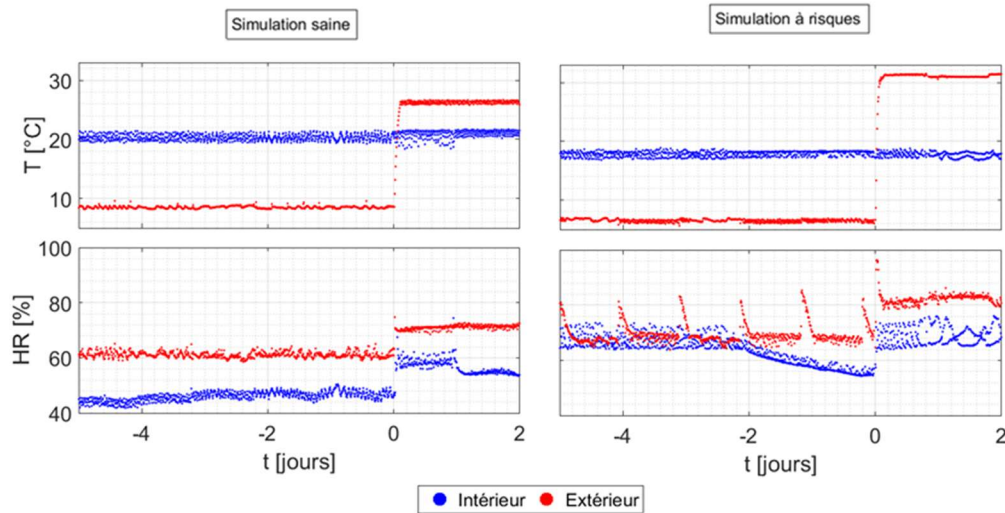


Figure III-3 : Rappel des consignes des chambres intérieure et extérieure pendant la transition.

La Figure III-4 présente les profils numériques initiaux de température, d'humidité relative et de teneur en eau pour chacune des séquences. Les mesures de température et d'humidité sont également reportées sur ces graphes. Les profils présentés sont situés sur l'axe de symétrie (cf. Figure III-1). En complément, les champs de température et d'humidité relative initiaux sont présentés en Annexe C. Dans le cas de la séquence saine, on note une sous-estimation de l'humidité relative dans l'alvéole extérieure.

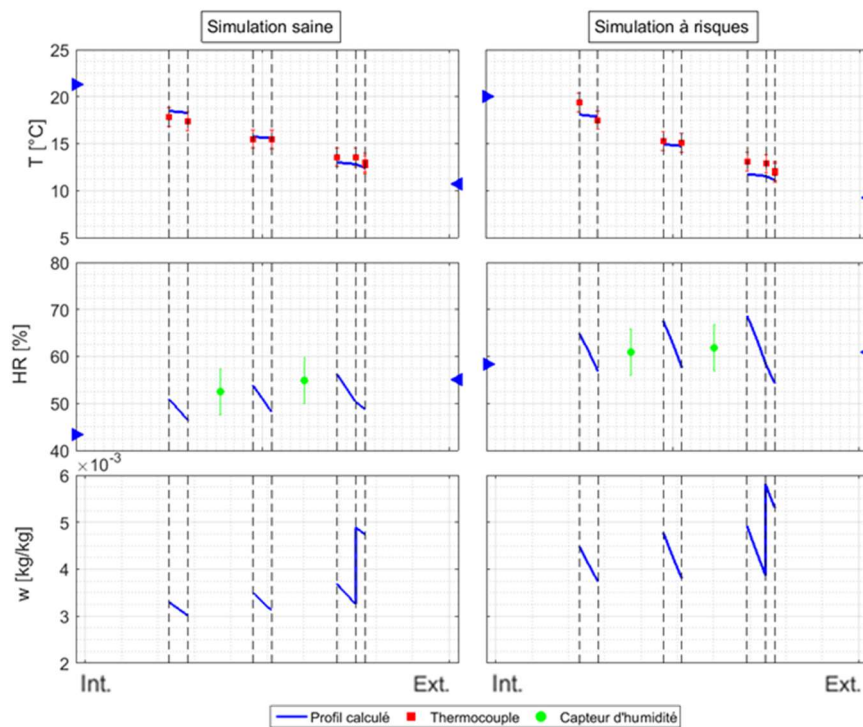


Figure III-4 : Paroi Parpaing - Conditions initiales.

Les comparaisons des simulations avec les données expérimentales (températures, flux de chaleur et humidités relatives) sont présentées sur la Figure III-5. Du fait d'un dysfonctionnement du capteur situé dans l'air à proximité de la paroi Parpaing, la simulation à risques est réalisée jusqu'à 15 jours après le changement de consigne.

Globalement, le comportement thermique de la paroi est bien représenté pour les deux séquences de mesure. Dans le cas de la simulation à risques, on constate un écart sur la densité de flux à compter du 7^{ème} jour. 24 heures plus tard, l'écart se stabilise autour d'une valeur moyenne de 8 W.m^{-2} . Cette perturbation peut être liée au fait que le fluxmètre est placé en surface d'enduit, de ce fait la mesure est directement influencé par l'environnement extérieur. Par ailleurs, une corrélation entre cette déviation et un état de saturation en surface d'enduit est constatée (Annexe D).

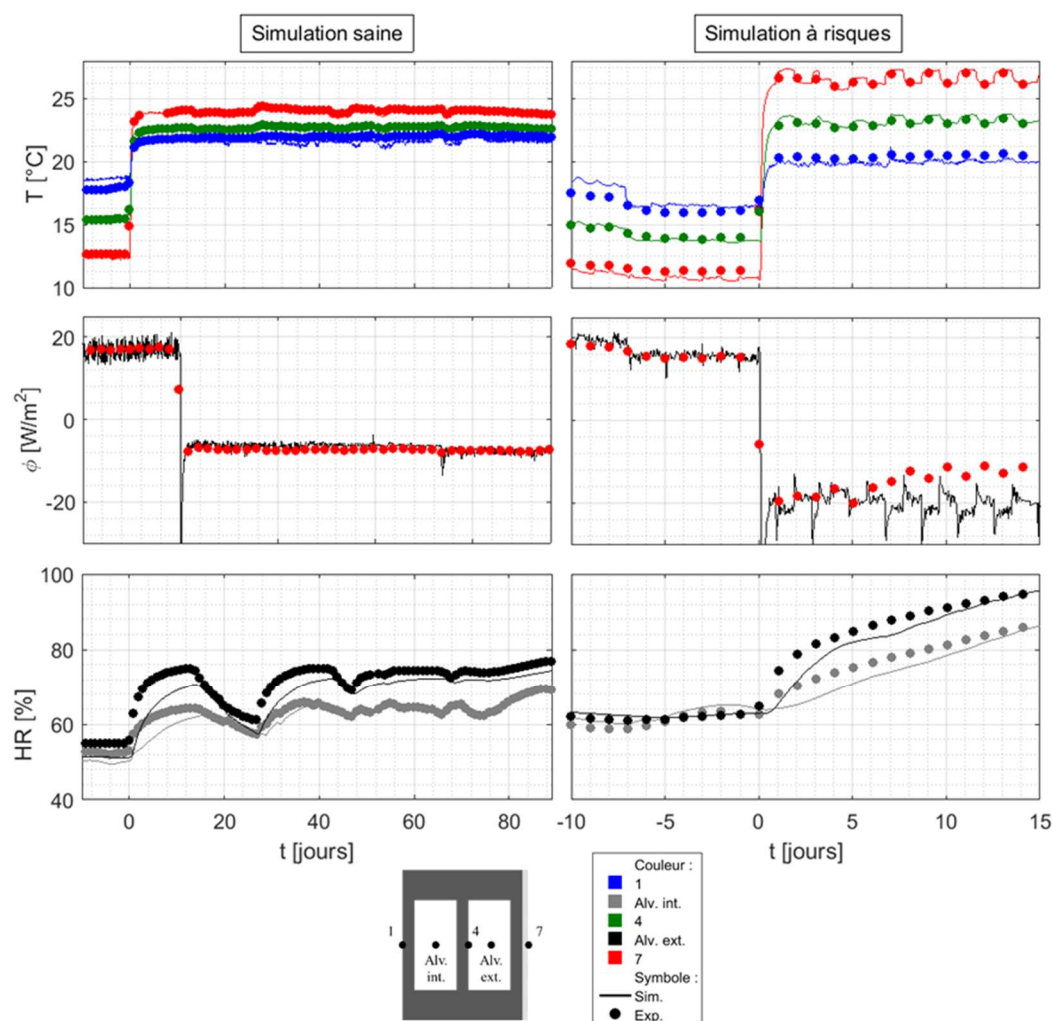


Figure III-5 : Paroi Parpaing – Confrontation simulation et expérience.

En ce qui concerne les humidités relatives des écarts sont observés entre simulation et expérience en particulier pour le test « séquence saine » durant toute la séquence. L'observation des tracés montre que ces écarts sont essentiellement dus aux conditions initiales. L'étude de l'influence des conditions aux limites a permis de mettre en avant qu'en augmentant l'humidité relative de la chambre extérieure de 5%, on aboutit à une confrontation simulation expérience

plus satisfaisante (Figure III-6). Cette correction est conservée pour toutes les simulations de la séquence saine. En revanche, il convient de noter que celle-ci ne s'applique pas pour la séquence à risques, puisqu'elle a eu lieu après un changement des systèmes énergétiques de la chambre extérieure et des capteurs de mesure des conditions ambiantes.

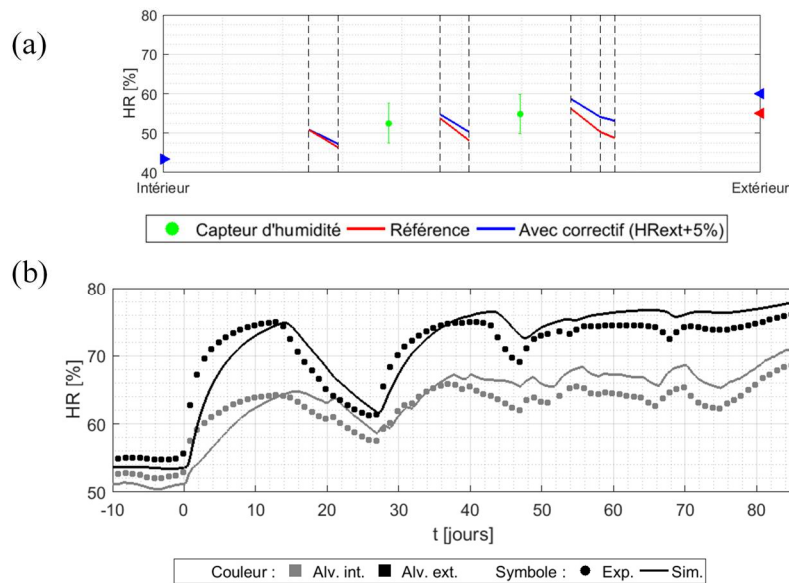


Figure III-6 : Paroi Parpaing – Prise en compte d'une correction de l'humidité relative extérieure (a : Profils d'humidité relative ; b : Evolutions transitoires).

III.2.4. Etudes de sensibilité

Une étude de sensibilité des propriétés hydriques des matériaux est réalisée sur le test « séquence saine » afin d'affiner la simulation du comportement transitoire de la paroi. On s'intéresse en particulier à l'influence d'une modification de l'isotherme de sorption du parpaing et du facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'enduit sur les humidités relatives.

La courbe de sorption du parpaing est tout d'abord modifiée ce qui a une incidence directe sur l'inertie hydrique et les transferts de masse (coefficient de diffusion de la vapeur et coefficient de migration de l'eau liquide, cf. Figure III-7). En diminuant la pente de sorption du parpaing on constate une meilleure prédiction de la dynamique, l'équilibre hydrique est atteint plus rapidement (Figure III-8).

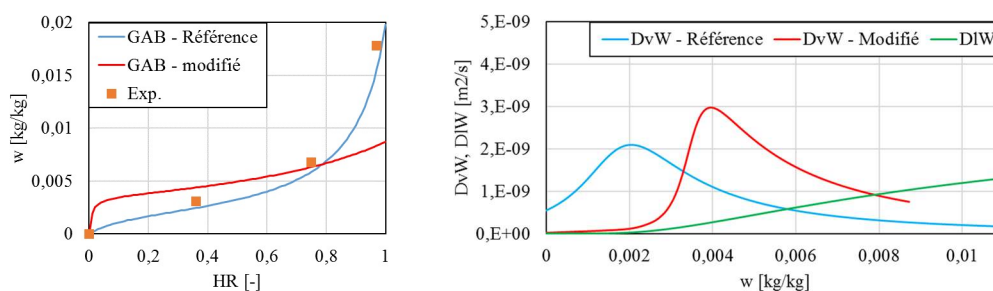


Figure III-7 : Parpaing - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion massiques (liquide, vapeur) associés.

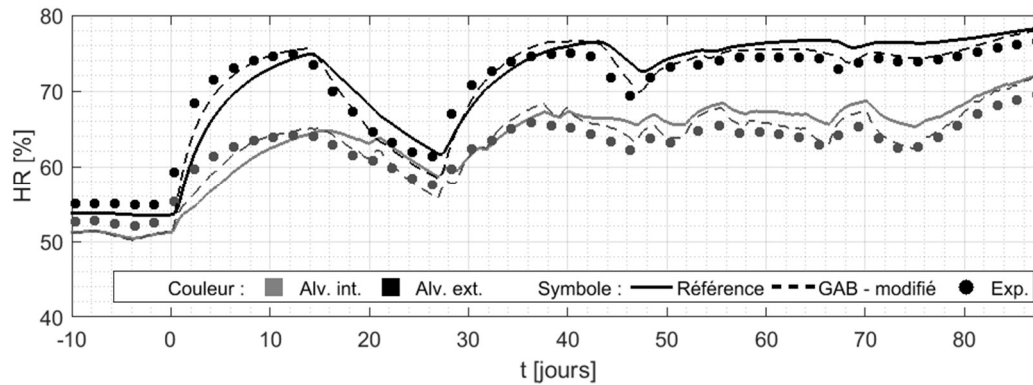


Figure III-8 : Paroi Parpaing - Influence de la pente de l'isotherme de sorption du parpaing.

La Figure III-9 présente l'incidence d'une variation de la valeur du facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'enduit. Lorsque celui-ci est augmenté de 15 à 30, on observe des niveaux plus faibles d'humidité relative dans l'alvéole extérieure. Le même constat, mais dans une moindre mesure, est fait dans l'alvéole intérieure. On observe un meilleur accord pour les niveaux simulés à 0 et 90 jours, en revanche, on peut voir que l'inertie hydrique n'est pas pénalisée. Une aussi grande augmentation du facteur de résistance à la vapeur peut se justifier par les différentes incertitudes de mesures, mais également par l'incertitude liée à l'épaisseur de l'enduit.

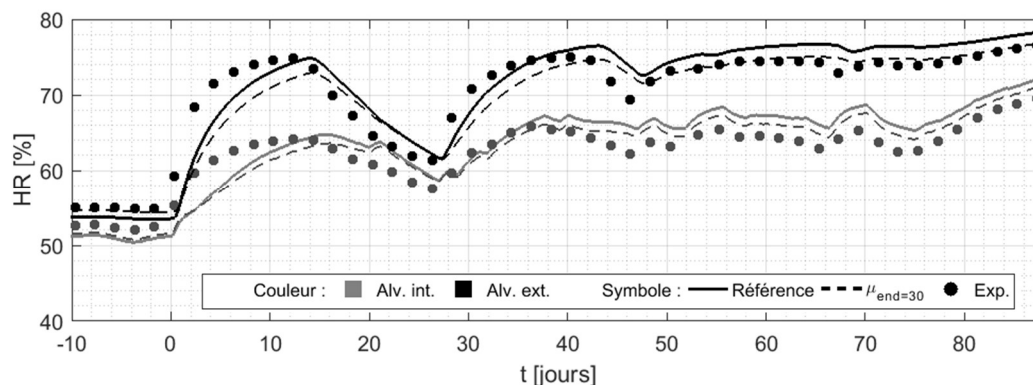


Figure III-9 : Paroi Parpaing - Influence du facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'enduit.

Compte tenu des résultats de cette analyse de sensibilité, une simulation finale a été réalisée avec les correctifs suivants : modification de la pente de sorption du parpaing (cf. Figure III-7) et augmentation du facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'enduit de 15 à 30. Les humidités relatives simulées sont présentées sur la Figure III-10 et comparées aux résultats calculés avant ces changements. On constate désormais un accord plus satisfaisant entre le calcul et la mesure. Enfin, l'impact de ces corrections sur le flux de chaleur est relativement faible (Figure III-11).

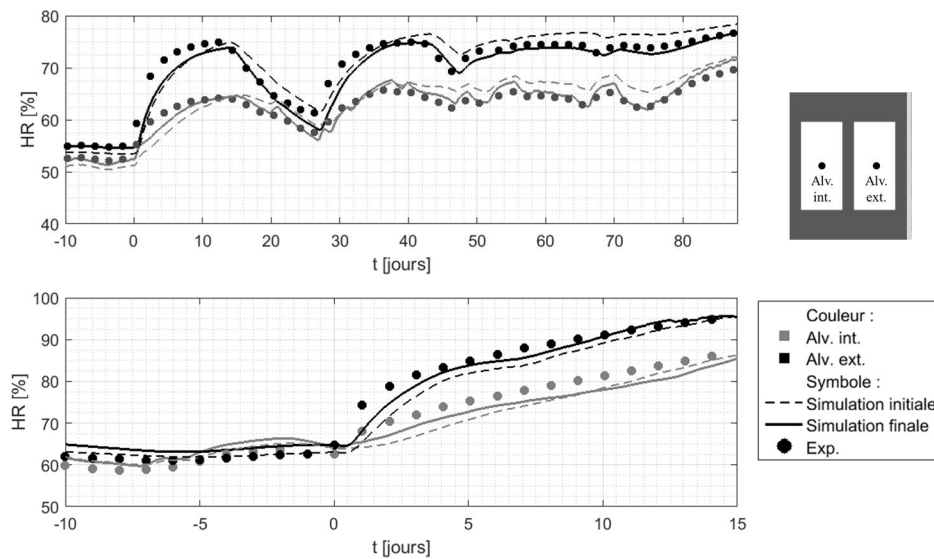


Figure III-10 : Paroi Parpaing - Evolutions des humidités relatives suite à l'étude de sensibilité.

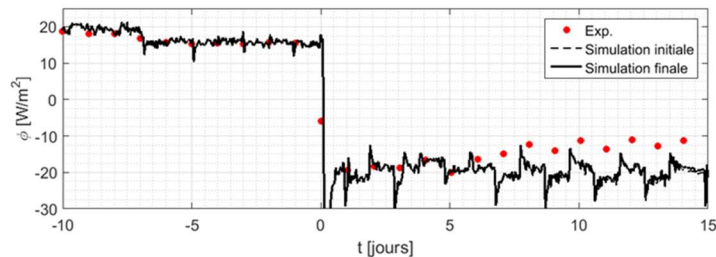


Figure III-11 : Comparaison des flux de chaleur calculés (avec et sans modifications des propriétés matériaux) au flux de chaleur mesuré (simulation à risques).

III.3. Simulation du comportement thermohydrrique des systèmes ITE sous bardage

III.3.1. Présentation du modèle

Des études sont réalisées sur les systèmes ITE seuls et sur la paroi complète. La Figure III-12 présente les géométries et les conditions aux limites utilisées pour les deux cas. Du côté de l'ambiance extérieure, les transferts thermiques tiennent compte des échanges par :

- Convection entre la surface du pare pluie et la lame d'air ventilée,
- Rayonnement GLO (entre la surface du pare pluie et la surface du bardage),
- Evaporation/condensation en surface du pare pluie.

Dans le cas des transferts de masse, on suppose des échanges par convection massique entre la surface du pare pluie et la lame d'air ventilée.

Du côté intérieur, les conditions aux limites sont définies comme précédemment (Eqs. (III-9) et (III-10)) lorsque l'on considère la présence du mur parpaing (configuration « Paroi complète ») ou imposées par les mesures à l'interface mur-ITE (configuration « ITE seule »).

Lorsque l'on prend en compte l'ensemble de la paroi, deux hypothèses peuvent être considérées à l'interface enduit ciment/ITE :

- Le contact est parfait : continuité de la température et de l'humidité relative,
- Le contact est imparfait : discontinuité de la température et de l'humidité relative.

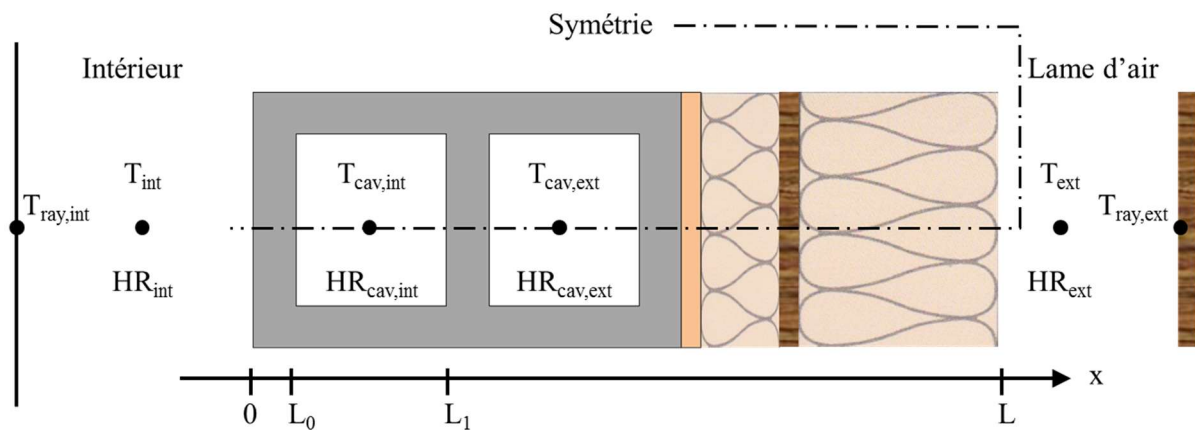
Dans le second cas, on doit alors introduire une résistance thermique et une résistance hydrique :

$$\varphi_T = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad | \quad R_{th} = \frac{e_i}{\lambda_a} \quad (III-12)$$

$$\varphi_m = \frac{\Delta p_v}{R_{m,v}} \quad | \quad R_{m,v} = \frac{e_i}{\delta_{pa}} \quad (III-13)$$

Avec e_i , l'épaisseur d'air équivalente.

Paroi complète :



ITE seule :

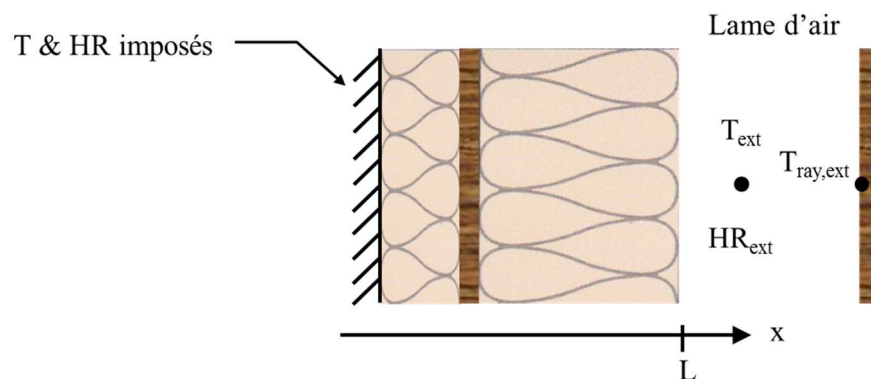


Figure III-12 : Géométries et conditions limites des systèmes sous bardage.

III.3.2. Propriétés des matériaux

Le Tableau III.3 rappelle les propriétés mesurées des différents matériaux (2 laines de verre, laine de bois, ouate de cellulose, OSB et pare pluie) qui sont exploitées pour les simulations. Les évolutions des isothermes de sorption et des coefficients de diffusion sont

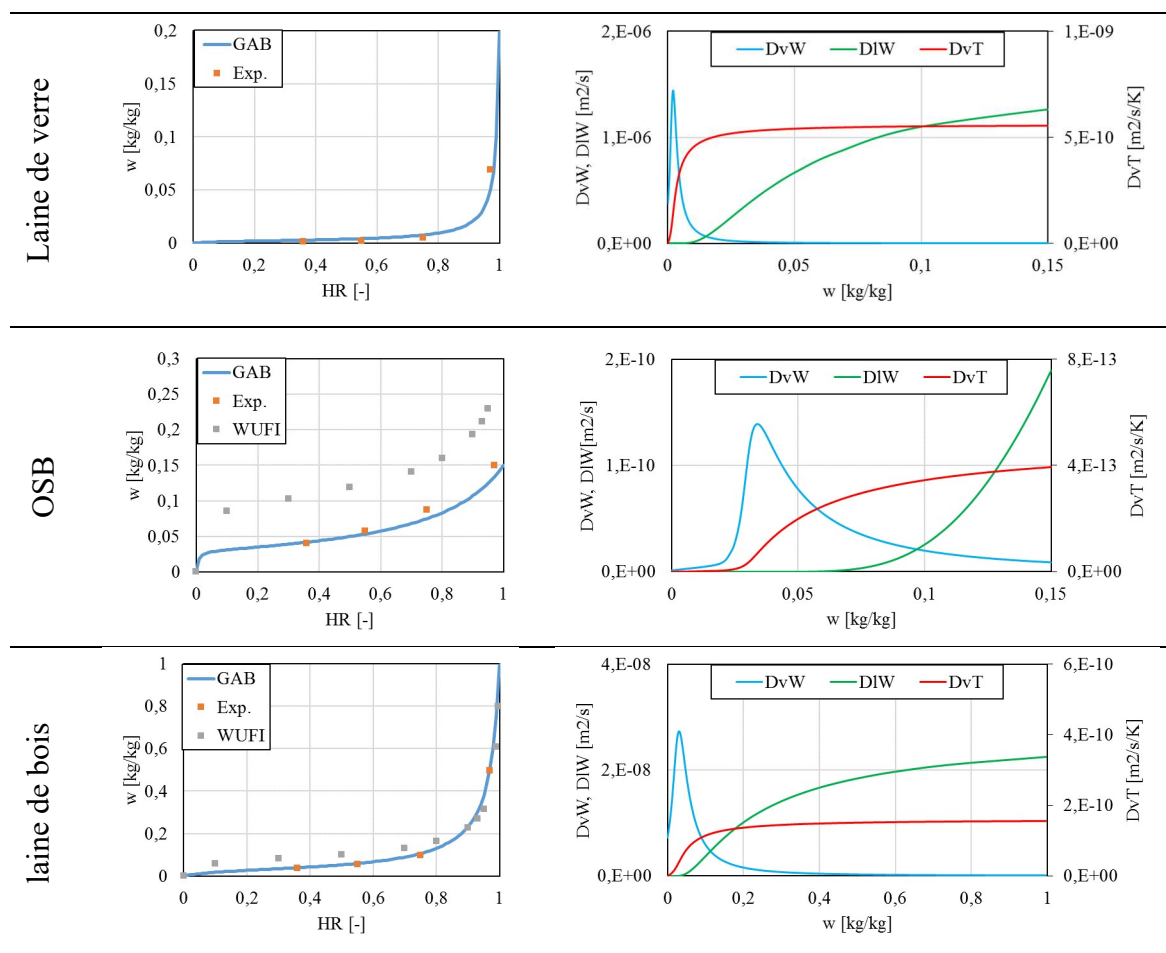
présentées sur la Figure III-13. Du fait de sa faible épaisseur, le pare-pluie est modélisé comme un élément résistif.

	λ_{app}	ρ_s	C_{ps}	ε	μ	W_{GAB}	C_{GAB}	K_{GAB}	$p1$	$p2$
Isoconfort	0.042	15	860	-	2.5	0.002	10	0.99	-10	-0.05
Isofacade	0.035	30	860	-	3	0.002	10	0.99	-10	-0.05
Laine de bois	Eq. (III-14)	47	1330	-	3.6	0.03	10	0.97	-13.5	-0.2
Ouate de cellulose	0.044	55	1200	-	2	0.04	20	0.95	-13.5	-0.2
OSB	0.1	560	1300	-	60	0.03	200	0.8	-12	-0.6
Pare pluie	1	240	1000	0.7	400	-	-	-	-	-

Tableau III.3 : Parois sous bardages - Propriétés des matériaux.

Contrairement aux autres matériaux, on considère une dépendance de la conductivité thermique de la laine de bois à la teneur en eau du fait de la forte hygroscopicité de ce matériau. De plus, il s'agit d'un élément disposant d'une importante résistance thermique (épaisseur & conductivité thermique), en comparaison avec l'enduit ou l'OSB. La corrélation présentée par l'Eq. (III-14) est déduite des mesures expérimentales de conductivité thermique (état sec, état humide).

$$\lambda_{Laine\ de\ bois} = 0.041 + 0.113 w_m \quad (III-14)$$



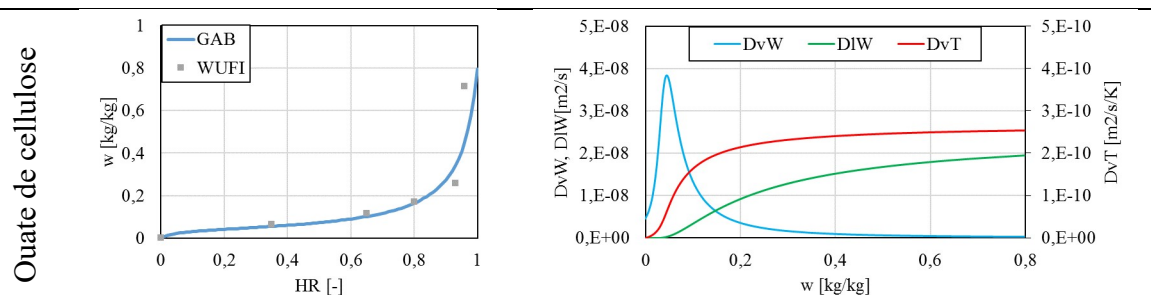


Figure III-13 : Parois sous bardage - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion des matériaux.

III.3.3. Paroi Biosourcée

Les coefficients d'échange dans les alvéoles de parpaing sont fixés à $2.5W.m^{-2}.K^{-1}$ et à $5W.m^{-2}.K^{-1}$ pour les échanges avec l'ambiance intérieure et l'extérieur (lame d'air ventilée). On suppose un régime permanent atteint sur l'ensemble de la paroi avant le changement de consigne.

Les profils initiaux de température, d'humidité relative et de teneur en eau sont présentés sur la Figure III-14a.

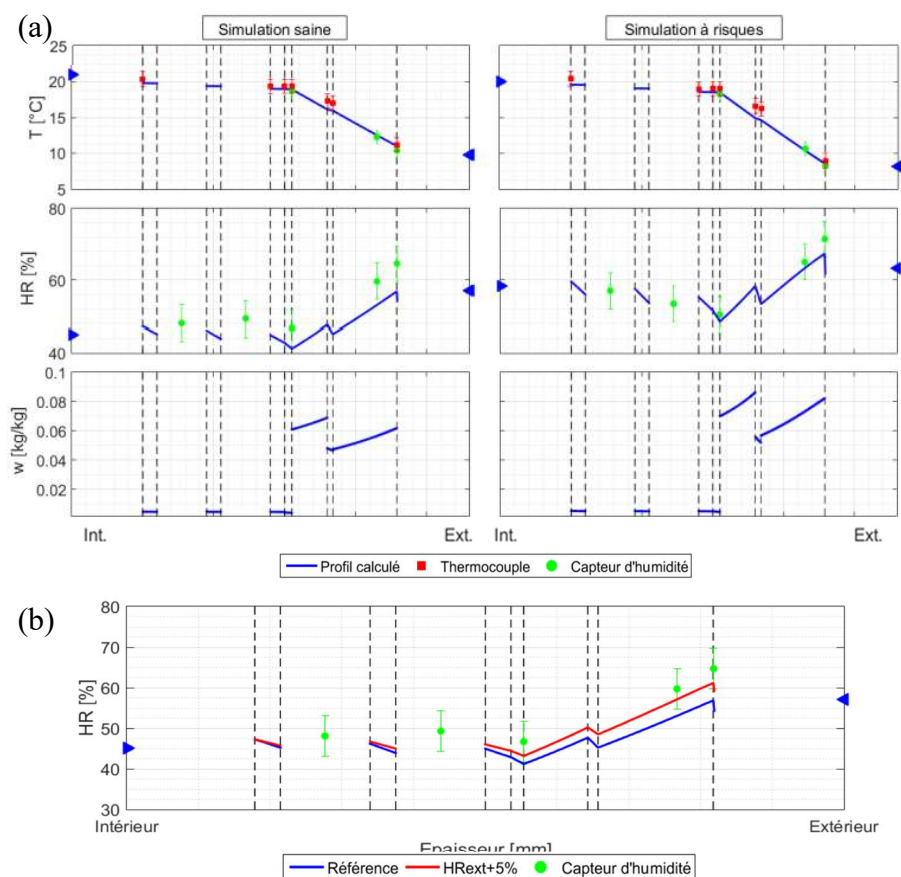


Figure III-14 : Paroi Biosourcée - a : Conditions initiales, b : correctif sur l'humidité relative extérieure.

On observe que les températures calculées sont en bon accord avec les mesures, dans le cas des humidités relatives, on observe des écarts importants entre le calcul et la mesure pour la simulation saine. Comme cela a été observé pour la paroi Parpaing, on note qu'augmenter l'humidité relative extérieure de 5% permet de corriger le profil initial et d'arriver aux bornes inférieures des incertitudes des capteurs d'humidité (Figure III-14b). Cette correction est conservée pour le reste des simulations saines de la paroi Biosourcée.

III.3.3.1. Système ITE seule

La Figure III-15 présente la confrontation des résultats de simulation aux mesures. La simulation à risque est réalisée jusqu'à 38 jours après le changement de consigne. Concernant les températures, on observe des évolutions en phase, avec de faibles écarts entre le calcul et la mesure. Les densités de flux de chaleur sont bien appréhendées, toutefois, on observe des écarts pour la simulation à risques après le changement de consigne. Ceux-ci tendent à diminuer avec le temps et un accord est retrouvé à partir du 30^{ème} jour. En revanche, les simulations ne sont pas satisfaisantes en ce qui concerne l'humidité relative : les cinétiques des humidités relatives simulées sont plus lentes que celles mesurées.

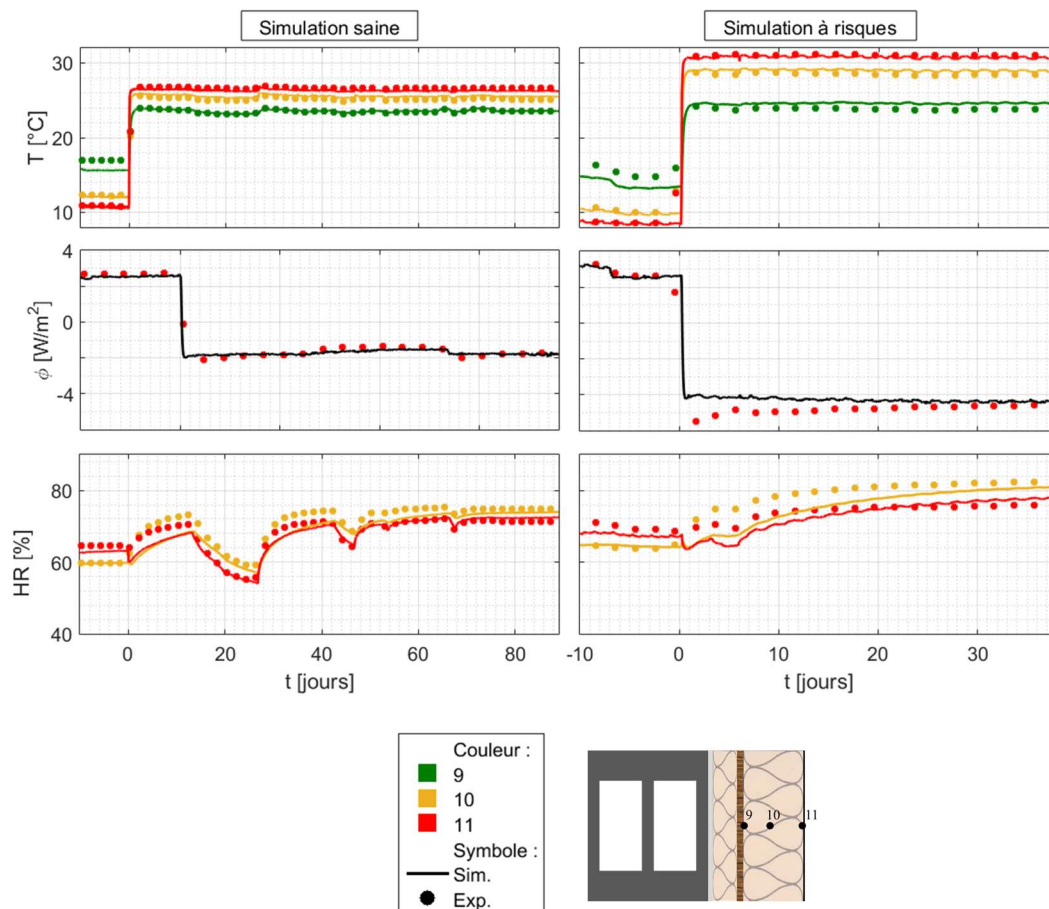


Figure III-15 : ITE Biosourcée – Confrontation simulation expérience.

III.3.3.2. Etudes de sensibilité

A l'instar de la paroi Parpaing, une étude de sensibilité des propriétés hydriques est menée. On s'intéresse plus particulièrement à la pente de l'isotherme de sorption de la laine de bois et à la valeur du facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'OSB.

La Figure III-16 montre l'isotherme de sorption de la laine de bois modifiée et l'incidence sur le coefficient de diffusion de la vapeur. Augmenter la diffusion d'eau au sein de la laine de bois permet d'obtenir une dynamique plus rapide (Figure III-17). On observe toujours des écarts entre simulation et expérience au sein de l'isolant pendant le régime transitoire, toutefois un accord plus satisfaisant est observé entre l'humidité relative calculée et mesurée derrière le pare pluie.

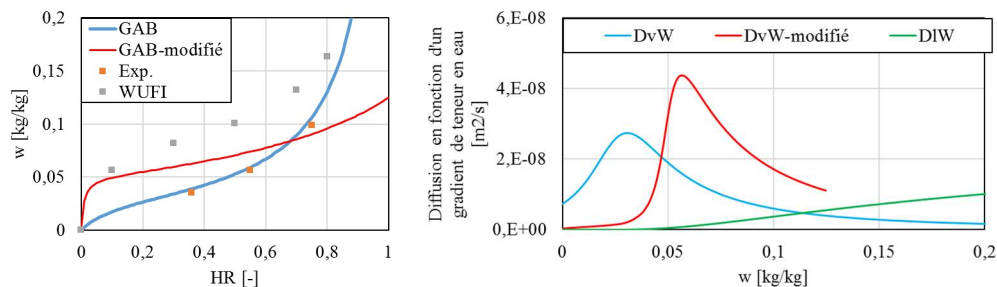


Figure III-16 : Laine de bois - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion massique (liquide, vapeur) associée à l'étude de sensibilité.

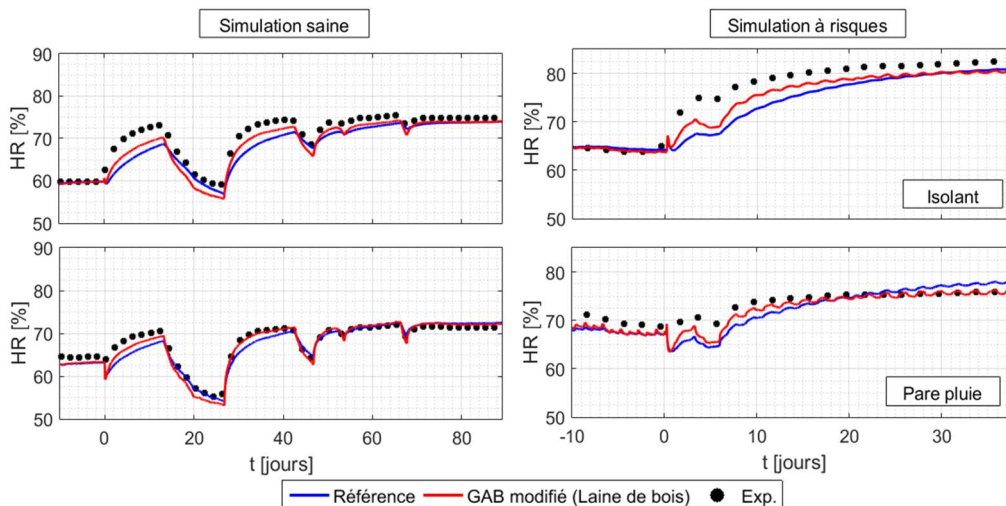


Figure III-17 : ITE Biosourcée – Influence de la capacité hydrique de la laine de bois.

Nous nous intéressons maintenant au facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'OSB. Une valeur de 40 (valeur de μ_{hum}) est retenue en s'appuyant sur les données de la littérature (Oliva and Courgey, 2010). L'influence de cette modification est présentée sur la Figure III-18. On constate qu'augmenter le facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'OSB élève les niveaux d'humidités relatives dans l'isolant et derrière le pare pluie. En effet, plus le facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'OSB est faible et plus les flux massiques seront

importants. Au final, cela permet de légèrement ajuster les niveaux initiaux des simulations saine et à risques.

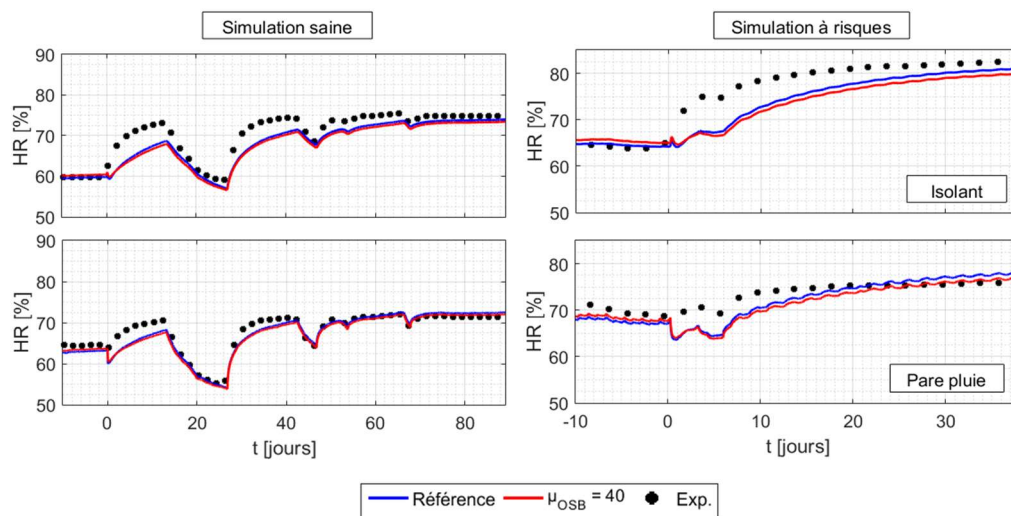


Figure III-18 : ITE Biosourcée – Influence du facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l’OSB.

Afin de tendre vers des simulations plus proches de l’expérience, les pentes de sorption de l’OSB et de la laine de bois et le facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l’OSB ont ensuite été également réduits. L’observation de la Figure III-19 montre qu’on aboutit ainsi à un meilleur accord avec les mesures. Il y a moins d’eau à s’accumuler au sein du système ITE et les flux de vapeur sont plus importants au travers de l’OSB.

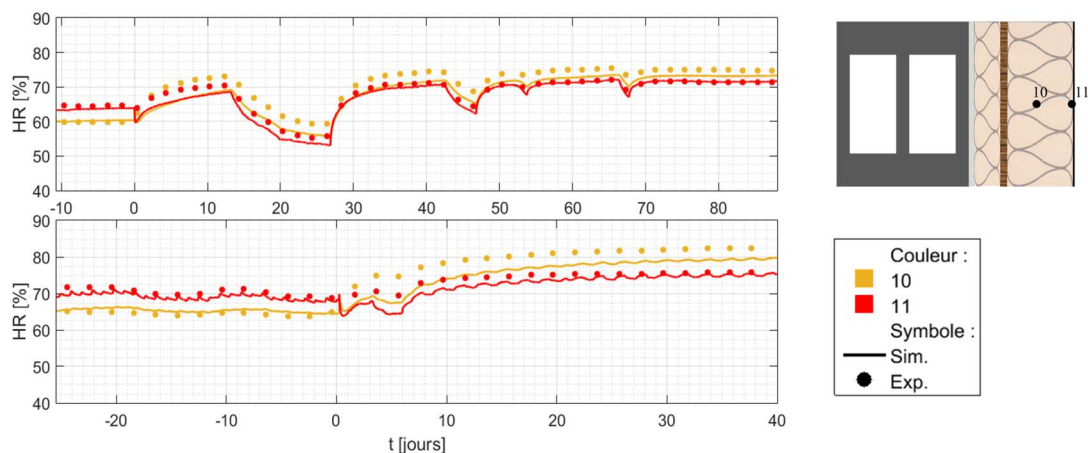


Figure III-19 : ITE Biosourcée – Confrontation des humidités relatives mesurées et simulées après ajustement des propriétés.

III.3.3.3. Paroi parpaing et ITE

Les réponses obtenues précédemment sont confrontées aux résultats issus d’une modélisation de la paroi complète notée « PC » sur la Figure III-20. Deux cas sont étudiés :

- Prise en compte d’une résistance de contact entre la paroi parpaing et l’ITE. Dans ce cas, une lame d’air d’un millimètre est considérée.

- Continuité de la température et de l'humidité relative (pas de résistance de contact).

Quelle que soit l'approche choisie, les résultats thermiques sont bien appréhendés et on observe peu d'influence sur le flux thermique.

Les humidités relatives, calculées à l'aide des différentes configurations (avec ou sans prise en compte du mur parpaing) sont similaires dans l'isolant et derrière le pare pluie. Cela met en évidence que les conditions à l'interface mur-ITE ont peu d'influence sur les résultats simulés en ces points. En effet, ceux-ci sont majoritairement impactés par l'environnement extérieur du fait de la grande résistance à la diffusion de la vapeur de l'OSB et de la forte capacité hydrique (épaisseur et isotherme de sorption) de la laine de bois. En revanche, lorsque l'on considère la présence du mur parpaing, les humidités relatives simulées à l'interface mur-ITE sont plus faibles que celles mesurées.

Par ailleurs, les écarts entre expérience et simulation sont plus importants lorsque la variation d'humidité relative, côté extérieur, est plus grande : on constate des différences allant de 3 à 6% pour la simulation saine et de 6 à 10% pour la simulation à risques. Enfin, l'influence de la résistance de contact est négligeable : les épaisseurs de couches d'air équivalentes des matériaux employés sont beaucoup plus importantes.

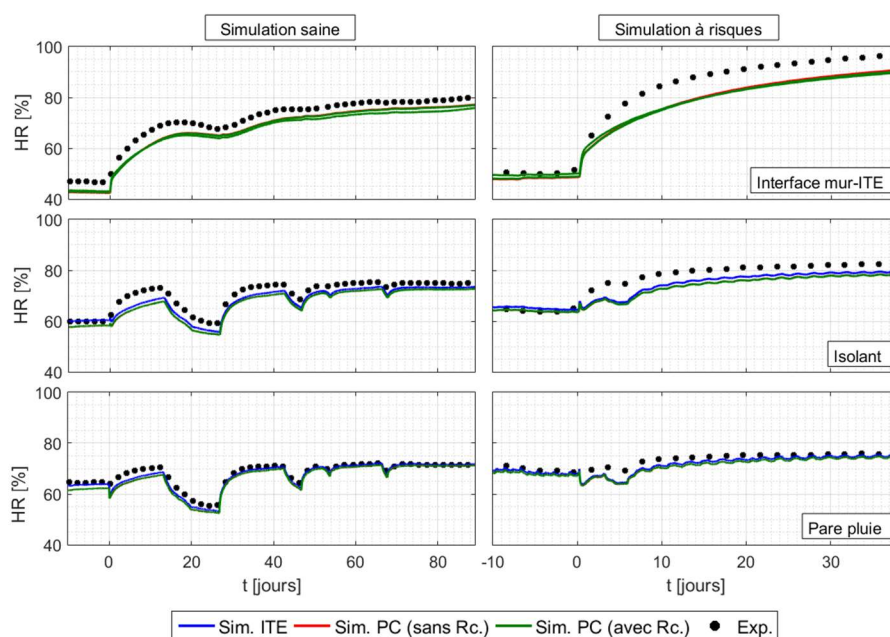


Figure III-20 : Paroi Biosourcée - Humidités relatives calculées et mesurées pour les simulations saine et à risque.

III.3.4. Paroi Laine de verre

Ici, nous nous intéressons uniquement à la paroi complète, l'étude de l'ITE seule n'est pas présentée du fait d'un dysfonctionnement du capteur à l'interface mur-ITE pour la simulation à risques. En ce qui concerne le modèle aucune résistance de contact n'est prise en

compte à l'interface mur-ITE. Les conditions initiales sont obtenues par la même démarche que pour la paroi Biosourcée. Les profils initiaux de température, d'humidité relative et de teneur en eau sont présentés sur la Figure III-21a.

Les profils de température calculés sont en accord avec l'expérience, excepté pour le capteur positionné au sein de la laine de verre. Concernant les humidités relatives, on observe des écarts dans le parpaing et à l'interface mur-ITE pour la séquence saine. Comme pour les deux précédentes parois, augmenter l'humidité relative extérieure de 5% permet de se rapprocher des mesures (Figure III-21b). Par ailleurs on peut observer qu'affiner la condition limite du côté intérieur pourrait ajuster le profil d'humidité relative initial. Toutefois, on choisit de ne pas modifier ce paramètre afin d'adopter une démarche similaire pour chaque paroi.

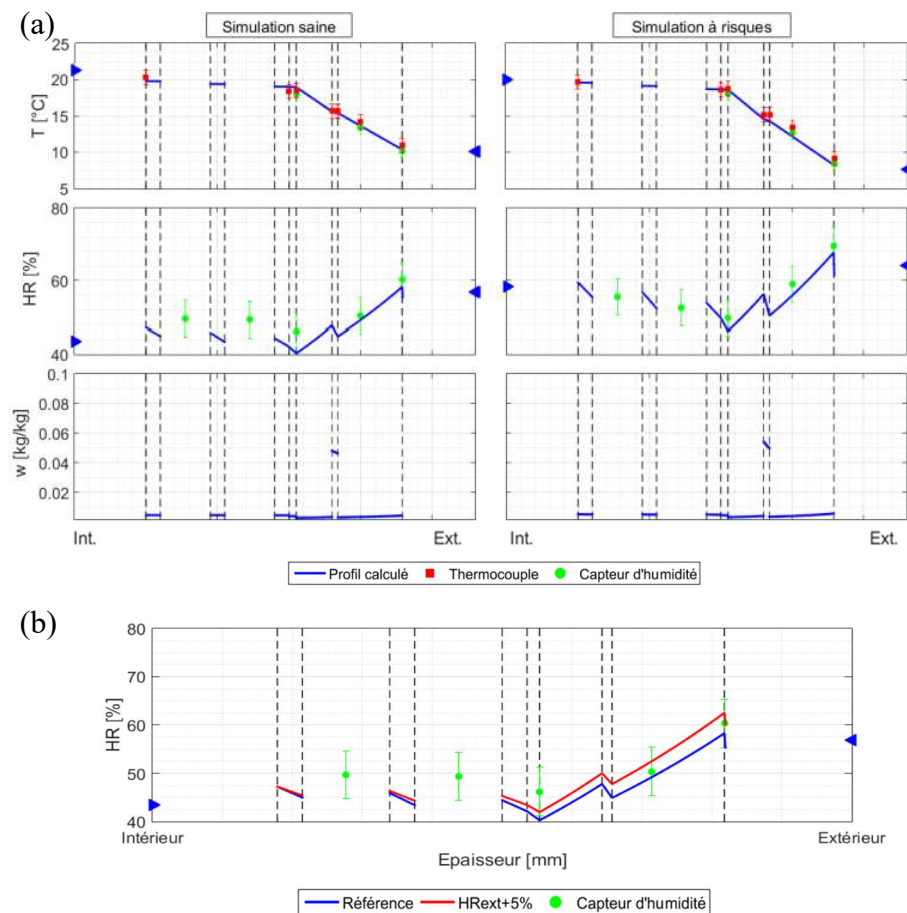


Figure III-21 : Paroi Laine de verre - a : Conditions initiales, b : influence d'une correction sur l'humidité relative extérieure.

Les températures et les densités de flux de chaleur simulées sont présentées sur la Figure III-22. On constate un bon accord avec l'expérience pour les températures et une dérive du flux de chaleur calculé pour la simulation à risque.

La confrontation à l'expérience des humidités relatives simulées présentée sur la Figure III-23 montre que l'inertie hydrique est surestimée numériquement, comme observé pour les parois Parpaing et Biosourcée. En outre, les valeurs calculées dans l'alvéole extérieure et à l'interface mur-ITE sont très inférieures à celles simulées pour la simulation à risque et dans une moindre mesure pour la simulation saine. En effet, les niveaux de saturation mesurés au-delà de 30 jours

à l'interface mur-ITE ne sont pas retrouvés numériquement. Enfin, les valeurs calculées dans l'isolant pour la simulation à risque ne sont pas en accord avec l'expérience après le changement de consigne.

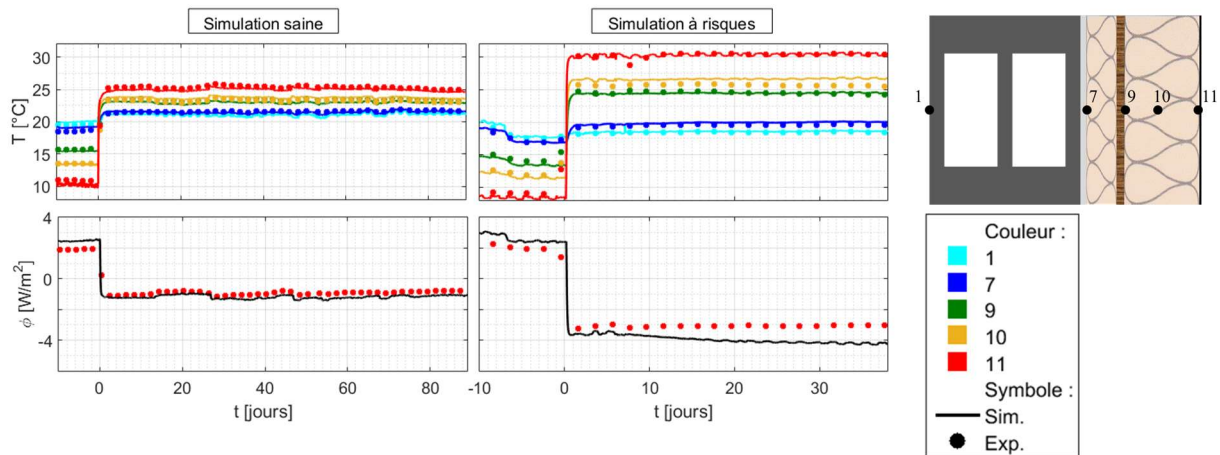


Figure III-22 : Paroi Laine de verre – Confrontation des températures et flux simulés à l'expérience.

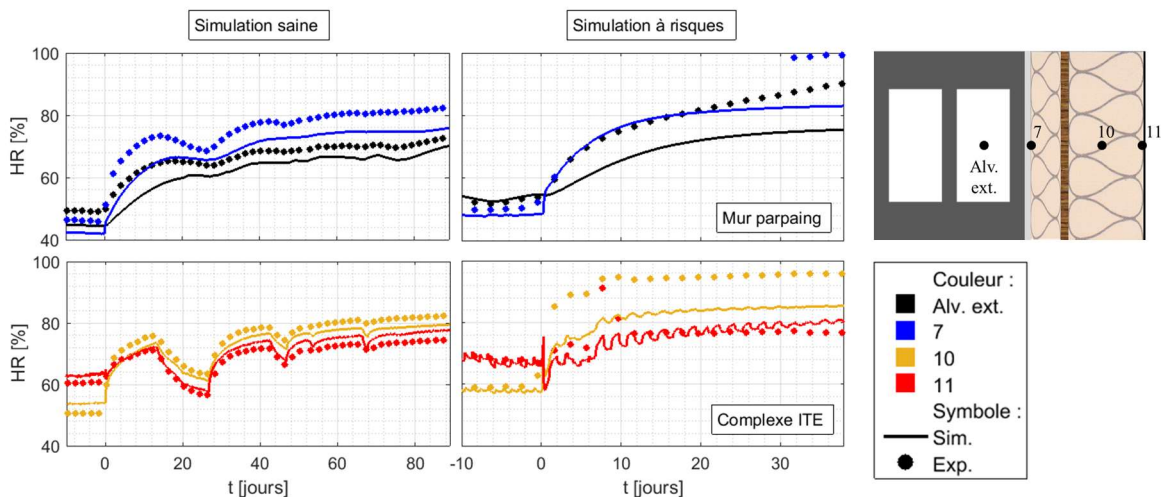


Figure III-23 : Paroi Laine de verre – Confrontation des humidités relatives simulées à l'expérience.

Des modifications analogues à celles apportées à la Paroi Biosourcée sont désormais appliquées à la paroi Laine de verre ($\mu_{OSB}=40$ / modification de la courbe de sorption de la laine de verre - cf. Figure III-24). Les graphiques présentés sur la Figure III-25 montrent qu'on aboutit à un meilleur accord entre simulation et expérience à l'interface mur-ITE et dans l'alvéole extérieure. On observe que le pic d'humidité relative calculé derrière le pare pluie, juste après le changement de consigne, est plus prononcé. Cette anormale élévation de l'humidité relative peut être liée à une erreur numérique du solveur. En effet, lors du changement de consigne on assiste à une variation rapide de l'humidité relative extérieure. Ce point met en avant la sensibilité du modèle à l'isotherme de sorption de la laine de verre. Par ailleurs, les écarts d'humidité relative entre calcul et mesure dans l'isolant sont toujours observés, soulignant la difficulté de prédire l'évolution de l'humidité relative dans un matériau fortement perméable et

faiblement hygroscopique. Enfin, les modifications apportées permettent d'atténuer la dérive de la densité de flux de chaleur calculée (Figure III-26).

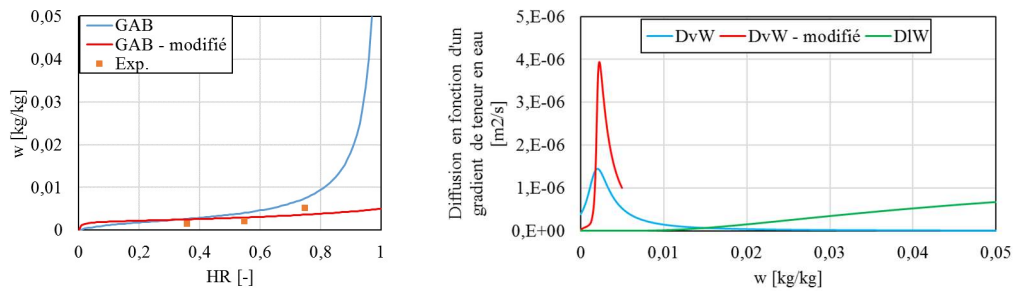


Figure III-24 : Laine de verre - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion massique (liquide, vapeur) associée à l'étude de sensibilité.

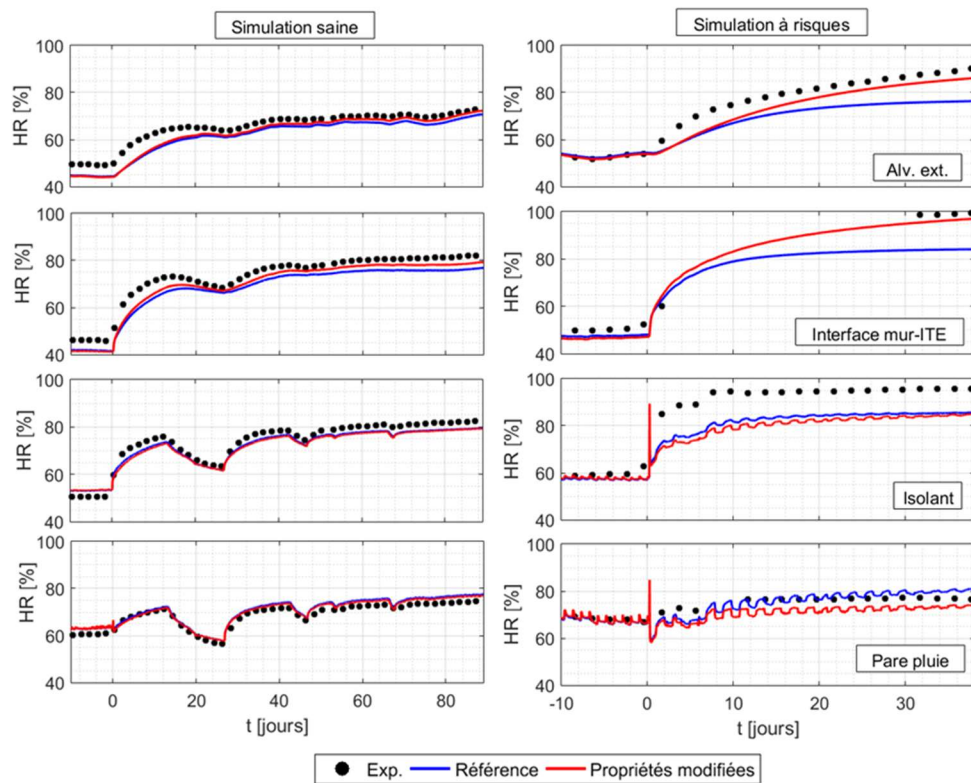


Figure III-25 : Paroi Laine de verre – Confrontation des humidités relatives simulées avant et après la prise en compte des modifications.

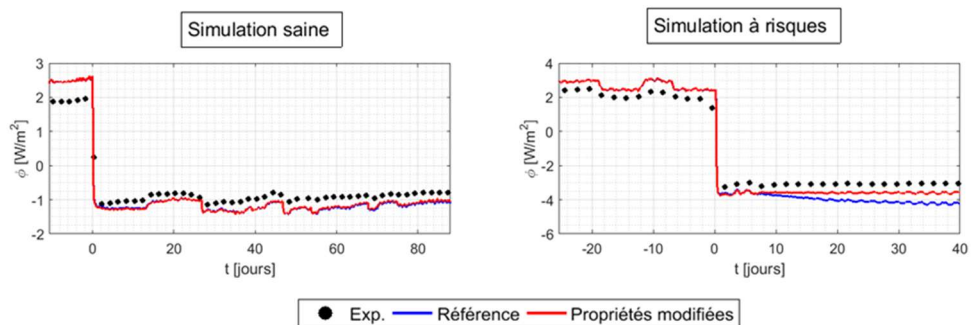


Figure III-26 : Paroi Laine de verre – Confrontation des densités de flux de chaleur simulées avant et après la prise en compte des modifications.

III.4. Simulation du comportement thermohydrrique de la paroi système polystyrène sous enduits

III.4.1. Hypothèses de modélisation

Pour cette étude, on s'intéresse uniquement à la réponse de la paroi complète (mur parpaing + ITE). Il est en effet difficile d'exploiter la mesure à l'interface mur-ITE du fait de l'implantation des capteurs d'humidité : ceux-ci sont insérés dans le polystyrène et peuvent être en contact direct avec la colle. De plus, il existe une incertitude sur les propriétés et l'épaisseur de la colle. Deux cas sont simulés : la présence de colle n'est pas prise en compte ou celle-ci est uniquement considérée comme un matériau résistif. Pour ce second cas l'épaisseur de la colle est fixée à un millimètre avec une conductivité thermique de $0.3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et un Sd de 3 m^2 . La Figure III-27 rappelle les conditions aux limites des parties solides de la paroi PSE.

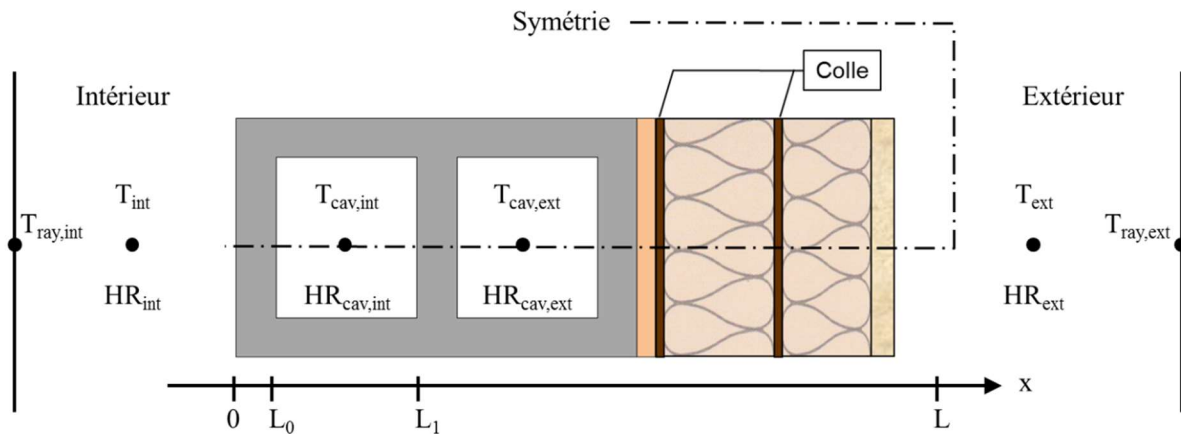


Figure III-27 : Géométrie et conditions aux limites de la paroi PSE.

III.4.2. Propriétés des matériaux

Les propriétés du PSE et de l'enduit de revêtement sont rappelées dans le Tableau III.3. Les isothermes de sorption et les coefficients de diffusion, en fonction de la teneur en eau, sont présentés sur la Figure III-13.

	λ_{app}	ρ_s	C_{p_s}	ε	μ	W_{GAB}	C_{GAB}	K_{GAB}	p1	p2
Polystyrène	0.036	15	1200	-	37	0.0065	12	0.61	-9	-0.1
Colle	0.3	150	1200	-	3000	-	-	-	-	-
Enduit (revêtement)	0.36	1560	800	0.8	20	0.008	8	0.89	-13	-0.1

Tableau III.4 : Paroi PSE - Synthèse des propriétés matériaux.

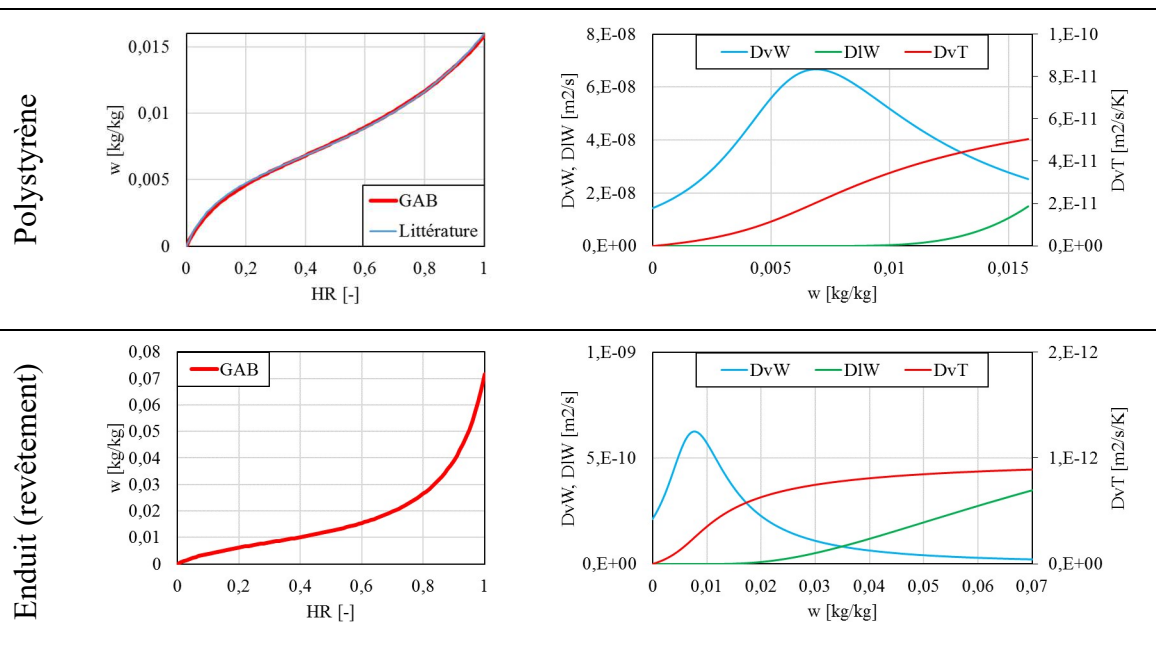


Figure III-28 : Paroi PSE - Isothermes de sorption et coefficients de diffusion.

III.4.3. Confrontation simulation expérience

On rappelle que la paroi PSE n'avait pas atteint l'équilibre hydrique avant les changements de consigne. Pour fixer les conditions initiales, une interpolation est effectuée entre les températures mesurées et les pressions de vapeur calculées (capteur d'humidité) aux différents points de la paroi. On suppose que les coefficients d'échange par convection avec les ambiances sont similaires à ceux utilisés pour les précédents modèles ($2.5W.m^{-2}.K^{-1}$ pour les alvéoles de parpaings et $5W.m^{-2}.K^{-1}$ entre les surfaces de la paroi et l'ambiance).

Les profils initiaux de température sont présentés sur la Figure III-29. Les températures et les densités de flux de chaleur calculés dans le cas de la simulation sans colle sont présentées en Figure III-30.

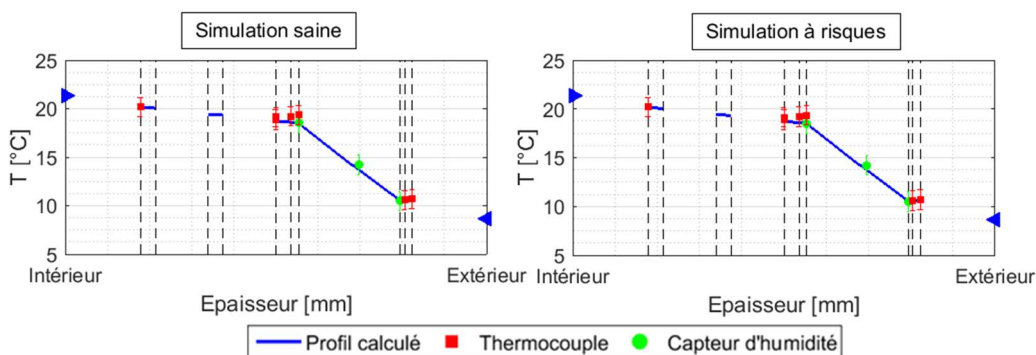


Figure III-29 : Paroi PSE - Profils de température initiaux.

On peut voir que les températures simulées dans le parpaing et au milieu du polystyrène sont légèrement différentes de celles mesurées après les changements de consigne. Par ailleurs, de

légers écarts sont observés entre les densités de flux de chaleur mesurées et simulées avant le changement de consigne. En revanche, un accord est trouvé entre les températures relevées et calculées entre le polystyrène et l'enduit de revêtement. Cela montre une bonne appréhension de la condition limite thermique du côté extérieur. Bien que non présentées, les évolutions simulées (température et flux) sont similaires que l'on tienne compte, ou non, de la présence de la colle. Cela s'explique du fait de sa faible résistance thermique.

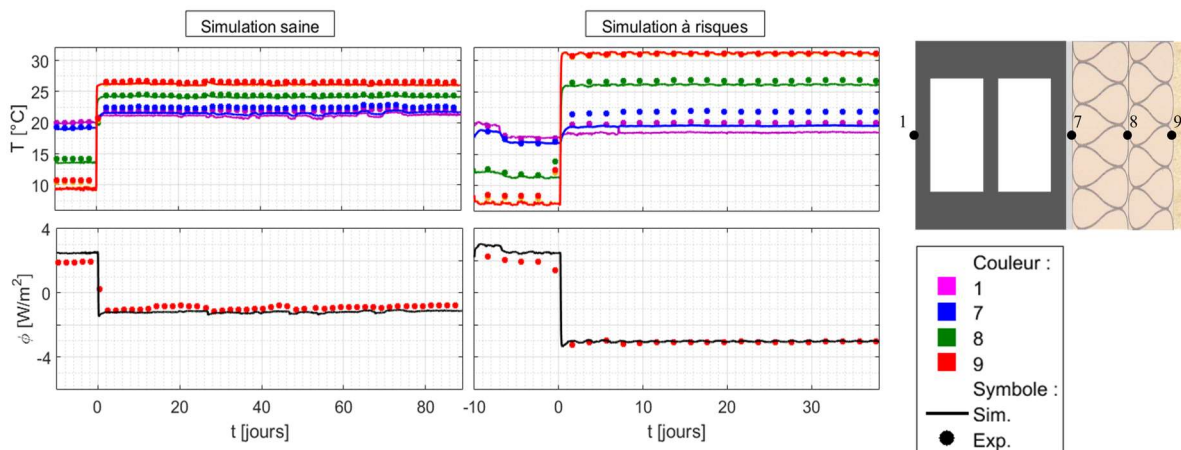


Figure III-30 : Paroi PSE - Températures et densités de flux de chaleur mesurées et calculées.

Nous nous intéressons désormais au comportement hydrique de la paroi PSE. La Figure III-31 présente les profils d'humidité relative et de teneur en eau initiaux. Cette figure met en évidence le fait que la teneur eau n'est pas répartie de façon homogène dans le polystyrène. Par ailleurs, même s'il est établi que la paroi n'est pas sèche avant le changement de consigne pour les conditions « saines », les profils initiaux d'humidité relative présentent une allure similaire pour la séquence à risque de condensation.

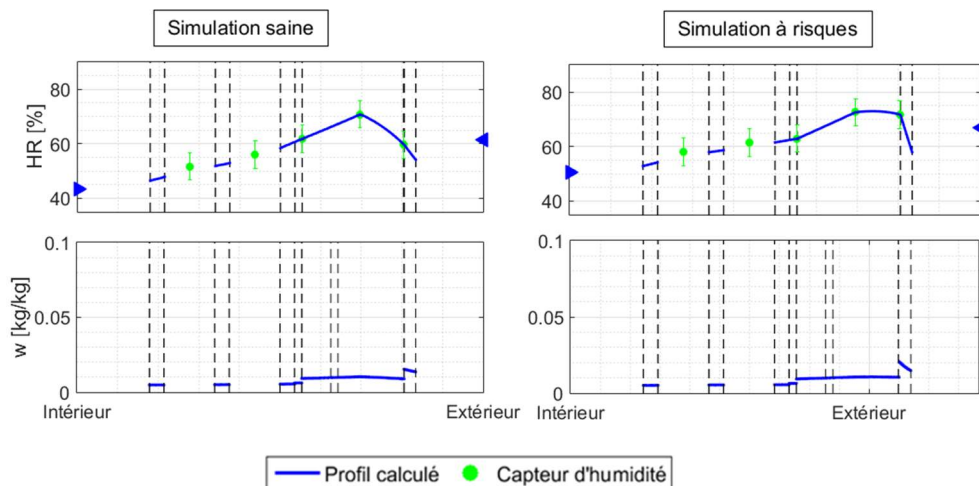


Figure III-31 : Paroi PSE - Humidités relatives et teneur en eau initiales.

La Figure III-32 présente les humidités relatives en différents points de la paroi. Les résultats des modèles avec et sans prise en compte de la colle sont comparés aux relevés expérimentaux. Lorsque la colle est prise en compte, les résultats calculés de part et d'autre de celle-ci (vers les

côtés intérieur et extérieur) sont comparés aux résultats expérimentaux (interface mur-ITE et entre les panneaux de polystyrène).

Pour les deux simulations, on constate un bon accord entre simulation et expérience à l'interface polystyrène/enduit (point 9), montrant une bonne appréhension de la condition limite extérieure. Des divergences entre la simulation et l'expérience sont observées entre les panneaux de polystyrène (point 8) et à l'interface mur-ITE (point 7). Bien que les dynamiques soient similaires, on constate que les niveaux calculés sont inférieurs à ceux mesurés : avant le changement de consigne, les humidités relatives simulées diminuent et convergent vers un niveau d'équilibre. La prise en compte de la colle permet toutefois de retrouver les niveaux d'humidité relative mesurés. De plus, selon la position choisie (« côté intérieur » ou « côté extérieur »), on observe d'importants écarts entre les humidités relatives calculées, en raison de la grande résistance à la diffusion de vapeur de la colle. Par ailleurs, les mesures sont « faussées » aux interfaces mur-ITE et entre les panneaux de polystyrène puisqu'une poche d'air est créée à l'emplacement de la sonde. De ce fait, les comparaisons entre un modèle et l'expérience en ces endroits sont difficiles. Des écarts notables sont également observés dans l'alvéole extérieure entre 8 et 12% au 30^{ème} jour pour la simulation à risques suivant le cas étudié (i.e. avec ou sans colle). Enfin, du fait de la faible perméabilité des panneaux de polystyrène, la présence de la colle influence peu ces résultats.

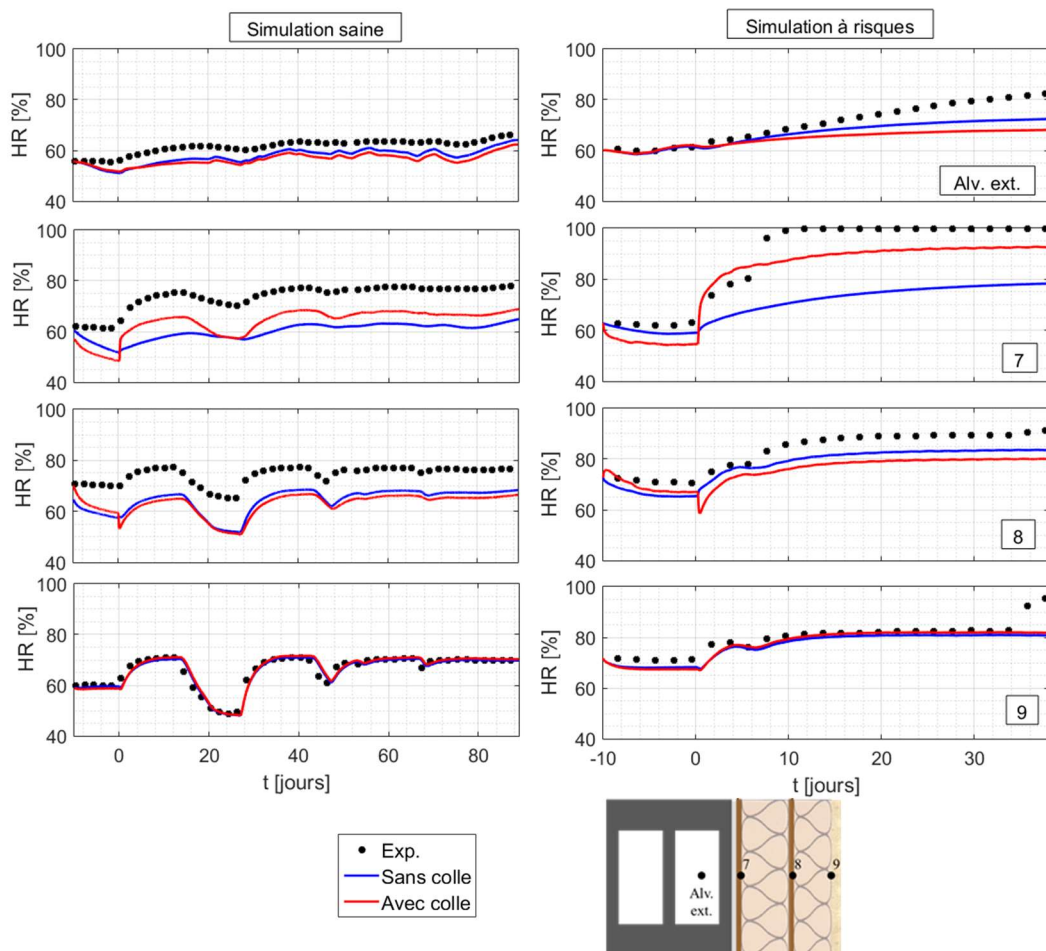


Figure III-32 : Paroi PSE – Confrontation des humidités relatives mesurées et calculées en différents points.

III.5. Bilan sur la modélisation et les simulations des ITE

Ce chapitre s'est focalisé sur la modélisation et sur la simulation des transferts couplés de chaleur et d'humidité de la paroi parpaing et des systèmes ITE pour les séquences expérimentales définies dans le chapitre II.

Les études sur la paroi parpaing et les systèmes d'ITE sous bardage ont montré globalement un bon accord entre simulation et expérience pour les différentes séquences étudiées au prix d'un ajustement des propriétés hydriques de quelques matériaux (pente de l'isotherme de sorption et facteur de résistance à la diffusion de vapeur) et des conditions aux limites. Malgré ces ajustements, des écarts entre les humidités relatives simulées et mesurées persistent en certains points, notamment à l'interface entre la paroi existante et les systèmes d'ITE, ainsi que dans la laine de verre pour les hautes humidités. Cela souligne la difficulté à effectuer une mesure de qualité aux interfaces et dans les matériaux faiblement hygroscopiques. Néanmoins, le modèle peut être considéré comme validé pour ces parois.

En revanche, les simulations n'ont pas montré d'accord satisfaisant avec les données expérimentales pour la paroi PSE. Cela peut s'expliquer par les incertitudes sur les propriétés de la colle et du fait de l'équilibre thermohydrigue non atteint pour cette paroi.

Chapitre IV : Analyse expérimentale et numérique d'une paroi de bâtiment en conditions réelles

Ce chapitre concerne l'étude expérimentale *in situ* et numérique de la réponse thermohydrrique de parois d'un lycée isolées par l'extérieur avec un système sous bardage à base de laine de verre. Après une présentation du dispositif expérimental et de l'instrumentation mise en place, l'analyse expérimentale est menée en trois temps : un focus détaillé est d'abord réalisé sur des éléments constructifs et des périodes ciblées de quelques jours ; puis, le comportement thermohydrrique et la résistance aux pathologies des parois sont étudiés sur deux années, avant de conclure quant à la performance globale après rénovation. Enfin, une modélisation des transferts de chaleur au sein de la paroi, ainsi qu'une confrontation simulation expérience sur des périodes hivernales et estivales est proposée.

IV.1. Présentation du bâtiment étudié et de son instrumentation

IV.1.1. Informations générales

Le bâtiment étudié est un bâtiment d'enseignement du lycée Colbert construit en 1959 à Lorient (zone climatique H2a - climat océanique). Le bâtiment fait 150 mètres de long, 12 mètres de larges, comporte 3 étages pour un total de 15 mètres de hauteur. Ses façades principales sont orientées au Nord-Ouest et Sud-Est (Figure IV-1). L'enveloppe initiale du bâtiment est composée d'une paroi en béton de 16 cm non isolée ($U = 0,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) et de fenêtres aluminium basculantes simple vitrage.



Figure IV-1 : Vue aérienne du bâtiment et vue de l'enveloppe avant réhabilitation.

Le bâtiment a fait l'objet d'une rénovation thermique lourde entre octobre 2014 et octobre 2015 en site occupé. Après avoir déposé les menuiseries existantes, des panneaux de 4m x 8m préfabriqués en usine ont été fixés sur les façades extérieures à l'aide de platines métalliques fixées sur l'enveloppe béton (Figure IV-2). Ces panneaux sont constitués d'une ossature bois, de fenêtres en aluminium double vitrage (type Soléal 55 FY minimal) et d'une partie opaque (nommée ITE dans la suite de ce chapitre). Cette dernière est composée (de l'intérieur vers

l'extérieur) d'une première couche de laine de verre de 120mm, d'un panneau de contreventement (OSB), d'une seconde couche de laine de verre de 122mm et d'une membrane pare pluie (Delta-Maxx plus) assurant également l'étanchéité à l'air par l'extérieur du bâtiment. Cet ensemble possède une résistance thermique (R_{th}) de $7.1K.m^2.W^{-1}$ et une résistance à la vapeur équivalente (somme des S_d) de 0.95m.



Figure IV-2 : Vues des faces intérieures et extérieures des panneaux préfabriqués.

Un bardage métallique teinté en noir a été rapporté sur la face extérieure, créant ainsi une lame d'air ventilée de 54mm de large entre le bardage et le pare-pluie. Coté intérieur, les encadrements de fenêtre sont réalisés avec des panneaux de bois aggloméré. La façade initiale n'étant pas rigoureusement plane au droit de chaque fenêtre, on peut noter la présence de cavité d'air fermée entre la paroi initiale, en béton, et la première couche d'isolant de l'ITE. Un aperçu des faces extérieure et intérieure de l'enveloppe rénoverée est présenté sur la Figure IV.3.



Figure IV-3 : Vues extérieure et intérieure de l'enveloppe après réhabilitation.

La rénovation thermique s'est accompagnée de l'installation d'une ventilation mécanique contrôlée des locaux afin d'assurer un renouvellement d'air en fonction de l'occupation. Celle-ci est activée de 8h à 17h30 durant les périodes scolaires et désactivée en dehors de ces périodes.

Enfin, le chauffage est quant à lui assuré par des chaudières gaz alimentant des radiateurs à eau chaude en fonte selon trois modes :

- Mode « normal » : consigne à $19^{\circ}C$ pendant l'occupation des locaux par les élèves (de 8h à 17h30, du lundi au vendredi),
- Mode « éco » : consigne à $15.5^{\circ}C$ durant la nuit et le week-end,

- Mode « hors gel » : consigne à 12°C durant les périodes de vacances scolaires.

Enfin, les locaux sont utilisés de façon homogène tous les jours de la semaine de 8h à 18h par un public allant de 20 à 35 élèves par salle.

IV.1.2. Instrumentation

Une instrumentation a été mise en place pour suivre d'une part les ambiances intérieures (une salle de classe et un couloir) et extérieures (conditions climatiques), et d'autre part la réponse thermohydrrique de deux panneaux préfabriqués :

- Le premier situé au deuxième étage de la paroi Sud-Est fait face à une salle de classe équipée d'ordinateurs ;
- Le second situé au troisième étage de la paroi Nord-Ouest fait face à un couloir.

L'instrumentation permanente est composée des éléments suivants :

- Une station météo (*Vantage Pro 2, Davis Instruments*) placée en toiture d'un bâtiment adjacent pour relever les conditions climatiques (température, humidité relative, éclairement solaire reçu sur plan horizontal, précipitations, pression atmosphérique, vitesse et direction du vent, ...) ;
- Une station autonome (*Station Météo Netatmo*) pour relever les évolutions de température et d'humidité relative dans la salle de classe (à mi-hauteur et à proximité d'un mur), mais également la concentration en CO₂, le niveau de bruit et la pression atmosphérique ;
- Une Station Météo *Netatmo* pour relever la température et d'humidité relative dans le couloir ;
- Un ensemble de thermocouples de type K ($\Delta T = \pm 0.5^{\circ}\text{C}$), de capteurs d'humidité de type *Sensirion SHT75* ($\Delta \text{HR} = \pm 2\%$; $\Delta T = \pm 1^{\circ}\text{C}$) ou *Newsteo LOG25* ($\Delta \text{HR} = \pm 2\%$; $\Delta T = \pm 1^{\circ}\text{C}$) et de fluxmètres ($\Delta \phi = \pm 0.63 \text{ W.m}^{-2}$) placés à différentes positions de chacune des parois étudiées.

Enfin, une instrumentation supplémentaire, composée d'un pyranomètre placé en position verticale (Kipp&Zonen CMP 10) et de plusieurs thermocouples, est mise en place au niveau de la paroi Sud-Est durant les périodes de fermeture (vacances scolaires). Le schéma d'instrumentation de la paroi Sud-Est (SE) est présenté sur la Figure IV-4.

Au final, 120 paramètres sont mesurés (61 températures, 20 humidités relatives, 2 flux thermiques, 34 données et indicateurs météorologiques, 3 données intérieures). Le pas d'acquisition des mesures est de 5 ou 10 minutes selon les capteurs.

Comme pour tout suivi « in situ » de longue durée, différentes difficultés ont été rencontrées :

- Plusieurs coupures et défauts d'alimentation en électricité ont conduit à la perte de données ;
- Dans le cas des sondes sans fil et des sondes de type *Netatmo*, leur autonomie a commencé à faire défaut après un an et demi environ.

Au final, on dénombre sept périodes avec un relevé de l'ensemble des mesures.

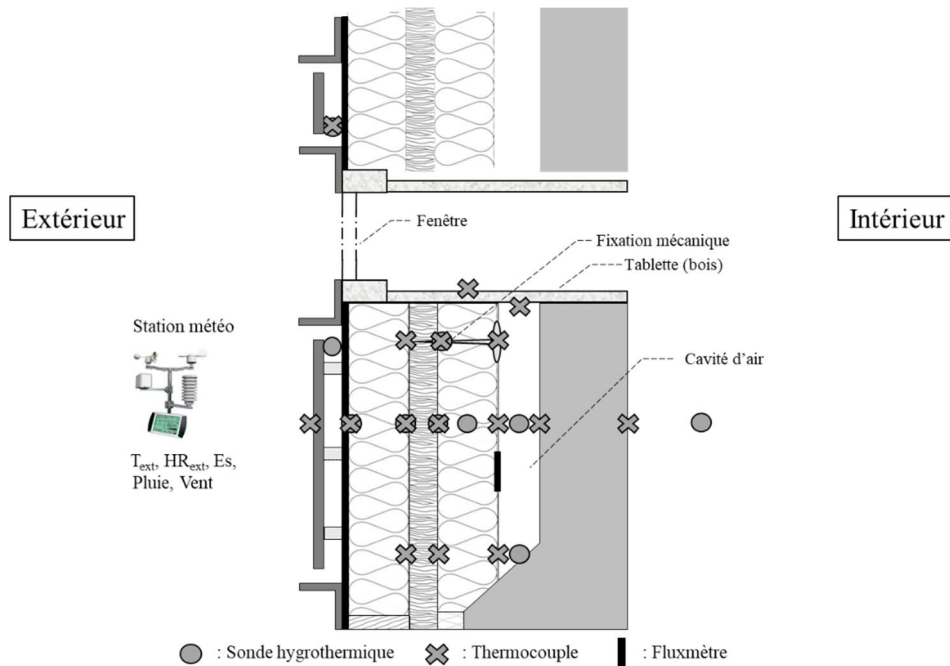


Figure IV-4 : Localisation de l'instrumentation de la paroi Sud-Est (SE).

IV.2. Analyse de la réponse thermohydrique des parois

On s'intéresse à la réponse thermohydrique des parois orientées au Nord-Ouest (notée « paroi NO ») et au Sud-Est (notée « paroi SE »). Chacune des parois est composée d'une lame d'air (bardage), du système d'ITE, de la cavité d'air et du mur béton. Comme illustré sur la Figure IV-5, ces parois sont sujettes à un ensemble de phénomènes physiques : la conduction et la convection thermique, le rayonnement de courte et grande longueur d'onde, la convection et la diffusion d'humidité. Dans la suite du chapitre, la réponse thermohydrique des parois est d'abord étudiée sur quelques jours en période hivernale et estivale puis sur une année entière. Conjointement, une analyse des risques liés à l'humidité est effectuée.

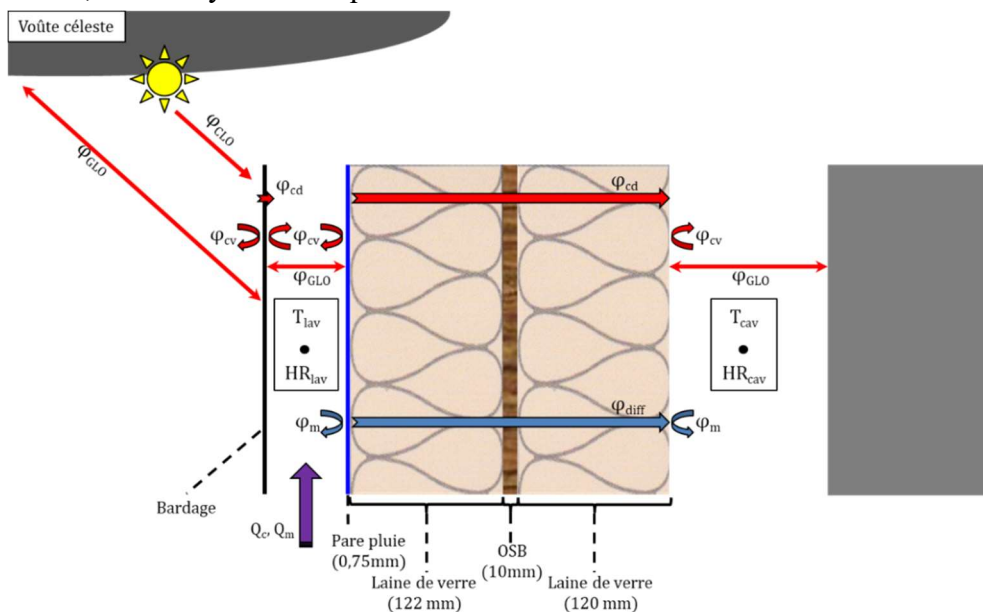


Figure IV-5 : Aperçu des phénomènes physiques mis en jeu.

IV.2.1. Analyse détaillée de la réponse thermohydrrique de la paroi SE

IV.2.1.1. Étude du bardage et de la lame ventilée

Le comportement thermohydrrique de la lame d'air ventilée de la paroi SE est étudié sur une période estivale allant du 15 au 19 août 2016. Les deux premiers jours ont bénéficié d'un fort ensoleillement et d'une température moyenne de 23°C, alors que les deux derniers jours font état d'une couverture nuageuse et de quelques précipitations avec une température moyenne de 17°C. Enfin, la vitesse du vent n'a pas excédé 2m.s⁻¹ avec une orientation principale à l'Ouest. La position et la dénomination des capteurs est rappelée sur la Figure IV-6.

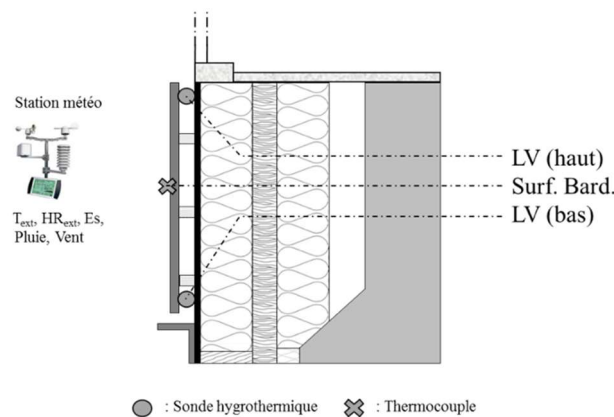


Figure IV-6 : Localisation et dénomination de l'instrumentation dans la lame d'air ventilée de la paroi SE.

La Figure IV-7 présente les évolutions de l'éclairement solaire reçu par la paroi SE et des températures de l'air extérieur, de surface de bardage et aux extrémités de la lame d'air ventilée. En raison du fort éclairement solaire des deux premiers jours, la température du bardage augmente rapidement dès 8h pour atteindre un maximum de 60°C à 11h. Une partie de l'énergie absorbée est transmise à la lame d'air ventilée où une température maximale supérieure à 45°C est atteinte entre 12h et 13h. Par ailleurs, on peut noter que la température en haut de lame d'air est supérieure d'environ 5°C par rapport à celle du bas : une part de l'énergie restituée à la lame d'air est évacuée par un courant d'air ascendant, limitant ainsi la charge thermique sur la paroi. Dès lors que la paroi n'est plus soumise à un éclairement solaire direct (fin de journée du 15 et 16/08/16), les températures de surface de bardage et de lame d'air convergent vers la température d'air extérieur. Lors des journées peu ensoleillées, l'élévation de température n'excède pas 35°C en surface de bardage et 30°C dans la lame d'air. De plus, aucune différence significative n'est observée entre le bas et le haut de la lame d'air.

La Figure IV-8 présente les évolutions de l'humidité relative et de la pression de vapeur de l'air extérieur et aux extrémités de lame d'air ventilée sur la même période. En présence d'éclairement solaire, les évolutions d'humidité relative mesurées en bas de la lame d'air sont décorrélées de celles de l'air extérieur, alors que les évolutions de pression de vapeur sont identiques : la baisse de 80 à 30% en moins de 3h s'explique par l'augmentation de la température en ce point sur un air humide à pression de vapeur quasiment constante. En haut de la lame d'air, on observe une augmentation de la pression de vapeur par rapport à celle d'en

bas, alors que les humidités relatives sont identiques : cela indique un chargement en humidité de l'air circulant dans la lame d'air. A priori, cette humidité ne peut provenir que du complexe isolant. Enfin, en l'absence d'éclairement solaire, les humidités relatives et pressions de vapeur mesurées dans la lame d'air suivent les mêmes tendances que celles de l'air extérieur, y compris sur les deux derniers jours en présence de quelques précipitations.

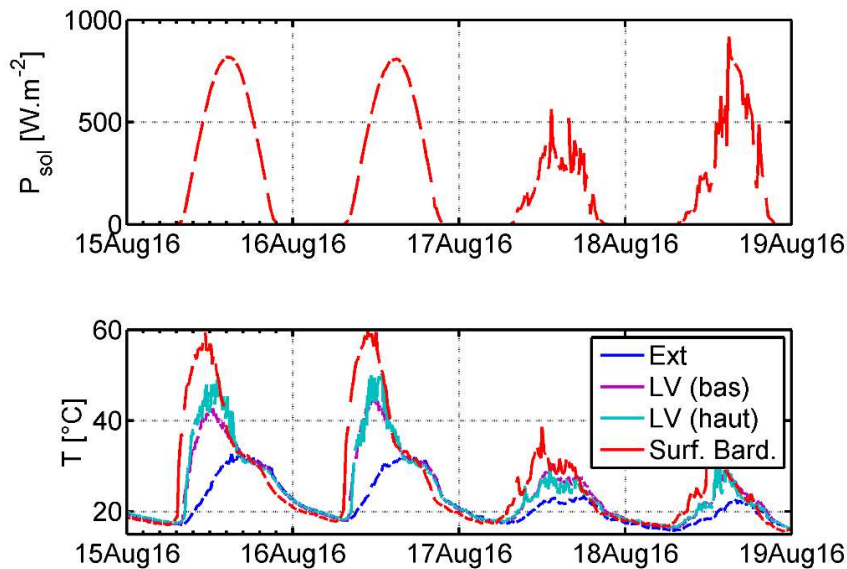


Figure IV-7 : Éclairement solaire et températures de surface de bardage et dans la lame d'air ventilée de la paroi SE durant une période estivale.

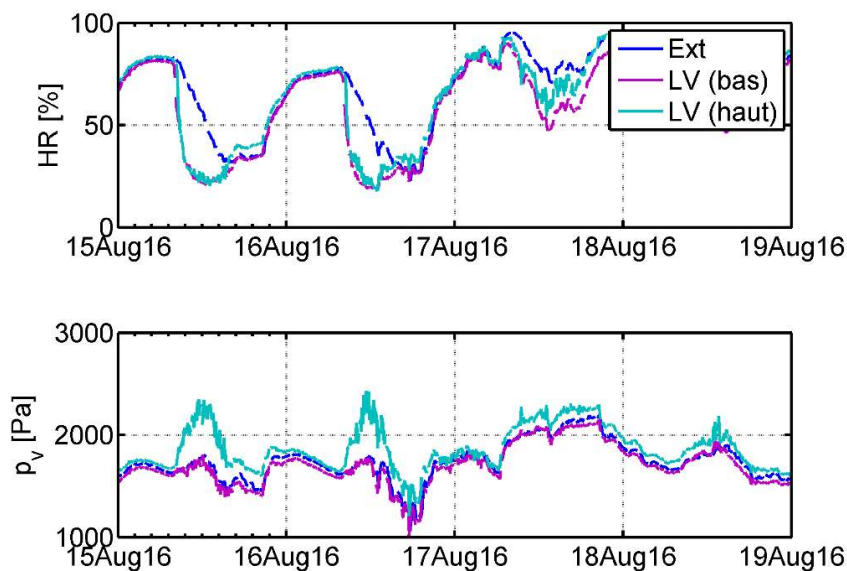


Figure IV-8 : Humidités relatives et pressions de vapeur dans la lame d'air ventilée de la paroi SE durant une période estivale.

IV.2.1.2. Étude du système d'ITE et de la cavité d'air

Le comportement thermohydrrique du système d'ITE et de la cavité d'air de la paroi SE est étudié sur une période hivernale allant du 23 au 27 décembre 2016 (période durant laquelle le bâtiment n'est pas occupé, le système de chauffage fonctionne en mode « hors gel »). La température et l'humidité relative extérieures oscillent respectivement entre 6 et 12°C et 70 et 100%. Les valeurs d'éclairement solaire sont comprises entre 100 (23 et 25 décembre) et 370 W.m⁻² (24 et 26 décembre) et le vent n'excède pas 2m.s⁻¹. Enfin, on peut noter que la température extérieure est sensiblement constante et égale à 11°C pendant près de 48h (autour du 25 et 26 décembre). La position et dénomination des capteurs est rappelée sur la Figure IV-9.

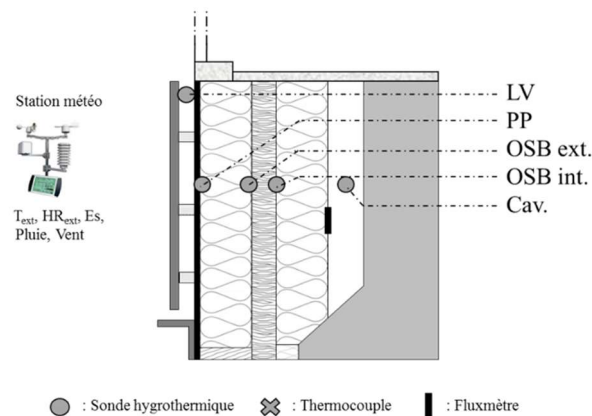


Figure IV-9 : Localisation et dénomination de l'instrumentation dans le système d'ITE et la cavité d'air de la paroi SE.

La Figure IV-10 présente les évolutions des températures et du flux de chaleur mesurés. En présence d'éclairement solaire, les températures de la lame d'air et du pare-pluie atteignent des valeurs maximales de 30°C. Le déphasage et l'amortissement de la température sont de plus en plus importants dans le système d'ITE. Compte tenu de cet apport de chaleur dans le système d'ITE, le flux de chaleur mesuré peut devenir quasiment nul, voire légèrement positif comme l'après-midi du 26/12/2016. Cependant, la température dans la cavité d'air fermée ne présente pas une évolution liée à la sollicitation thermique extérieure, mais plutôt une évolution similaire à la température intérieure qui tend à diminuer au cours du temps, suite à la modification de la consigne du système de chauffage (mode hors gel). Cela s'explique par la forte inertie thermique du béton et par la résistance thermique élevée de l'enveloppe du bâtiment. Durant les journées couvertes et les périodes nocturnes, les températures extérieures, de surface de bardage et de lame d'air ventilée sont du même ordre de grandeur. De plus, les températures dans le système d'ITE et la cavité d'air diminuent légèrement en raison des déperditions.

Enfin, en supposant le régime comme établi à l'issue de la période durant laquelle la température extérieure est constante, la résistance thermique du système d'ITE est évaluée à partir des mesures de température de surface et de la densité de flux thermique moyennées sur une période de 4h (EN ISO 9869, 2014).

Une valeur de $8.18 \text{ K.m}^{-2}.\text{W}^{-1}$ est obtenue en début de journée du 26/12/2016. Cette valeur, bien que légèrement plus élevée que la valeur théorique, reste cependant comprise dans l'incertitude maximale définie à 28% dans la norme ISO 9869.

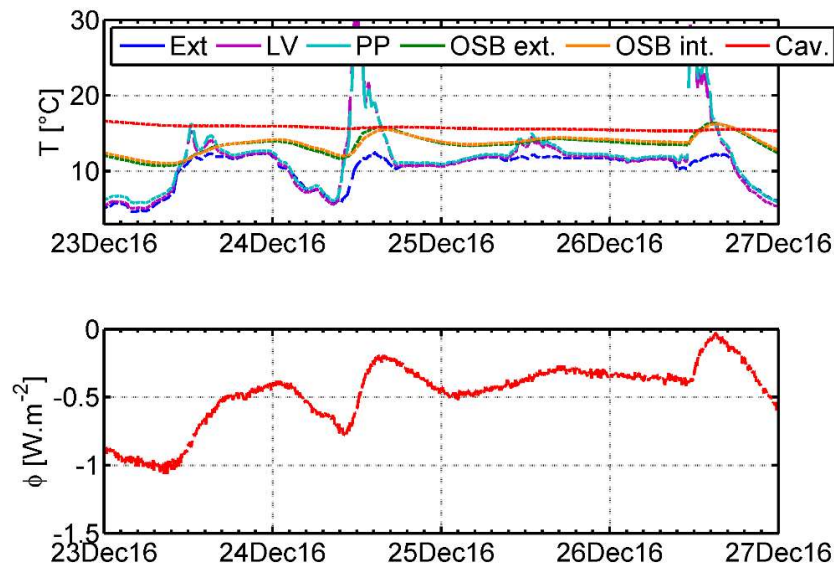


Figure IV-10 : Températures et flux thermique dans le système d'ITE et la cavité d'air de la paroi SE durant une période hivernale.

La Figure IV-11 présente les évolutions des humidités relatives et pressions de vapeur mesurées. En présence d'ensoleillement, la pression de vapeur derrière le pare-pluie atteint des niveaux plus élevés que dans la lame d'air ventilée. Cette sollicitation hydrique est amortie et déphasée dans le système d'ITE : par exemple, on observe un amortissement de 50% et un déphasage de 4h de part et d'autre de l'OSB.

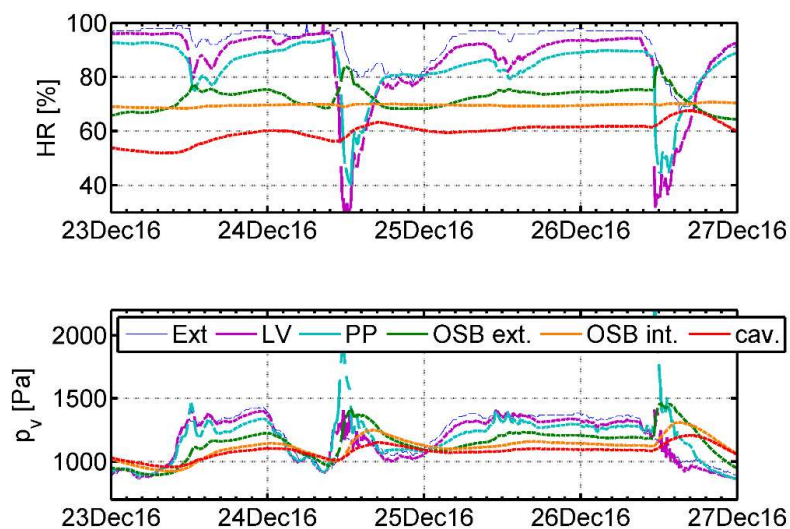


Figure IV-11 : Humidités relatives et pressions de vapeur dans le système d'ITE et la cavité d'air de la paroi SE durant une période hivernale.

Par ailleurs, on observe également une légère augmentation de la pression de vapeur dans la cavité en phase avec celle observée dans l'isolant et décorrélée de celle mesurée dans l'ambiance intérieure : cela indique l'absence d'infiltrations entre la cavité d'air et l'ambiance intérieure et que la sollicitation en humidité sur la paroi en béton provient de l'extérieur. Enfin, on peut noter que les cinétiques de transfert hydrique sont nettement plus lentes que celles de transfert thermique.

Même si les évolutions de l'humidité relative sont lentes et faibles dans le système d'ITE, on note des hausses ponctuelles, rapides (1 heure et demie en moyenne) et notables (de l'ordre de 10%) au niveau de l'OSB, qui sont corrélées avec les évolutions de température. Une possible explication de ces évolutions tient dans le fait que l'OSB est un matériau hygroscopique, dont les isothermes de sorption dépendent de la température. En effet, contrairement à l'air humide, une augmentation de température à teneur en eau constante induit une augmentation de l'humidité relative, en raison de l'évaporation de l'humidité contenue dans la structure poreuse du matériau (Colinart and Glouannec, 2017, p. 1). L'humidité ainsi libérée peut alors soit migrer vers des zones à plus faible pression de vapeur si la température est stabilisée, soit se re-condenser si la température est amenée à diminuer. Au final, ce phénomène induit des hausses ponctuelles de l'humidité relative supérieures à 80% sans forcément modifier le niveau de teneur en eau dans les matériaux (T. Colinart et al., 2017, p. 2).

Enfin, en l'absence d'éclairement solaire, les humidités relatives et pressions de vapeur dans le système d'ITE sont plus faibles que celles mesurées dans la lame d'air ventilée et à l'extérieur. Cette remarque vaut également pour la paroi NO, tant qu'elle ne reçoit pas d'éclairement solaire.

IV.2.1.3. Analyse de détails constructifs

Dans cette partie, une analyse de deux détails constructifs est proposée : une première au niveau du nez de béton où le complexe isolant est en contact direct avec la paroi béton existante et une seconde au niveau de l'appui de fenêtre. La métrologie disponible à ces endroits est rappelée sur la Figure IV-12.

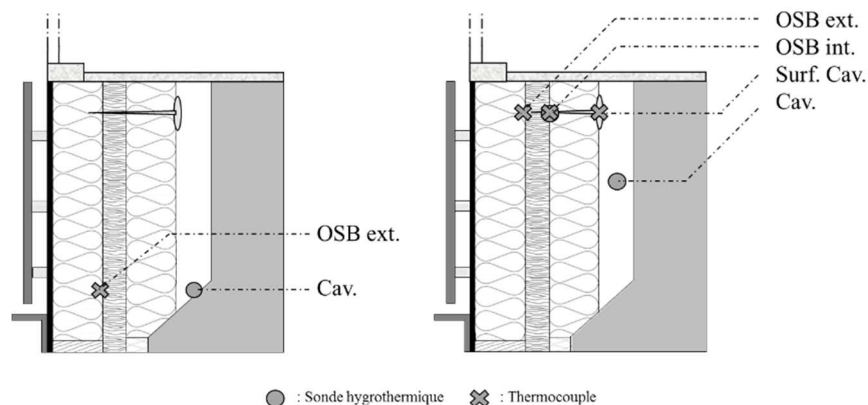


Figure IV-12 : Localisation et dénomination de l'instrumentation au niveau du nez de béton (gauche) et de l'encadrement de fenêtre (droite) de la paroi SE.

La Figure IV-13 présente les écarts de températures, d'humidité relative et de pression de vapeur entre la métrologie localisée au centre des systèmes d'ITE et celle au proche du nez de béton de la paroi SE durant une période hivernale. On observe que les températures sont plus élevées face au nez de béton en raison du pont thermique créé par cet élément. De même, l'humidité relative y est également plus élevée. Cependant, sur l'ensemble de la période étudiée, aucun risque accru associé à l'humidité n'a pu être constaté.

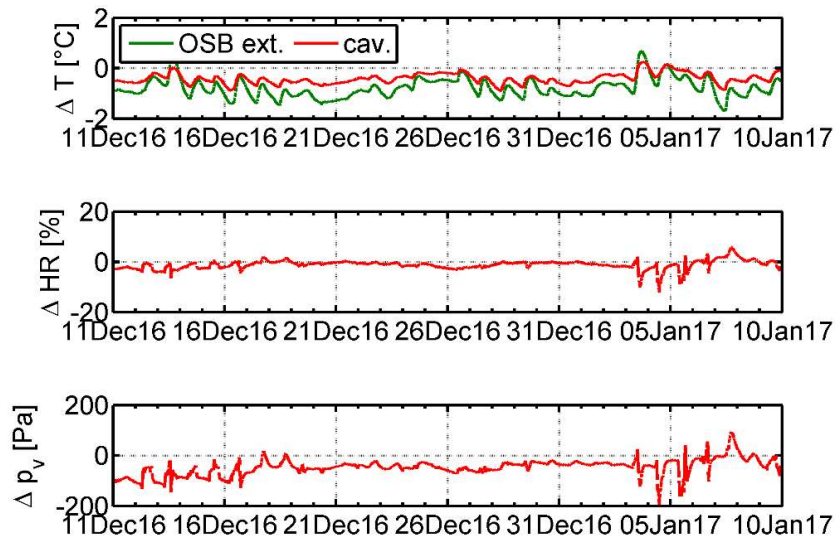


Figure IV-13 : Écarts de températures, d'humidité relative et de pression de vapeur entre le nez de béton et la partie courante de la paroi SE durant une période hivernale.

La Figure IV-14 présente des écarts de températures et d'humidité relative entre la métrologie localisée au centre des systèmes d'ITE et celle localisée près de la fenêtre de la paroi SE durant une période printanière.

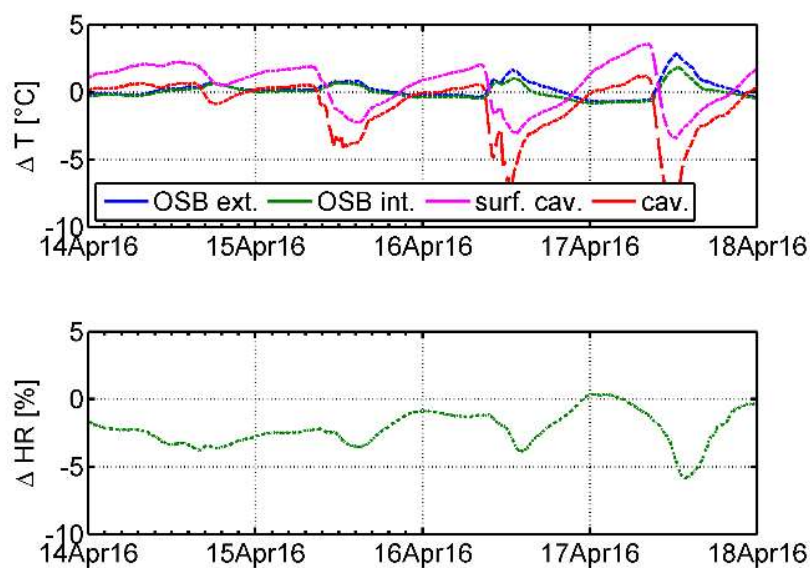


Figure IV-14 : Écarts de températures et d'humidité relative entre le haut (à proximité de l'encadrement de fenêtre) et la partie courante de la paroi SE.

En raison de l'éclairement solaire reçu par l'appui de fenêtre, les températures mesurées au niveau de la cavité sont plus élevées en haut qu'au centre des systèmes d'ITE. En revanche, les températures relevées en journée autour de l'OSB sont plus faibles dans la partie haute de la paroi que dans la partie centrale. Cependant, les températures de la partie supérieure sont mesurées au niveau d'une rosace de fixation de l'isolant. Or, cet élément joue le rôle de pont thermique local : les déperditions tout comme les apports solaires en journée sont amplifiés. Par conséquent, les effets liés à la température sur la mesure d'humidité relative sont également augmentés. Néanmoins, aucun risque associé à l'humidité n'a pu être constaté sur l'ensemble de la période étudiée.

IV.2.2. Comportement thermohydrigue pluriannuel des parois SE et NO

IV.2.2.1. Conditions météorologiques

Les Figure IV-15 et Figure IV-16 présentent les évolutions sur la période novembre 2015 – juillet 2017 des paramètres suivants : température, humidité relative et pression de vapeur moyenne de l'air extérieur, éclairement solaire maximal reçu sur un plan horizontal et énergie solaire journalière et enfin rose des vents. Avant de commenter leurs évolutions, il faut noter que ces grandeurs ont été validées par comparaison avec celles mesurées sur une station météo identique localisée à moins de 1 km de la zone d'étude (cf. Annexe E).

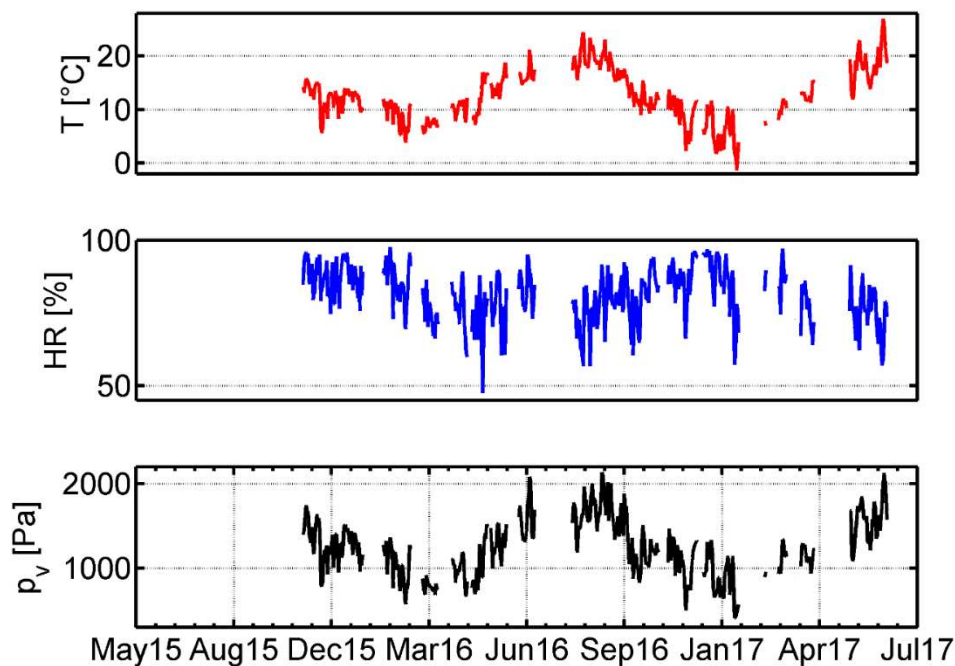


Figure IV-15 : Moyenne journalière des températures, humidités relatives et pression de vapeur de l'air extérieur.

Bien que le climat soit océanique, des températures minimales de -2°C et maximales de 28°C ont été relevées. Par ailleurs, la seconde année de suivi présente des variations de température plus importantes. L'humidité relative présente également de fortes variations allant

de 45% à 95%, avec un niveau moyen assez élevé (de l'ordre de 80%). Par conséquent, la pression de vapeur varie entre 400 et 2100Pa. L'éclairement solaire varie d'une centaine de W.m^{-2} (période hivernale) à 1250W.m^{-2} (période estivale). Enfin, le vent est majoritairement orienté dans la direction Sud-Ouest avec une vitesse moyenne de 2.5m.s^{-1} et des pointes allant jusqu'à 13m.s^{-1} : de fait, aucune des façades étudiées n'est directement face au vent ou sous le vent.

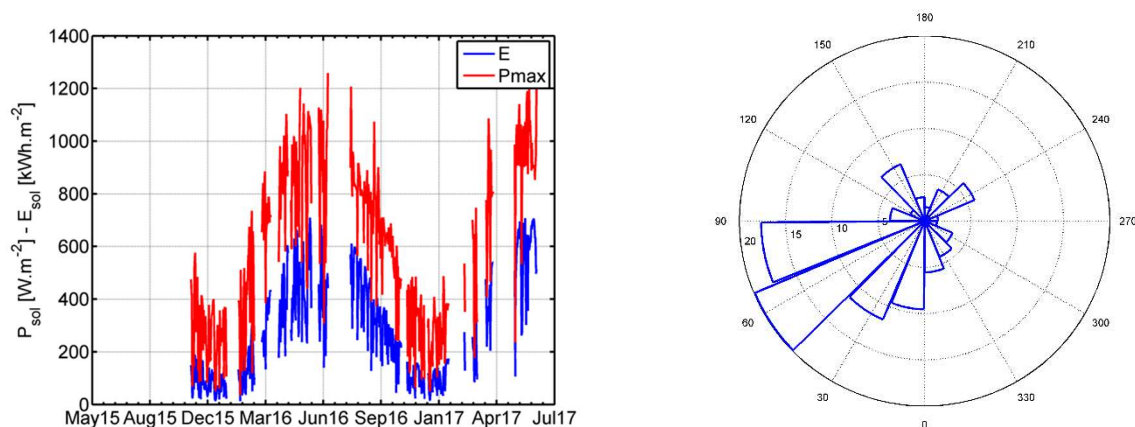


Figure IV-16 : Puissance solaire maximale et éclairement solaire journalier (gauche) et rose des vents (droite).

IV.2.2.2. Réponse thermohydrigue des systèmes d'ITE

La Figure IV-17 présente les évolutions des températures, humidités relatives et pressions de vapeur moyennes journalières mesurées en différents points de la paroi SE durant la période juillet 2016 – juin 2017. Avant de traiter les mesures, il a été vérifié que l'ensemble des capteurs en doublon à chaque position donnaient une information identique (distribution gaussienne des écarts centrée sur 0).

L'ensemble des températures de la paroi présente une allure annuelle identique à celle de la température extérieure. La température du pare-pluie présente les plus grandes variations annuelles, mais également les fluctuations les plus importantes en raison de l'influence de l'éclairement solaire (voir Section IV.2.1.1). En revanche, la température de la cavité d'air varie peu : elle n'excède pas 23°C durant la période estivale et ne descend pas en deçà de 19°C durant la période hivernale, hormis une baisse jusqu'à 10°C durant les vacances scolaires de Noël. Enfin, le rôle isolant du système d'ITE est souligné par le fort gradient de température observé sur son épaisseur durant la période hivernale.

Un comportement analogue est constaté pour l'humidité relative et la pression de vapeur : l'allure annuelle de l'humidité dans la paroi est dictée par celle de l'humidité extérieure. En revanche, on constate que la pression de vapeur moyenne dans la paroi présente les mêmes niveaux que l'air extérieur alors que des gradients d'humidité relative sont observés dans la paroi. Enfin, on note que l'humidité relative dans la cavité d'air reste sensiblement constante et égale à 50%.

Le comportement pour la période 2015/2016 est identique à celui décrit sur la Figure IV-17 pour la période 2016/2017, en particulier au niveau de la cavité d'air. Cela montre qu'il n'y a pas eu d'apport d'humidité dans la cavité d'air tant de la paroi initiale en béton que de l'élément préfabriqué et qu'un régime de pseudo-équilibre thermohydrique a été rapidement atteint.

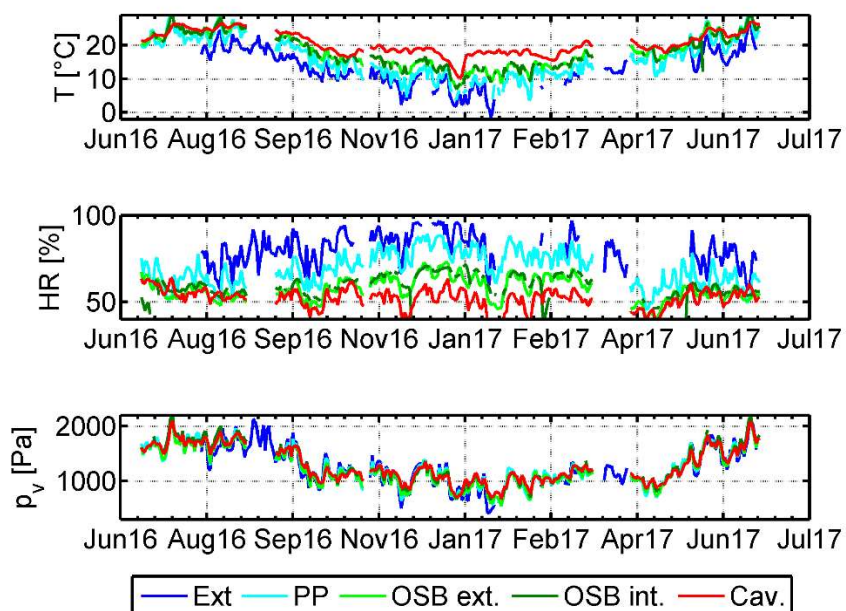


Figure IV-17 : Température, humidité relative et pression de vapeur moyenne journalière en différents points de la paroi SE.

La Figure IV-18 compare les réponses en température, humidité relative et pression de vapeur moyennes journalières mesurées en trois points des parois SE et NO sur la période 2016/2017.

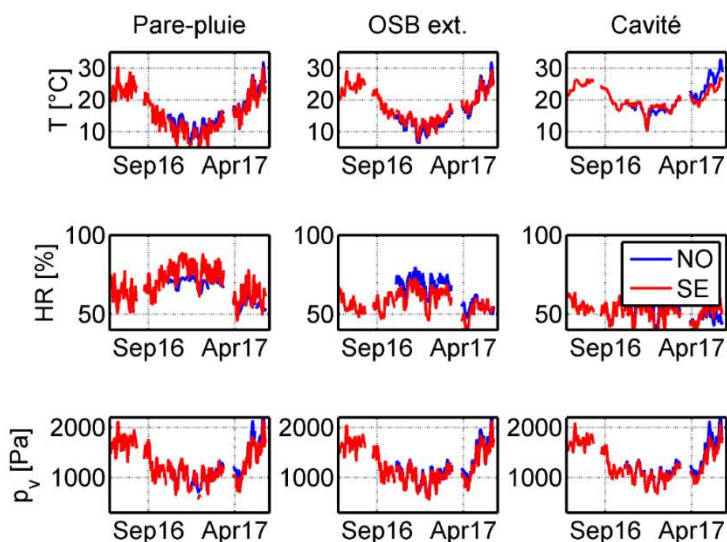


Figure IV-18 : Comparaison des moyennes journalières de température, humidité relative et pression de vapeur moyenne de la paroi SE et de la paroi NO.

D'une manière globale, les évolutions relevées pour chaque orientation sont très semblables en chaque point, même si de petites différences sont constatées sur la période hivernale : au niveau du pare-pluie, les températures sont légèrement moins froides pour la paroi NO et ses fluctuations y sont plus faibles, alors que les humidités relatives hivernales sont plus faibles. A l'inverse, les températures de l'OSB sont légèrement plus faibles et les humidités relatives plus importantes. Contrairement à la paroi SE qui donne sur un espace dégagé, cette paroi NO a en regard d'autres bâtiments et est également moins exposée à l'éclairement solaire.

IV.2.2.3. Evaluation des risques liés à l'humidité

Trois types de risques liés à l'humidité sont évalués : la condensation superficielle, le développement de moisissure et la condensation interstitielle.

Les risques de condensation superficielle sont évalués en surface extérieure de bardage et au niveau du pare-pluie en confrontant la température de surface et la température de rosée de l'air avoisinant. Dans le cas du bardage, une difficulté vient du fait que la mesure de température était limitée aux périodes de vacances scolaires. Cependant, un certain nombre de risques ont été identifiés, principalement en fin de nuit à mi-saison (vacances de Pâques et de Toussaint) et durant la période estivale. En revanche, aucun risque de condensation superficielle n'a été constaté au niveau du pare-pluie, tant sur la paroi SE que NO.

Le risque de développement de moisissure est évalué en confrontant les mesures aux courbes Isopleth définissant la limite entre les conditions favorables et défavorables à un développement de moisissures. Les résultats au niveau du pare-pluie et de l'OSB extérieur des parois SE et NO sur toute la période d'étude (juillet 2015 – juin 2017) sont présentés sur la Figure IV-19 et dans le Tableau IV.1. Afin d'évaluer l'influence de l'orientation, l'analyse est effectuée sur les périodes où les données sont disponibles simultanément pour chaque paroi, soit près de 10000 h. On observe un fort dépassement de la courbe au niveau du pare-pluie de la paroi SE, qu'on ne retrouve pas au niveau de la paroi NO. Ce dépassement est quasiment quotidien et se produit tout au long de l'année. En revanche, des dépassements moins fréquents et moins intenses sont observés au niveau de l'OSB extérieur des deux parois, les risques étant plus importants pour la paroi NO. Par ailleurs, ces risques apparaissent majoritairement durant la période hivernale.

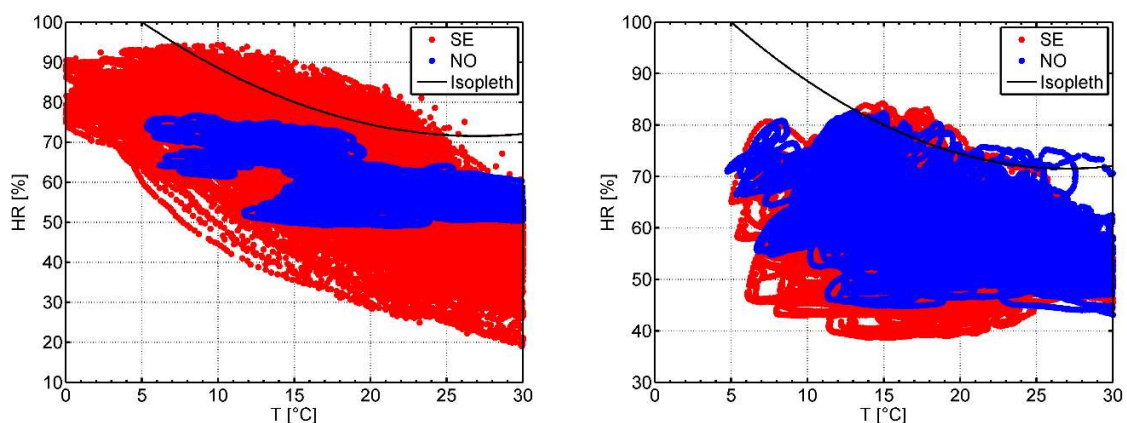


Figure IV-19 : Analyse de risque au regard de la limite du TOW derrière le pare-pluie (gauche) et en surface d'OSB du côté extérieur (droite) des parois SE et NO.

Enfin, la Figure IV-19 indique que les humidités relatives mesurées derrière le pare pluie, au sud-est, et en surface d'OSB, au nord-ouest et sud-est, n'excèdent 95%, indiquant qu'aucun risque de condensation interstitielle n'est rencontré.

	Pare-pluie		OSB extérieur	
	SE	NO	SE	NO
Fréquence de dépassement [-]	1355	0	62	112
Heure de dépassement [h]	814,3	0	19,5	62,7

Tableau IV.1 : Fréquence et temps cumulé de dépassement de la courbe Isopleth.

IV.2.3. Performance globale du bâtiment

IV.2.3.1. Perméabilité à l'air et performance énergétique

Un test de perméabilité à l'air réalisé avant rénovation sur un bâtiment similaire au bâtiment étudié sur le même site a indiqué une perméabilité n_{50} de 5.15 Vol.h^{-1} et a souligné des infiltrations importantes au niveau des menuiseries et des liaisons parois-ouvrants. Après rénovation, un nouveau test sur le bâtiment étudié indique une perméabilité n_{50} de 1.92 Vol.h^{-1} et des fuites d'air très faibles aux jonctions des habillages des encadrements avec les menuiseries.

Les consommations liées au chauffage du bâtiment étudié avant (2014/2015) et après (2015/2016) rénovation sont présentées dans le Tableau IV.2. On constate une diminution de près de 70% des consommations de chauffage.

Année	2014/2015	2015/2016
DJU (totalisés par saison de chauffe)	1590	1470
Consommation chauffage [MWh]	266	80
Ratio de consommation chauffage [$\text{kWh}/^\circ\text{C}$]	167.3	54.4
Consommation VMC [MWh]	-	4.7

Tableau IV.2 : Consommation de chauffage et de ventilation avant et après rénovation.

IV.2.3.2. Qualité de l'ambiance intérieure

La qualité de l'ambiance intérieure de la salle de classe est analysée sur deux périodes distinctes : sur toute la période d'étude (juillet 2015 à juillet 2017) et durant les périodes scolaires.

La Figure IV-20 présente la distribution cumulée des températures et humidités relatives mesurées pour chacune des périodes. Sur toute la période d'étude, la distribution des températures est hétérogène et s'échelonne de 13 à 28°C . Durant les périodes scolaires et les périodes d'enseignement, les niveaux de température sont plus élevés en raison d'une part du chauffage du bâtiment et d'autre part des apports internes (dégagement métabolique, activité liée à l'enseignement (ordinateurs, TP)). Au final, les températures sont comprises entre 18 et 23°C durant près de 70% des périodes d'enseignement. En revanche, la distribution des

humidités relatives est indépendante de la période considérée : l'humidité relative est comprise entre 40 et 60% durant près de 70% du temps.

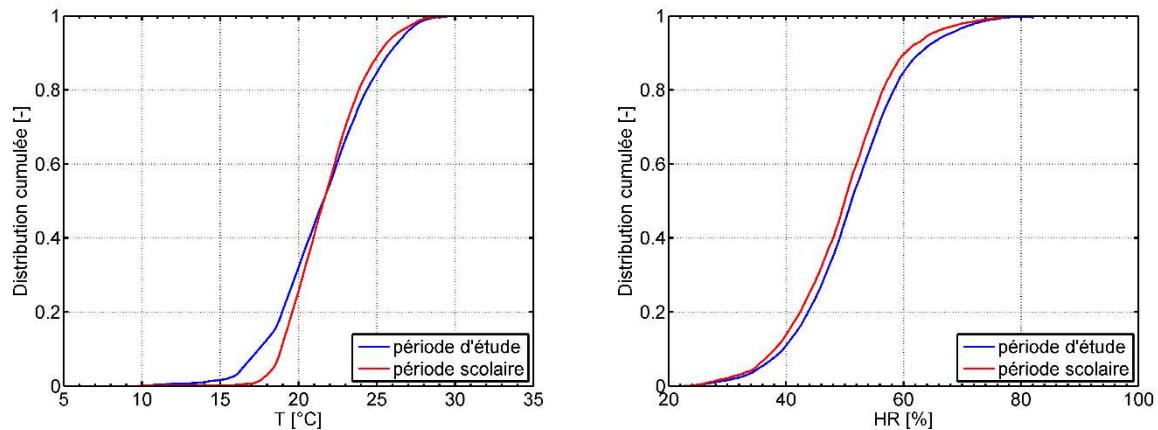


Figure IV-20 : Distribution cumulée des températures et humidités relatives pour trois périodes dans la salle de classe.

Ces valeurs de température et d'humidité relative relevées durant les périodes d'enseignement sont agrégées dans un diagramme psychrométrique sur la Figure IV-21 (gauche) et comparées à la zone de confort thermohydrigue de Givoni. En complément, la Figure IV-21 (droite) présente la distribution cumulée des concentrations en CO₂ mesurées dans la salle de classe. Bien que la qualité de l'air intérieur ne puisse être strictement qualifiée par cette grandeur, elle n'en donne pas moins une indication. En particulier, une valeur seuil de 1000 ppm est couramment définie pour des conditions normales d'occupation dans des bâtiments non résidentiels, avec des tolérances allant de 1300 à 1700 ppm (ANSES, 2013; Legifrance, 2012; RSD, 1982).

Les résultats indiquent que les conditions climatiques dans la salle de classe sont situées majoritairement dans la zone de confort (environ 80% des périodes d'enseignement). Les périodes d'inconfort thermohydrigue sont observées au démarrage des cours (vers 8h) durant la période de chauffe : cela tient du fait que le bâtiment est remis en chauffe en même temps que le début des cours. Les résultats des mesures de CO₂ montrent que les occupants des salles d'enseignement sont exposés durant près de 35% du temps à des concentrations dépassant le seuil de 1000 ppm, avec un maximum enregistré de 4269 ppm. Ces dépassements se produisent essentiellement après de longues périodes d'occupation des locaux (fin de matinée et fin d'après-midi) tout au long de l'année. Bien que constatés, ces dépassements peuvent avoir des conséquences sur la performance des élèves, tant en termes d'attention que de temps de réaction (ANSES, 2013).

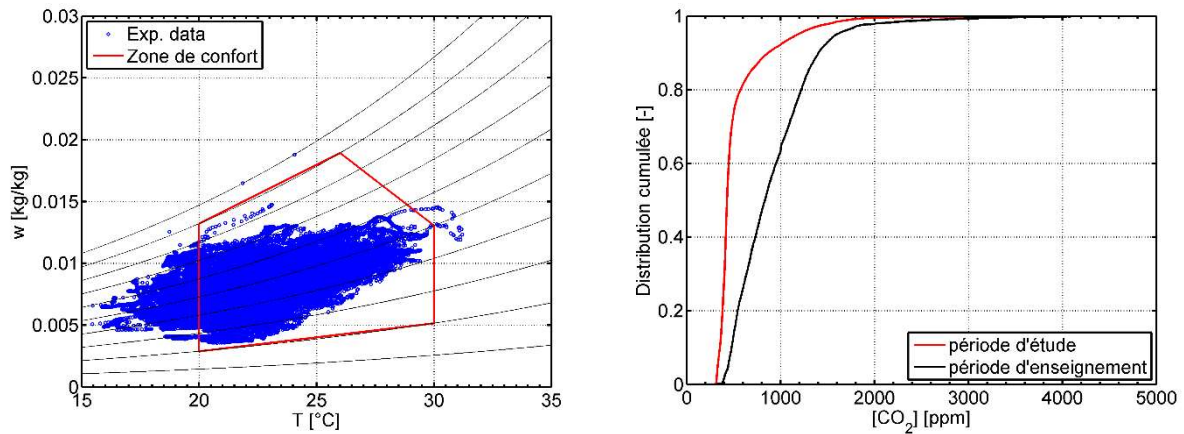


Figure IV-21 : Diagramme de Givoni et distribution cumulée de la concentration en CO_2 dans la salle de classe durant les périodes de cours.

Enfin, la Figure IV-22 présente la différence entre les pressions de vapeur moyennes intérieure et extérieure en fonction de la température extérieure moyenne et la compare aux classes de charge hygrométrique intérieure définies dans la norme (EN ISO 13788, 2001). Les résultats indiquent que l'ensemble des points se situent dans les classes 1 et 2 durant les périodes scolaires et dans la classe 1 durant les périodes de vacances scolaires. Cela signifie qu'aucun risque lié à l'humidité ne semble constaté dans l'ambiance intérieure.

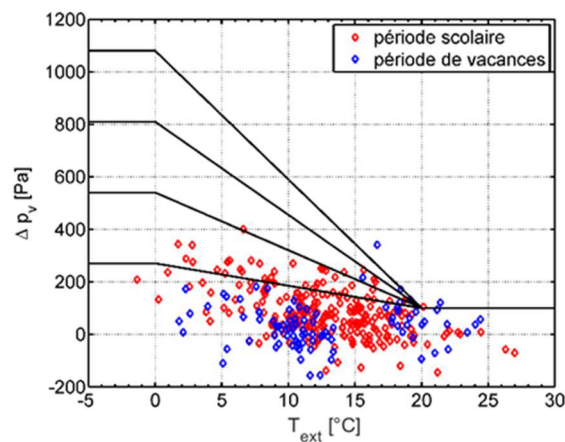


Figure IV-22 : Classe de charge thermohydrrique de la salle de classe.

IV.3. Modélisation thermohydrrique des parois en conditions réelles

IV.3.1. Présentation du modèle

Dans cette partie, on s'attache à modéliser, en 1D, les évolutions de température et d'humidité relative dans les parois. Un aperçu des phénomènes physiques mis en jeu entre l'extérieur et la cavité est présenté sur la Figure IV-23 et est détaillé ci-après.

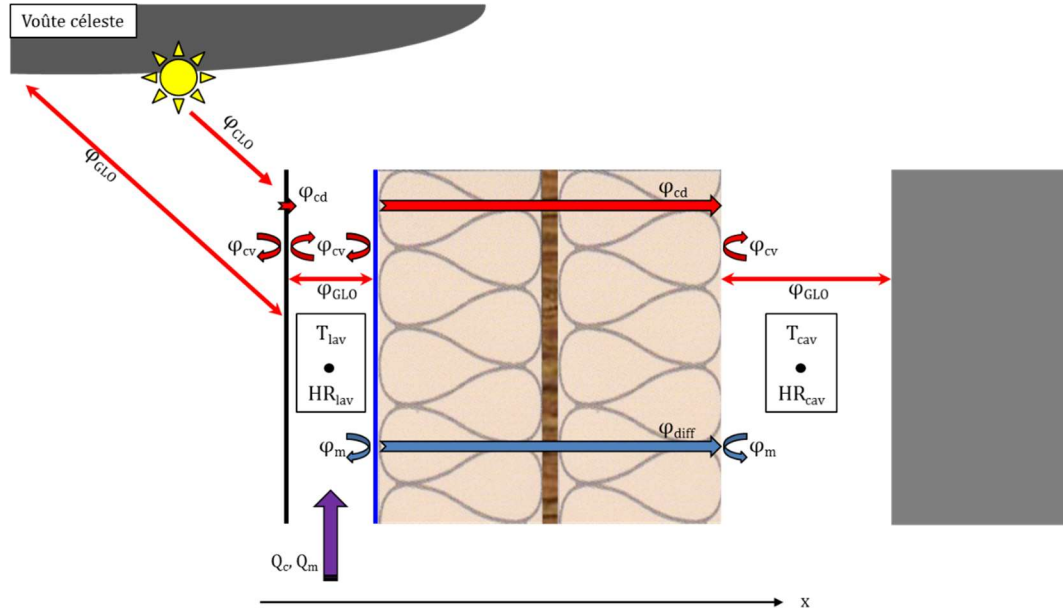


Figure IV-23 : Aperçu des phénomènes physiques modélisés.

Equations constitutives

Les équations décrivant les transferts couplés de chaleur et d'humidité, ainsi que les propriétés thermohydriques des matériaux du complexe isolant (pare-pluie, isolant, OSB et isolant) sont identiques à celles développées dans le chapitre précédent et implémentées sur le logiciel COMSOL Multiphysics. Dans la lame d'air ventilée, une approche basée sur les bilans énergétique et massique est retenue pour y évaluer la température et la pression de vapeur. En ne supposant aucun échange massique entre le bardage et la lame d'air ventilée, les équations s'écrivent :

$$\rho c_p V \frac{\partial T_{lav}}{\partial t} = h_{c,lav} S (T_{bard} - T_{lav}) + h_{c,lav} S (T_{pp} - T_{lav}) + Q_{c,lav} \quad (IV-1)$$

$$Q_{c,lav} = Q_{v,lav} \rho_{air} (c p_{ext} T_{ext} - c p_{lav} T_{lav}) \quad (IV-2)$$

et

$$\frac{V M_v}{RT} \frac{\partial p_{v,lav}}{\partial t} = k_{m,lav} \frac{M_v}{R} S \left(\frac{p_{v,pp}}{T_{pp}} - \frac{p_{v,lav}}{T_{lav}} \right) + Q_{m,lav} \quad (IV-3)$$

$$Q_{m,lav} = Q_{v,lav} (\rho_{v,ext} - \rho_{v,lav}) \quad (IV-4)$$

avec les indices « bard », « pp » et « ext » pour les grandeurs du bardage, du pare-pluie et de l'air extérieur. Le débit volumique d'air $Q_{v,lav}$ est défini comme :

$$Q_{v,lav} = v_{lav} e_{lav} l_{lav} \quad (IV-5)$$

avec e_{lav} et l_{lav} l'épaisseur et la largeur de la lame d'air ventilée et v_{lav} la vitesse de l'air dans la lame d'air ventilée. L'évaluation de cette dernière est difficile. En effet, Falk (Falk J., 2014) et Langmans *et al.* (Langmans et al., 2016) ont montré qu'elle variait notamment en raison de la variabilité de l'éclairement solaire, et dépendait de paramètres comme la nature et le mode

constructif du bardage, le nombre et la taille des ouvertures ou l'orientation par rapport au vent dominant. Par ailleurs, elle influence également les coefficients d'échange thermique $h_{c,lav}$ et massique $k_{m,lav}$. Dans cette étude, on fait l'hypothèse que la vitesse d'air est constante et égale à 0.5m.s^{-1} , correspondant à un taux de renouvellement d'air de 1200Vol.h^{-1} . De même, le coefficient d'échange thermique $h_{c,lav}$ est supposé constant et égal à $7.5\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et le coefficient d'échange massique $k_{m,lav}$ est déduit de l'hypothèse de Lewis.

Conditions aux limites

L'ensemble des conditions aux limites thermique et hydrique sont rassemblées dans le Tableau IV.3.

A l'interface isolant/cavité, les températures T_{cav} et T_{beton} et la pression de vapeur $p_{v,cav}$ sont issues des mesures. En considérant la convection naturelle dans la cavité, le coefficient d'échange thermique $h_{c,lav}$ est supposé égal à $2.5\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Le facteur de forme F_{cav} est estimé à 0.75 (cas de deux plans parallèles) et l'émissivité de l'isolant ε est fixée à 0.6.

Aux interfaces jouxtant la lame d'air ventilée, le facteur de forme F_{lav} est estimé à 0.92 (cas de deux plans parallèles) et les émissivités mesurées pour le pare pluie et le bardage sont respectivement égales à 0.7 et 0.95.

A l'interface bardage/extérieur, la température T_{ext} est issue des mesures. Le coefficient d'échange thermique $h_{c,ext}$ est estimé à partir de la vitesse de vent comme $h_{c,ext} = 4 + 4v$. L'absorptivité solaire du bardage est fixée à 0.95. Enfin, l'éclairement solaire reçu par un plan vertical est recalculé à partir de la mesure de rayonnement solaire reçu par un plan horizontal (Perrin de Brichambaut and Vauge, 1982).

Interface	Thermique	Hydrique
Isolant / cavité	$\Phi_{cav} = h_{c,cav}(T_{cav} - T_{isol})$ $+ \varepsilon \sigma F_{cav}(T_{Bet}^4 - T_{isol}^4)$ $+ F_{m,cav}Lv$	$F_{m,cav} = \frac{k_{m,cav}M_v}{R} \left(\frac{p_{v,cav}}{T_{cav}} - \frac{p_{v,isol}}{T_{isol}} \right)$
Pare-pluie / lame d'air ventilée	$\Phi_{lav,PP} = h_{c,lav}(T_{lav} - T_{pp})$ $+ \varepsilon \sigma F_{lav}(T_{bard}^4 - T_{pp}^4)$ $+ F_{m,lav}Lv$	$F_{m,lav} = \frac{k_{m,lav}M_v}{R} \left(\frac{p_{v,lav}}{T_{lav}} - \frac{p_{v,pp}}{T_{pp}} \right)$
Bardage / lame d'air ventilée	$\Phi_{lav} = h_{c,lav}(T_{lav} - T_{bard})$ $+ \varepsilon \sigma F_{lav}(T_{bard}^4 - T_{pp}^4)$	-
Bardage / extérieur	$\Phi_{ext} = h_{c,ext}(T_{ext} - T_{bard})$ $+ \varepsilon \sigma F_{ciel}(T_{ciel}^4 - T_{bard}^4)$ $+ \alpha E_s$	-

Tableau IV.3 : Conditions aux limites thermique et hydrique.

Conditions initiales

Les températures et pressions de vapeur mesurées en différents points de la paroi sont utilisées et extrapolées sur toute l'épaisseur pour fixer les conditions initiales.

IV.3.2. Résultats de simulation et confrontation à l'expérience

Des simulations sont menées sur les parois SE et NO pour deux périodes : une première hivernale durant laquelle la paroi NO reçoit peu d'éclairement solaire direct et une seconde estivale.

IV.3.2.1. Simulation en période hivernale

La période du 23 au 27 Décembre 2016 (présentée dans la section IV.2.1.2) est étudiée. La Figure IV-24 présente les évolutions mesurées et simulées en surface de bardage et dans la lame d'air ventilée de la paroi SE. Globalement, les dynamiques des évolutions de température et d'humidité relative sont fidèlement reproduites. Durant les périodes nocturnes, on note un bon accord des niveaux de température que ce soit en surface de bardage ou dans la lame d'air ventilée, mais une légère surestimation de l'humidité relative dans la lame d'air ventilée. Durant les journées ensoleillées, la température de surface de bardage est bien prédite. En revanche, la température et l'humidité relative de la lame d'air sont respectivement sous- et surestimée. A l'inverse, elles sont respectivement sur- et sous-estimées lors des journées moins ensoleillées. La pression de vapeur étant, quant à elle, correctement prédite.

Ces écarts observés entre simulation et expérience peuvent en partie tirer leur origine dans l'hypothèse d'une vitesse d'air constante dans la lame d'air ventilée. Pour rappel, Falk (Falk J., 2014) et Langmans *et al.* (Langmans et al., 2016) ont montré que celle-ci était variable et dépendait de l'orientation de la paroi par rapport au vent dominant ou encore des conditions de température et d'éclairement solaire.

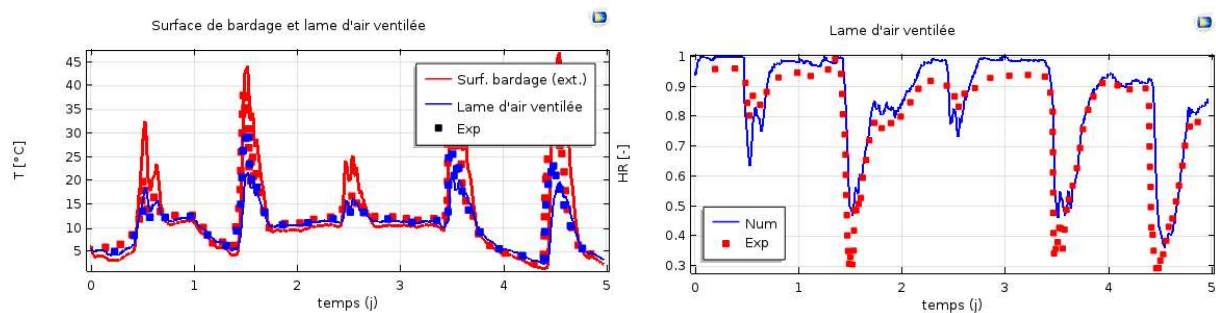


Figure IV-24 : Comparaison des températures et humidités relatives mesurées et simulées en surface de bardage et dans la lame d'air ventilée de la paroi SE durant une période hivernale.

La Figure IV-25 présente les évolutions mesurées et simulées de la température en différents points du système d'ITE et de la densité de flux thermique. Concernant les températures, la dynamique est à nouveau bien reproduite et les quelques écarts observés entre simulation et expérience sont plus faibles que dans la lame d'air ventilée. Par ailleurs, on ne note pas d'effets liés aux conditions initiales durant les premiers instants de la simulation : choisir les températures mesurées et les extrapoler est suffisant, d'autant plus que le système d'ITE possède une faible inertie thermique.

Concernant la densité de flux thermique, on observe un mauvais accord, en termes d'amplitude, entre la mesure et la simulation. Cependant, on constate que les niveaux mesurés sont

globalement faibles. Par ailleurs, une analyse des différents termes composants cette densité de flux ϕ_{cav} (voir Tableau IV.3) souligne la contribution importante du rayonnement GLO entre le système d'ITE et la paroi en béton.

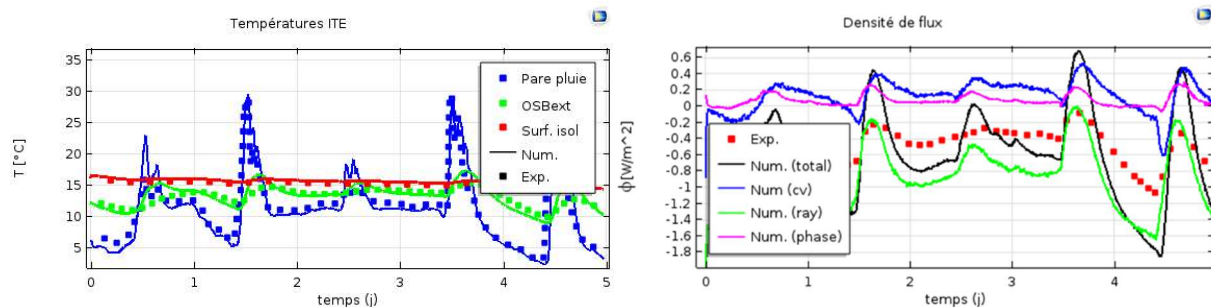


Figure IV-25 : Comparaison des températures et de la densité de flux thermique mesurées et simulées dans le système d'ITE de la paroi SE durant une période hivernale.

La Figure IV-26 présente les évolutions mesurées et simulées d'humidité relative en différents points du système d'ITE. Deux simulations sont en particulier réalisées : une première avec les propriétés thermohydrauliques mesurées des matériaux et une seconde avec des propriétés modifiées comme dans le Chapitre III (pour rappel : modification de la courbe de sorption de la laine de verre et de la valeur du facteur de résistance à la diffusion de vapeur de l'OSB). Les résultats de la première simulation présentent un bon accord avec les mesures, en particulier de part et d'autre de l'OSB. De faibles écarts subsistent au niveau du pare-pluie, surtout lors de chaque pic. En revanche, les écarts importants observés entre les résultats de la seconde simulation et l'expérience soulignent la forte sensibilité des simulations aux propriétés thermohydrauliques. Par ailleurs, des difficultés de stabilité numérique (augmentation brutale de l'humidité relative) sont apparues pour cette seconde simulation.

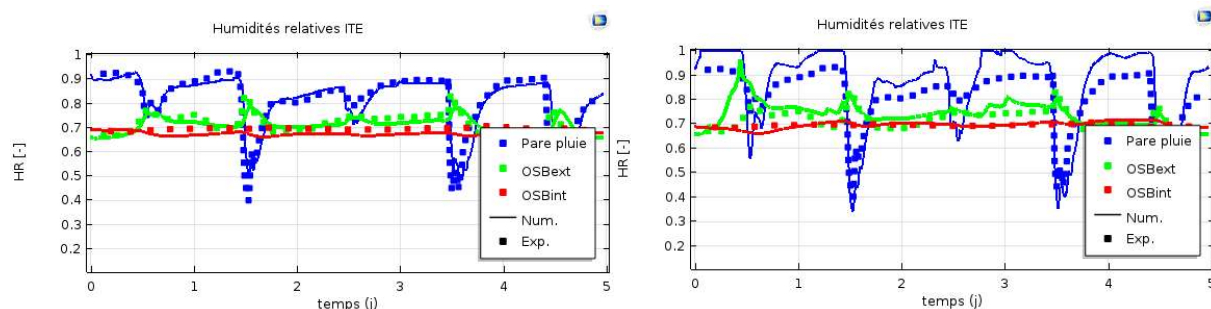


Figure IV-26 : Comparaison des humidités relatives mesurées et simulées dans le système d'ITE de la paroi SE durant une période hivernale.

La Figure IV-27 présente la comparaison des températures et des humidités en différents points du système d'ITE de la paroi NO. Globalement, on note un bon accord des températures au niveau du pare-pluie et de l'OSB, même si des écarts, allant jusqu'à 2°C, peuvent être ponctuellement observés. En revanche, un écart sensiblement constant de 1°C est constaté en surface d'isolant donnant sur la cavité d'air. Concernant les humidités relatives, leur prédiction est de moins bonne qualité pour cette paroi, en particulier au niveau du pare-pluie. Cela tient

d'une part aux écarts observés sur les températures et d'autre part au fait que les conditions limites locales, c'est-à-dire directement à proximité de la paroi, ne sont pas directement appréhendées (présence de bâtiments à proximité).

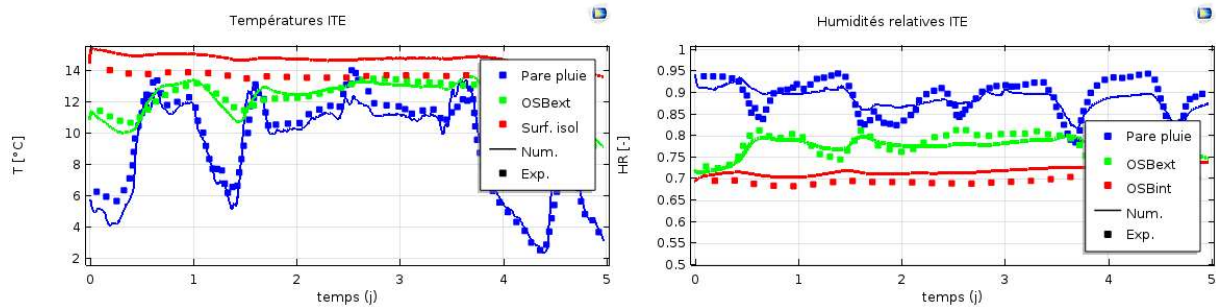


Figure IV-27 : Comparaison des températures et humidités relatives mesurées et simulées dans la paroi NO.

IV.3.2.2. Période estivale

L'analyse porte ici sur la période s'étalonnant du 20 au 25 Septembre 2016, durant laquelle un ensoleillement important est observé chaque jour. La Figure IV-28 présente les évolutions mesurées et simulées dans la lame d'air ventilée de la paroi SE. On note un bon accord simulation/expérience durant les périodes nocturnes et des écarts significatifs en présence d'éclairement solaire. Ces observations corroborent celles faites pour la période hivernale et soulignent à nouveau que la vitesse d'air est surestimée dans la lame d'air ventilée.

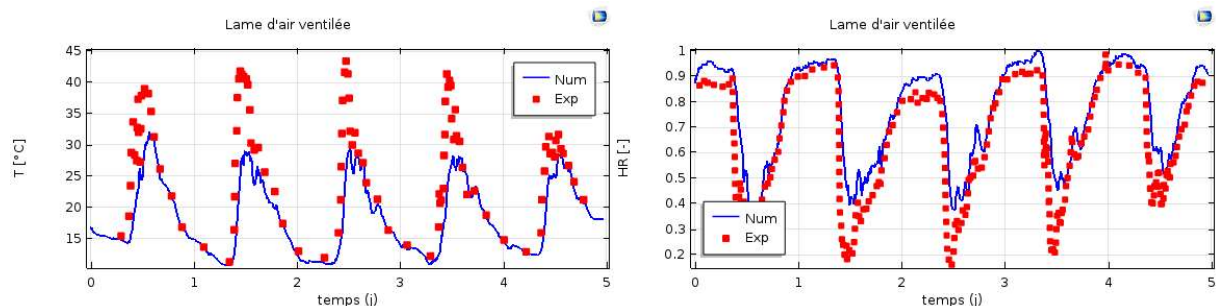


Figure IV-28 : Comparaison des températures et humidités relatives mesurées et simulées dans la lame d'air ventilée de la paroi SE durant une période hivernale.

La Figure IV-29 présente les évolutions mesurées et simulées de la température et de l'humidité relative en différents points du système ITE des parois SE et NO. Les différences entre les températures mesurées et simulées n'excèdent pas 1°C, hormis au niveau du pare-pluie de la paroi NO où des écarts allant jusqu'à 7°C sont observés en fin de journée (lorsque l'éclairement solaire donnant sur cette paroi devient significatif). En ce qui concerne la confrontation des humidités relatives mesurées et calculées on observe des évolutions en phases avec des écarts d'amplitude satisfaisants.

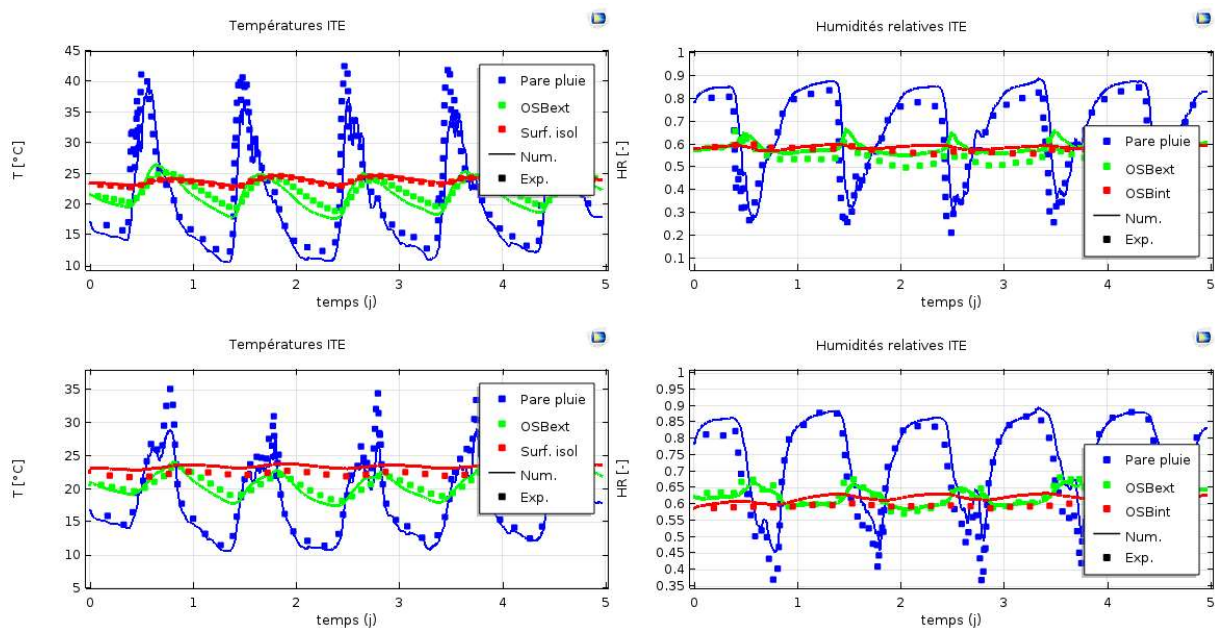


Figure IV-29 : Comparaison des températures et humidités relatives mesurées et simulées dans la paroi SE (haut) et la paroi NO (bas).

IV.4. Conclusions de l'étude

Dans ce chapitre, le comportement thermohydrrique de parois rénovées a été suivi expérimentalement en conditions d'usage et a fait l'objet de simulations numériques. Expérimentalement, il apparait que le rayonnement solaire est un facteur qui conditionne beaucoup la réponse locale en température et en humidité du système sous bardage, tant au niveau de la lame d'air ventilée (évacuation d'humidité observée durant la période estivale) que dans le complexe isolant (hausse ponctuelle de l'humidité relative observée durant la période hivernale). En revanche, le comportement thermohydrrique pluriannuel est quant à lui gouverné par les conditions extérieures de température et de pression de vapeur. Par conséquent, aucun risque de condensation superficielle ou interstitielle et des risques très limités de développement de moisissure ont été constaté. Par ailleurs, il semblerait qu'un régime de pseudo-équilibre thermohydrrique ait été atteint rapidement après la pose de l'ITE. Au final, la rénovation de l'enveloppe a conduit à une amélioration significative de la performance énergétique du bâtiment.

Concernant la simulation, les résultats numériques sont conformes aux tendances expérimentales, tant pour la température que pour l'humidité relative. Cependant, des écarts sont ponctuellement observés, surtout en présence d'éclairement solaire, et proviennent certainement d'hypothèses de modélisation simplificatrices au niveau de la lame d'air ventilée.

Conclusion générale et perspectives

Dans le chapitre I, l'état de l'art a montré que l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments passe par la minimisation de la consommation énergétique des équipements, mais aussi par l'amélioration de l'enveloppe du bâti qui constitue l'interface entre les ambiances intérieure et extérieure.

Ainsi, l'isolation thermique par l'extérieur constitue une méthode classique de rénovation : une enveloppe globale protectrice autour de la construction permet de traiter les déperditions de chaleur au niveau des façades en éliminant les ponts thermiques, tout en préservant la surface habitable. Par ailleurs, le recours à de nouveaux matériaux plus respectueux de l'environnement, comme des matériaux biosourcés, tend à se généraliser dans ces enveloppes. Cependant, l'application d'un système d'isolation peut modifier les mouvements de vapeur d'eau au sein de l'enveloppe et conduire à des phénomènes de condensation et à ses conséquences (apparition de moisissures néfastes pour la qualité de l'air intérieur, dégradation des matériaux, gonflement des enduits, etc...).

Les objectifs de cette thèse étaient de contribuer à une meilleure appréhension du comportement de différents systèmes ITE en fonction de la pose et du type de matériaux isolant exploité. Pour répondre à ces objectifs, les travaux présentés concernent des études expérimentales, en laboratoire et en situation réelle, du comportement thermohydrrique de parois, ainsi que le développement et la validation de modèles numériques représentatif des transferts en régime transitoire au sein de ces parois.

Les études expérimentales, menées au sein du laboratoire ont permis d'établir plusieurs bases de données : propriétés de matériaux ; comportement thermohydrrique de quatre parois dans différentes conditions.

L'instrumentation mise en œuvre et les différentes séquences de mesures en enceinte biclimatique ont permis d'analyser la réponse thermohydrrique des différents systèmes et d'évaluer le risque d'apparition de condensation. Nous avons pu observer que l'application de systèmes sous bardages ne fait que ralentir le séchage de la paroi sans apporter d'humidité.

En revanche, l'application d'un système ETICS, à l'aide de colle, peut représenter une source d'humidité importante pour la paroi. Dans le cas de rénovation, si la paroi existante est peu perméable à la vapeur d'eau, cet état de saturation peut demeurer et réduire à la durée de vie de l'enveloppe. A l'inverse, si celle-ci est perméable à la vapeur, l'eau contenue dans la colle pourra s'évacuer plus facilement. Ces travaux ont également montré la difficulté d'instrumenter de tel systèmes pour des suivis de longue durée.

Au chapitre III cette base de données expérimentales a été exploitée pour développer des modèles 1D, voir 2D pour le parpaing, destinés à la prédiction de la température et de l'humidité relative au sein des systèmes.

Concernant les systèmes sous bardage, les simulations ont permis de mettre en avant la sensibilité des propriétés hydriques des matériaux (dérivée de l'isotherme de sorption et facteur de résistance à la diffusion de vapeur) sur les humidités relatives simulées. De plus, il apparaît

que la capacité hydrique élevée des isolants biosourcés pourrait être un paramètre intéressant afin d'atténuer les apports d'humidité extérieure, en particulier lorsque le climat est très humide. Dans le cas du système PSE, les études numériques ont permis de confirmer la forte influence de la colle. Toutefois, le modèle n'a pas été totalement validé. En effet, même si des tendances sont retrouvées un certain nombre de points doivent être affinés du fait des incertitudes sur les conditions initiales ainsi que sur l'état d'équilibre des parois. Ces constats mettent en avant qu'une attention particulière doit être accordée aux conditions de pose des systèmes en polystyrène sous-enduits lors des phases de conception (neuf et existant).

Le suivi « in situ » de parois d'un bâtiment après sa rénovation thermique, mis en œuvre dans le cadre de la thèse, a permis d'appréhender le comportement de systèmes ITE dans des conditions réelles et d'autre part d'évaluer les gains énergétiques.

Sur la durée du suivi nous avons constaté que le comportement thermohydrrique annuel des ITE est fortement lié à la température et la pression de vapeur de l'air extérieur. Pour le comportement journalier, le rayonnement solaire joue un rôle important. En effet, il a une influence directe sur les échanges thermohydrriques en surface du bardage métallique et au sein de la lame d'air. Les confrontations des mesures aux résultats des simulations de la réponse thermohydrrique des systèmes ITE, en régime transitoire, ont mis en évidence la nécessité d'affiner les hypothèses de modélisation, en particulier pour la lame d'air ventilée. Enfin, nous avons constaté que les risques de moisissures au sein des parois étaient faibles

Enfin, une analyse globale du bâtiment a montré que les travaux de rénovation sur les parois et la gestion du renouvellement d'air ont permis de réduire de façon très probante la consommation énergétique du bâtiment.

En conclusion, ces travaux ont permis de développer au sein du laboratoire un savoir-faire complémentaire pour l'instrumentation et le test de parois. Les modèles numériques développées pour la prédiction des transferts de chaleur et d'humidité au sein de parois multicouches doivent permettre d'apporter une aide à la conception et à la pose de systèmes ITE.

Toutefois, les constats issus des différents chapitres ouvrent la voie à plusieurs perspectives. Les expérimentations ont permis de mettre en avant la difficulté de mesure aux interfaces ainsi que dans les matériaux faiblement hygroscopiques, notamment pour la paroi PSE où la présence de colle complique l'interprétation. Il serait donc intéressant d'affiner la précision des mesures et/ou de la confirmer, soit à l'aide d'une instrumentation supplémentaire soit à l'aide d'un dispositif expérimental complémentaire pour appréhender les phénomènes se déroulant aux interfaces. De plus, il serait intéressant d'intégrer un isolant biosourcé dans une simulation annuelle, voir pluriannuelle, afin de déterminer si les performances et la durabilité des systèmes sous bardages peuvent être améliorés. Toutefois, pour parvenir à cet objectif, il serait également intéressant de perfectionner la modélisation de la lame d'air. Parallèlement, la conception des dispositifs sous bardage ne doit pas négliger le potentiel de cet espace ventilé. Ainsi, sa géométrie, les ouvertures et le matériau utilisé pour le bardage (au regard des apports solaires) doivent être définies pour maximiser le potentiel de séchage de la paroi.

Références

- Abdou, A., Budaiwi, I., 2013. The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content. *Construction and Building Materials* 43.
- ADEME, 2017. *Climat, Air et Energie*, 2017th ed.
- ADEME, 2013. *Isoler son logement*.
- Aïssani, A., Chateauneuf, A., Fontaine, J.-P., Audebert, P., 2016. Quantification of workmanship insulation defects and their impact on the thermal performance of building facades. *Applied Energy* 165.
- Amaro, B., Saraiva, D., De Brito, J., Flores-Colen, I., 2014. Statistical survey of the pathology, diagnosis and rehabilitation of ETICS in walls. *Civil Engineering and Management* 20.
- Amaro, B., Saraiva, D., de Brito, J., Flores-Colen, I., 2013. Inspection and diagnosis system of ETICS on walls. *Construction and Building Materials*.
- Anderson, R.B., 1946. Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller Equation. *J. Am. Chem. Soc.* 68.
- ANSES, 2013. Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé.
- Baran, I., Bliuc, I., Iacob, A., Dumitrescu, L., Pescaru, R.A., Helepciuc, C., 2016. Interstitial Condensation Risk at Thermal Rehabilitated Buildings. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 161.
- Barreira, E., De Freitas, V.P., 2015. *External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS): An Evaluation of Hygrothermal Behaviour*. Springer.
- Barreira, E., De Freitas, V.P., 2014. External thermal insulation composite systems: Critical parameters for surface hygrothermal behaviour. *Advances in Materials Science and Engineering* 2014.
- Barreira, E., De Freitas, V.P., 2013. Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). *Building and Environment* 63.
- Barreira, E., De Freitas, V.P., 2008. Defacement of ETICS cladding due to hygrothermal behaviour, in: 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul, Turkey.
- Barreira, E., De Freitas, V.P., Delgado, J.M.P.Q., 2013. Biological defacement of External Thermal Insulation Composite Systems, in: *Hygrothermal Behavior, Building Pathology and Durability, Building Pathology and Rehabilitation*. Springer Berlin Heidelberg.
- Barreira, E., Delgado, J.M.P.Q., De Freitas, V.P., 2013. Wetting and drying of external surfaces with ETICS systems. *Defect and Diffusion Forum*.
- Barreira, E., Delgado, J.M.P.Q., Ramos, N.M.M., De Freitas, V.P., 2012. Drying kinetics of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). *Defect and Diffusion Forum*.
- Batirama, 2017. Quelles tendances pour le marché de l'ITE sur 2017 ?
- Bories, S., Prat, M., 1995. Transferts de chaleur dans les milieux poreux.
- Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, E., 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.* 60.
- Carré, P., Legall, R., 1990. Determination of thermal-conductivities in CVR-Balsa multilayer structures. *Revue Générale de Thermique* 29.
- Cascione, V., Marra, E., Zirkelbach, D., Liuzzi, S., Stefanizzi, P., 2017. Hygrothermal analysis of technical solutions for insulating the opaque building envelope. *Energy Procedia*, ATI 2017 - 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association 126.
- Cellule Economique de Bretagne, 2013. *Le tableau de bord de la construction durable en Bretagne - Bilan 2012*.
- Chvatal, K.M.S., Corvacho, H., 2009. The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption. *Journal of Building Performance Simulation* 2.
- Colinart, T., Bendouma, M., Glouannec, P., 2017. Analysis of mould growth models and influence of the hygrothermal properties. Presented at the 14th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Ghent.
- Colinart, T., Glouannec, P., 2017. Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 1: Experimental evidence and modeling. *Energy and Buildings* 139.

- Colinart, T., Glouannec, P., Bendouma, M., 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.
- Crausse, P., Laurent, J.P., Perrin, B., 1996. Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux : Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrigue de parois de bâtiment. *Revue générale de Thermique* 35.
- CSTB, 2013. Cahier des Prescriptions Techniques d'emploi et de mise en œuvre : Systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit sur polystyrène expansé.
- Dahan, P., 2008. Pathologie de l'humidité. Paroi simple : Phénomènes de condensation.
- Daïan, J.F., 2013. Equilibre et transferts en milieux poreux (Thèse). Université Joseph Fourier, Grenoble.
- De Freitas, V.P., Abrantes, V., Crausse, P., 1996. Moisture migration in building walls - Analysis of the interface phenomena. *Building and Environment* 31.
- Degiovanni, A., 1994. Conductivité et diffusivité thermique des solides. Mesure des grandeurs thermophysiques, *Techniques de l'ingénieur*.
- Derluyn, H., Janssen, H., Carmeliet, J., 2011. Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials. *Construction and Building Materials* 25.
- Desogus, G., Mura, S., Ricciu, R., 2011. Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings* 43.
- Desta, T.Z., Langmans, J., Roels, S., 2011. Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes. *Building and Environment*.
- Dos Santos, G.H., Mendes, N., 2009. Heat, air and moisture transfer through hollow porous blocks. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.
- EN ISO 9223, 1992. Corrosion of metals and alloys: Corrosivity of atmospheres - Classification.
- EN ISO 9869, 2014. Isolation thermique - Éléments de construction - Mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique - Partie 1 : méthode du fluxmètre.
- EN ISO 12571, 2013. Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique.
- EN ISO 12572, 2016. Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau - Méthode de la coupelle.
- EN ISO 13788, 2001. Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation—Calculation methods. CEN.
- EN ISO 15026, 2008. Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique. CEN.
- ETAG 004, 2000. European Organisation for Technical Approvals. Guideline for European technical approval of external thermal insulation composite systems with rendering.
- Falk J., 2014. Rendered rainscreen walls (Thèse). Lund University, Sweden.
- Gagliano, A., Nocera, F., Aneli, S., 2016. Thermodynamic analysis of ventilated façades under different wind conditions in summer period. *Energy and Buildings* 122.
- Galbraith, G.H., McLean, R.C., 1990. Interstitial condensation and the vapour permeability of building materials. *Energy and Buildings* 14.
- Gaspar, K., Casals, M., Gangoells, M., 2016. A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value. *Energy and Buildings* 130.
- Hagentoft, C.E., 2001. Introduction to building physics. Studentlitteratur AB.
- Hens, H.S., 2010. Applied building physics: boundary conditions, building performance and material properties. John Wiley & Sons.
- Hopfe, C.J., Hall, M.R., 2013. Heat and moisture: issues and applications. *Journal of Building Performance Simulation* 6.
- Hradil, P., Toratti, T., Vesikari, E., Ferreira, M., Häkkinen, T., 2014. Durability considerations of refurbished external walls. *Construction and Building Materials*.
- Huetz, J., Petit, J.P., 1990. Notions de transfert thermique par convection. *Techniques de l'Ingénieur*.
- Hukka, A., Viitanen, H.A., 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology* 33.

- Imbert, C., Mediouni, D., Vincent, J.M., 2011. Isolation thermique par l'extérieur : 40 questions - 40 réponses.
- Incropera, F.P., De Witt, D.P., 1985. Fundamentals of heat and mass transfer.
- Jiru, T.E., Haghighat, F., 2008. Modeling ventilated double skin façade - A zonal approach. *Energy and Buildings* 40.
- Johansson, P., Svensson, T., Ekstrand-Tobin, A., 2013. Validation of critical moisture conditions for mould growth on building materials. *Building and Environment*.
- Karagiozis, A., Salonvaara, M., 2001. Hygrothermal system-performance of a whole building. *Building and Environment, Building and Environmental Performance Simulation: Current State and Future Issues* 36.
- Khadra, M., Joulin, A., Tittel, P., Lassue, S., 2016. Analyse des échanges radiatifs et convectifs dans un canal rectangulaire ventilé ouvert, soumis à des sollicitations thermiques asymétriques. Presented at the Congrès SFT, Toulouse.
- Kočí, J., Maděra, J., Černý, R., 2014. Generation of a critical weather year for hygrothermal simulations using partial weather data sets. *Building and Environment* 76.
- Krus, M., Sedlbauer, K., Zillig, W., Kunzel, H.M., 2001. A new model for mould prediction and its application on a test roof. Proceedings of the contribution to the II International Scientific Conference on "The current problems of building-physics in the rural building".
- Kunzel, H., Karagiozis, A., Kehr, M., 2008. Assessing the benefits of cavity ventilation by hygrothermal simulation, in: *Building Physics Symposium in Honour of Prof. Hugo LSC Hens*. Leuven, Belgium.
- Kunzel, H., Kunzel, H.M., Sedlbauer, K., 2006. Long-term performance of external thermal insulation systems (ETICS). *ACTA Architectura* 5.
- Kunzel, H.M., 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One-and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag Stuttgart.
- Kunzel, H.M., Leimer, H.P., 2001. Performance of innovative vapor retarders under summer conditions. *ASHRAE Transactions* 107.
- Laaroussi, N., Lauriat, G., Raefat, S., Garoum, M., Ahachad, M., 2017. An example of comparison between ISO Norm calculations and full CFD simulations of thermal performances of hollow bricks. *Journal of Building Engineering*.
- Labat, M., Woloszyn, M., Garnier, G., Rusaouen, G., Roux, J.J., 2012. Impact of direct solar irradiance on heat transfer behind an open-jointed ventilated cladding: Experimental and numerical investigations. *Solar Energy* 86.
- Langmans, J., Desta, T.Z., Alderweireldt, L., Roels, S., 2016. Field study on the air change rate behind residential rainscreen cladding systems : A parameter analysis. *Building and Environment*.
- Lecharpentier, D., 2000. Optimisation d'un procédé de séchage. Problématiques liées au transfert de masse et de chaleur lors de l'utilisation de technologies rayonnantes micro-onde et infrarouge (Thèse). Université de Nantes.
- Legifrance, 2012. Décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public. www.legifrance.gouv.fr.
- Lelièvre, D., 2015. Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés (Thèse). Université de Bretagne Sud.
- Liisma, E., Raado, L.M., Lumi, S., Lill, I., Sulakatko, V., 2014. The effect of moisture content of insulation boards on the adhesion strength of ETICS, in: *Proceedings of the 5th European Conference of Civil Engineering ECCIE*.
- Marinosci, C., Strachan, P.A., Semprini, G., Morini, G.L., 2011. Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy and Buildings* 43.
- McLeod, R.S., Hopfe, C.J., 2013. Hygrothermal implications of low and zero energy standards for building envelope performance in the UK. *Journal of Building Performance Simulation* 6.
- Mirsadeghi, M., Cóstola, D., Blocken, B., Hensen, J.L.M., 2013. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty. *Applied Thermal Engineering* 56.
- NF DTU 31.2, 2011. Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois.

- Nicolai, A., Grunewald, J., Fechner, H., 2010. DELPHIN: Simulation program for coupled heat, air, moisture, salt and VOC transport. Available at: www.bauklimatik-dresden.de/delphin.
- Oliva, J.P., Courgey, S., 2010. L'isolation thermique écologique. Terre vivante.
- Oreszczyn, T., Pretlove, S.E.C., 1999. Condensation Targeter II: Modelling surface relative humidity to predict mould growth in dwellings. *Building Services Engineering Research and Technology* 20.
- Perrin de Brichambaut, C., Vauge, C., 1982. Le gisement solaire : évaluation de la ressource énergétique, Technique et Documentation. ed. Lavoisier.
- Petránek, V., Šubrt, R., Plachý, J., Nevřivová, L., Petricek, T., Kalousek, L., Čaha, Z., 2013. Thermal bridges in insulation systems. *Advanced Materials Research* 732–733.
- Poggi, P., 2015. Isolants biosourcés : Des performances en hausse...
- Poyet, S., 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.
- RAGE, 2015. Règles de l'Art Grenelle Environnement - Isolation par l'extérieur : Mise en œuvre des procédés de bardage rapporté à lame d'air ventilée.
- RAGE, 2014. Règles de l'Art Grenelle Environnement - Procédés d'isolation thermique extérieure par enduit sur polystyrène expansé : Emploi et mise en œuvre.
- Ramanauskas J., Stankevicius V., 1998. Weather durability of external wall thermal insulation system with a thin layer finish.
- Ramos, N.M.M., Barreira, E., Simoes, M.L., Delgado, J.M.P.Q., 2013. Probabilistic risk assessment applied to biological growth on external surfaces with ETICS. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*.
- Reinteau, B., 2017. Isolants biosourcés : une offre large et concurrentielle.
- Remache, R.L., 2011. Modélisation des phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux hygroscopiques (Thèse). Université de Constantine.
- Rouchier, S., Foray, G., Wołoszyn, M., Roux, J.J., 2012. Influence of diffuse damage on the water vapour permeability of fibre-reinforced mortar. *Transport in Porous Media* 93.
- Rouni, G., Kirn, M., 2006. Efficient energy thermal insulation façade systems for optimal savings and flexibility in architectural design, in: *International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings*, Milos Island, Greece.
- RSD, 1982. Règlement sanitaire départemental - Titre III : Dispositions particulières applicables aux locaux recevant du public et autres locaux assimilés.
- Šadauskienė, J., Šeduikytė, L., 2014. Moisture accumulation in renovated external walls. *The International Scientific Conference, Innovative Materials, Structures and Technologies*.
- Salonvaara, M., Sedlbauer, K., Holm, A., Pazera, M., 2010. Effect of selected weather year for hygrothermal analyses. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings - 11th International Conference*.
- Salonvarra, M., Karagiozis, A.N., Pazera, M., Miller, W., 2007. Air cavities behind claddings : What have we learned ? *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings 10th International Conference*.
- Schirmer, R., 1938. Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit.
- Sedlbauer, K., 2011. Material specific isopleth-systems as valuable tools for the assessment of the durability of building materials against mould infestation - the, in: *XII DBMC 2011, 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Vol.1.
- Sedlbauer, K., Krus, M., Zillig, W., Kunzel, H.M., 2001. Mold growth prediction by computational simulation. *Fraunhofer Institute for Building Physics*.
- Singh, J., Yu, C.W.F., Kim, J.T., 2010. Building pathology, investigation of sick buildings - Toxic moulds. *Indoor and Built Environment* 19.
- Stazi, F., Vegliò, A., Di Perna, C., Munafò, P., 2013. Experimental comparison between 3 different traditional wall constructions and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies. *Energy and Buildings* 60.

- Steeman, H.-J., T'Joen, C., Van Belleghem, M., Janssens, A., De Paepe, M., 2009. Evaluation of the different definitions of the convective mass transfer coefficient for water evaporation into air. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.
- Steeman, M., Janssens, A., Steeman, H.J., Van Belleghem, M., De Paepe, M., 2010. On coupling 1D non-isothermal heat and mass transfer in porous materials with a multizone building energy simulation model. *Building and Environment* 45.
- Straube, J.F., 2001. The influence of low-permeance vapor barriers on roof and wall performance. *Proceedings of Thermal Performance of Whole Buildings VIII*, Clearwater, FL.
- Straube, J.F., Finch, G., 2009. Ventilated wall claddings: Review, field performance, and hygrothermal modeling. Building Science Corporation, CiteSeer.
- Sulakatko, V., Lill, I., Liisma, E., 2015. Analysis of on-site construction processes for effective External Thermal Insulation Composite System (ETICS) installation. *Procedia Economics and Finance*, 8th Nordic Conference on Construction Economics and Organization 21.
- Sun, J., Fang, L., 2009. Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.
- Suresh Kumar, K., 2000. Pressure equalization of rainscreen walls: a critical review. *Building and Environment* 35.
- Svoboda, Z., Kubr, M., 2011. Numerical simulation of heat transfer through hollow bricks in the vertical direction. *Journal of Building Physics* 34.
- Talukdar, P., Olutmayin, S.O., Osanyintola, O.F., Simonson, C.J., 2007. An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. Part I: Experimental facility and material property data. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50.
- Tran Le, A.D., 2010. Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (Thèse). Université de Reims.
- Tran Le, A.D., Maalouf, C., Mendonça, K.C., Mai, T.H., Wurtz, E., 2009. Study of moisture transfer in a double-layered wall with imperfect thermal and hydraulic contact resistances. *Journal of Building Performance Simulation* 2.
- Turenne, P., 2013. L'isolation thermique par l'extérieur : Les solutions techniques
- Van Belleghem, M., 2013. Modelling coupled heat and moisture transfer between air and porous materials for building applications (Thèse). Ghent University.
- Van Belleghem, M., Steeman, M., Janssens, A., De Paepe, M., 2015. Heat, air and moisture transport modelling in ventilated cavity walls. *Journal of Building Physics* 38.
- Vereecken, E., Roels, S., 2012. Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment* 51.
- Vereecken, E., Saelens, D., Roels, S., 2011. A comparison of different mould prediction models. *Proceedings Building Simulation*.
- Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L., Lähdesmäki, K., 2010. Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. *Journal of Building Physics* 33.
- Vololonirina, O., Coutand, M., Perrin, B., 2014. Characterization of hygrothermal properties of wood-based products – Impact of moisture content and temperature. *Construction and Building Materials* 63.
- Ximenes, S., De Brito, J., Gaspar, P.L., Silva, A., 2015. Modelling the degradation and service life of ETICS in external walls. *Mater Struct* 48.
- Zaknoune, A., Glouannec, P., Salagnac, P., 2013. Identification of the liquid and vapour transport parameters of an ecological building material in its early stages. *Transport in Porous Media* 98.
- Zaknoune, A., Glouannec, P., Salagnac, P., 2012. Estimation of moisture transport coefficients in porous materials using experimental drying kinetics. *Heat Mass Transfer* 48.
- Zheng, R., Janssens, A., Carmeliet, J., Bogaerts, W., Hens, H., 2004. An evaluation of highly insulated cold zinc roofs in a moderate humid region - part I: hygrothermal performance. *Construction and Building Materials* 18.
- Zillig, W., Lenz, K., Sedlbauer, K., Krus, M., 2003. Condensation on façades - Influence of construction type and orientation, in: *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Physics*, Leuven, Belgium.

Annexes

Annexe A : Qualification des ambiances intérieure et extérieure

Cette annexe présente différents essais qui ont été menés dans les chambres climatiques, principalement extérieure, dans le but de les qualifier.

Mesure des conditions d'ambiance

Les températures et humidités relatives de l'air sont mesurées au centre de chaque chambre à l'aide de capteurs d'humidité de type *Sensirion SHT75* ($\Delta T = \pm 0.5^\circ\text{C}$; $\Delta \text{HR} = \pm 5\%$) et *Rotronic HC2S* ($\Delta T = \pm 0.15^\circ\text{C}$; $\Delta \text{HR} = \pm 2\%$). La différence principale entre ces deux capteurs tient dans l'encapsulation de la tête de mesure du capteur *Rotronic*.

La Figure A-1 présente une comparaison entre les deux capteurs lors d'une séquence de mesure. Globalement, les ordres de grandeur et les dynamiques des deux sondes sont similaires. Toutefois, les sondes *Rotronic* surévaluent la température de 0.75°C et sous-évaluent l'humidité relative de 5% vis-à-vis des sondes *Sensirion*, et ceci, quelles que soient les conditions des chambres intérieure et extérieure. Cependant, les niveaux de pression de vapeur sont rigoureusement identiques. De fait, les écarts observés entre ces capteurs d'humidité relèvent plus d'un problème d'étalonnage de la chaîne de mesure (incluant le capteur, la transmission, l'acquisition et le traitement de la donnée).

Dans tout le manuscrit, les relevés des capteurs *Sensirion* sont utilisés, tout en sachant qu'il faut y associer une incertitude de mesure.

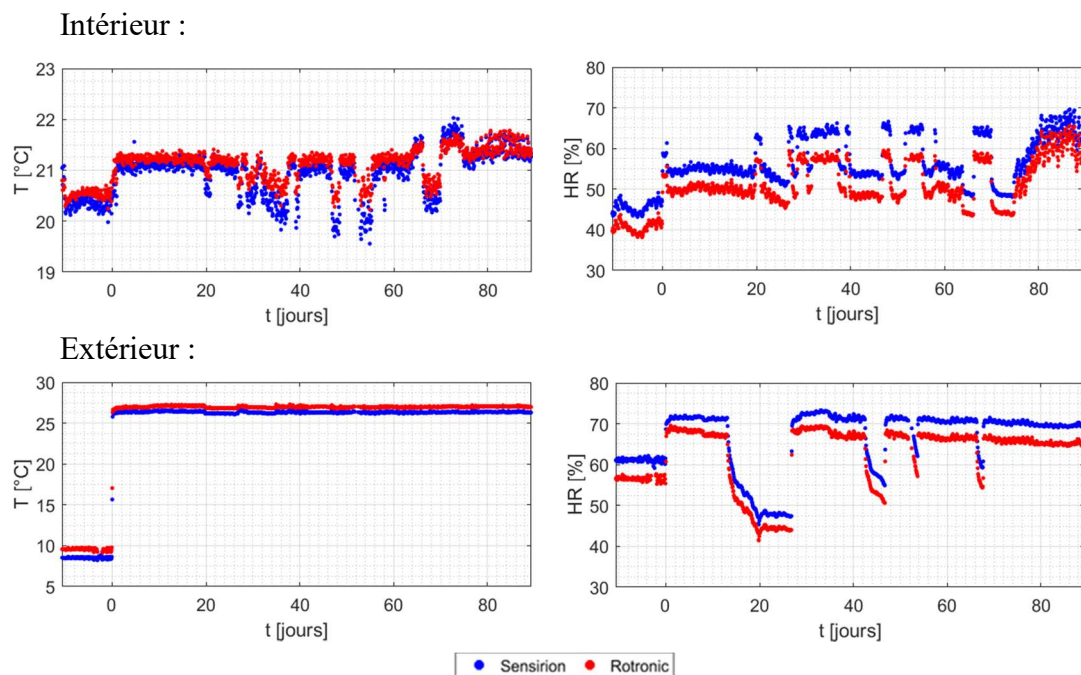


Figure A-1 : Mesures des sondes *Sensirion* et *Rotronic* dans les chambres intérieure et extérieure.

Comportement aéraulique dans l'enceinte extérieure

Cette première séquence vise à appréhender le comportement aéraulique de l'enceinte extérieure et ses conséquences. Pour cela, des mesures de vitesses sont réalisées successivement en sortie de groupe froid et à proximité de la paroi à l'aide d'un anémomètre bidirectionnel (TSI 8385). Le pas de temps d'acquisition des vitesses est fixé à 2 secondes, celui des capteurs d'humidité à 30 secondes.

L'essai est réalisé pour des consignes de température et d'humidité relative de 7°C et 50% respectivement. Les données mesurées au centre de la chambre sont tracées sur la Figure A-2 et confrontées aux mesures de vitesses en sortie de groupe froid. Lorsque le groupe froid de la chambre extérieure s'enclenche, ses ventilateurs s'activent pour forcer le refroidissement de l'air au contact de l'évaporateur : des vitesses de 0.65 ± 0.05 m/s sont relevées. Ici, les ventilateurs sont activés pendant 4 à 4.5 minutes sur une période d'environ 15 minutes (taux d'activation de 30%). La température mesurée au centre de la chambre diminue de 2°C, l'humidité relative augmente de 5%. En revanche, du fait d'une position différente du capteur d'humidité par rapport à la sonde de régulation, les niveaux de température et d'humidité relative sont différents de ceux imposés. Ici, la température oscille entre 8 et 10°C et l'humidité relative entre 52 et 58%.

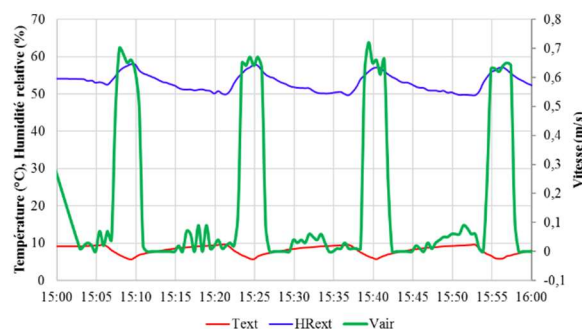


Figure A-2 : Mesures de la vitesse d'air en sortie de groupe froid et de la température et de l'humidité relative au centre de l'enceinte extérieure.

Dans un second temps, des mesures ont été effectuées à proximité des parois PSE et Biosourcée. Les résultats sont présentés sur la Figure A-3. On retrouve le déclenchement intermittent du groupe froid. En revanche, les vitesses maximales mesurées n'excèdent pas 0.07 m.s^{-1} , soit 10 fois moins que celles en sortie de groupe froid. Le brassage de l'air est alors plus faible et les températures présentent des variations plus lentes, mais également plus amples ($\Delta T = 5^\circ\text{C}$). Enfin, les deux mesures à proximité des deux parois sont légèrement différentes : d'une part, les deux mesures étaient séparées de quelques jours et, de fait, les conditions ne sont pas rigoureusement identiques ; d'autre part, leur position par rapport au groupe froid est importante. Au final, la Figure A-4 propose une schématisation succincte de l'écoulement dans la chambre extérieure par rapport au groupe froid.

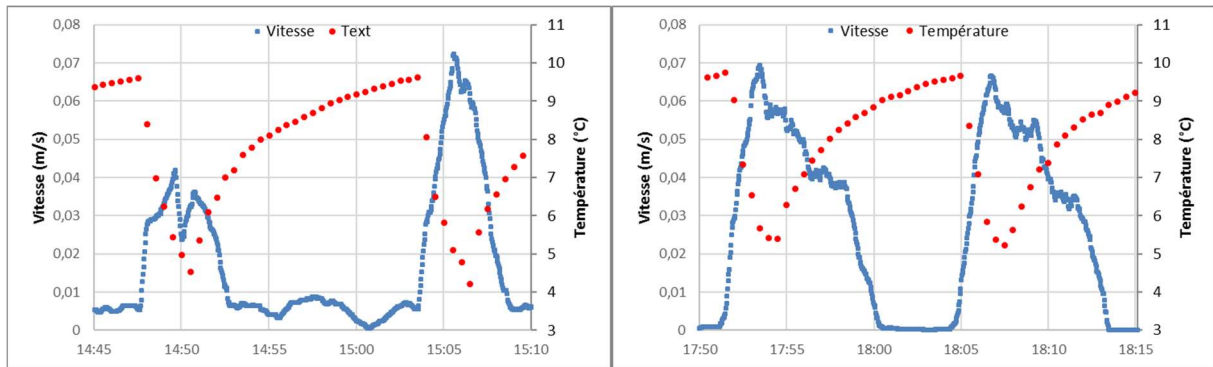


Figure A-3 : Vitesse et température mesurées à proximité des parois PSE et Biosourcée.

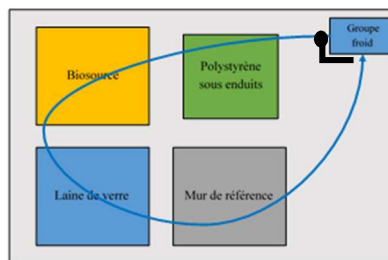


Figure A-4 : Schématisation de l'écoulement dans la chambre extérieure.

Comportement thermohydrique dans l'enceinte extérieure

Une qualification des champs de température et d'humidité relative a été effectuée dans l'enceinte extérieure. Pour cela, quatre capteurs d'humidité de type *Sensirion SHT75* ont été positionnés à 20cm des surfaces extérieures de chaque système. Une schématisation du dispositif est proposée sur la Figure A-5.

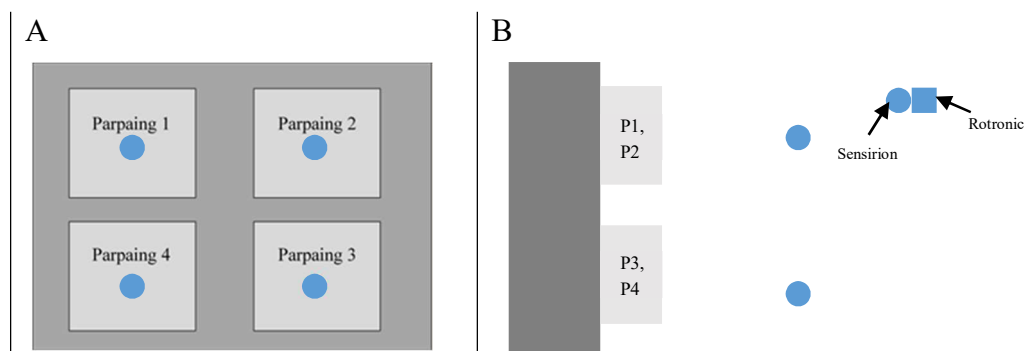


Figure A-5 : Localisation de l'instrumentation pour la qualification thermohydrique de la chambre extérieure.

L'essai est réalisé pour des consignes de température et d'humidité relative de 7°C et 50% respectivement. Les températures, humidités relatives et pressions de vapeur mesurées à chacune des positions sont comparées aux mesures au centre de la chambre extérieure sur la Figure A-6. Tous les signaux présentent des comportements sinusoïdaux et sont en phase. Si les pressions de vapeur sont globalement homogènes, les températures et d'humidité relative sont variables et présentent un comportement différent du centre de la chambre. Par ailleurs,

des amplitudes plus fortes sont notées en bas de la chambre, alors qu'aucune corrélation n'est à identifier concernant les valeurs moyennes.

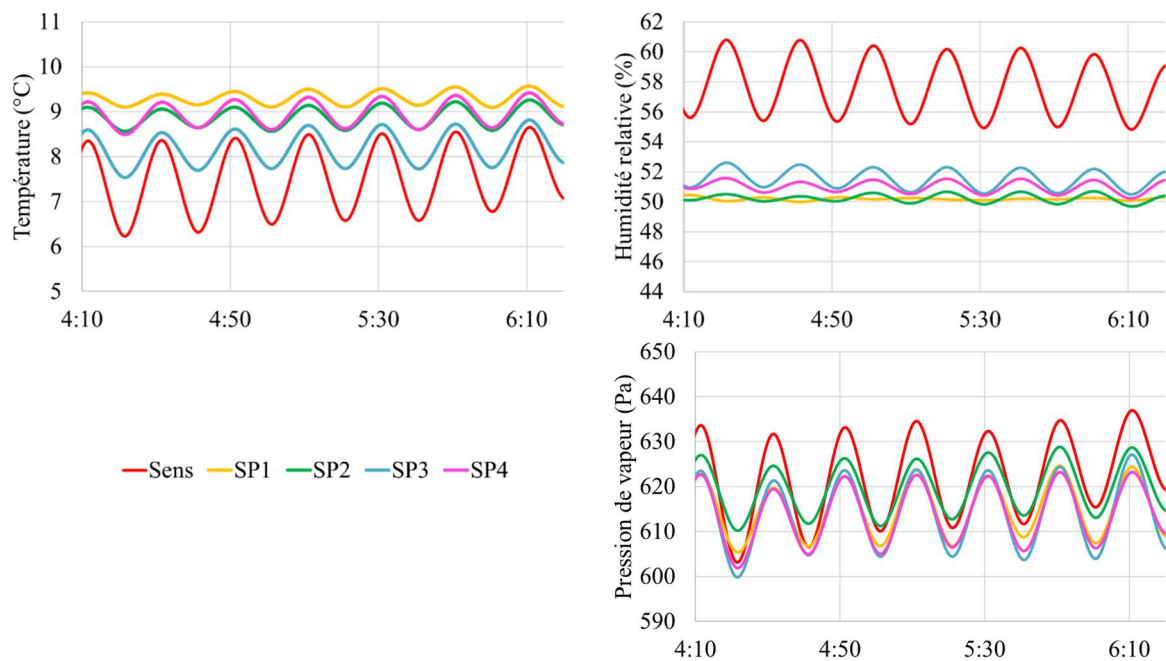


Figure A-6 : Températures, humidités relatives et pression de vapeur mesurées au centre de l'enceinte et face aux systèmes d'ITE.

Annexe B : Paroi parpaing - influence du coefficient d'échange par convection

La Figure B-1 présente l'étude de sensibilité effectuée sur le coefficient d'échange par convection. Lorsque celui-ci est doublé (i.e. $h_{cv,ext}=10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), on constate que les niveaux initiaux et finaux (0 et 90 jours respectivement) sont plus en accord avec l'expérience. Cependant, aucune amélioration significative n'est observée sur la dynamique de l'humidité relative calculée dans les alvéoles de parpaing.

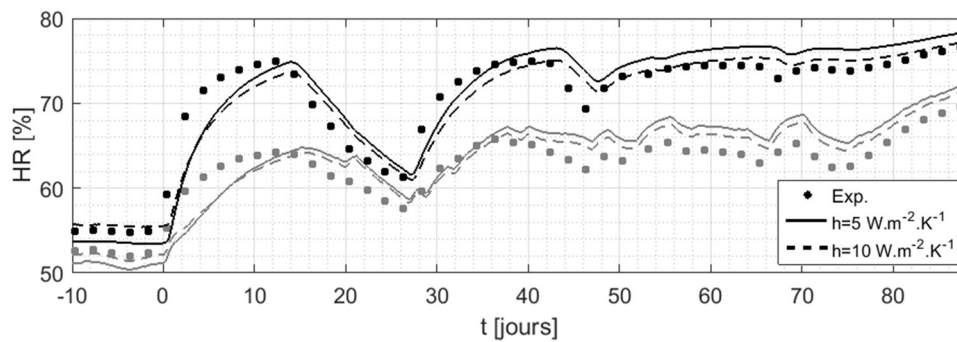


Figure B-1 : Influence du coefficient d'échange par convection.

Par ailleurs, une estimation du coefficient d'échange est présentée sur la Figure B-2. Celle-ci est effectuée à partir des corrélations présentées par Huetz (Huetz and Petit, 1990). Il apparaît que le coefficient est déjà surestimé dans les simulations.

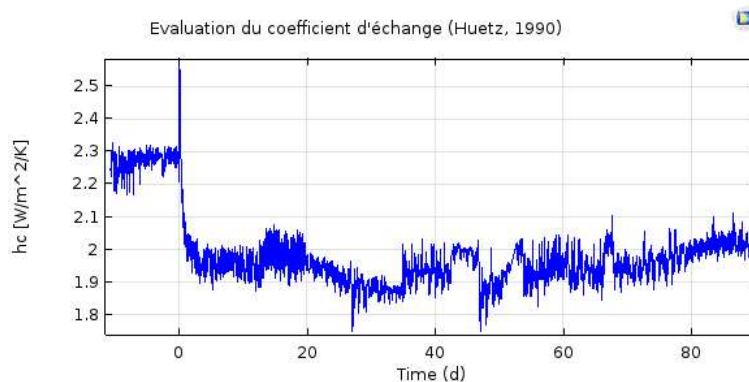


Figure B-2 : Evaluation du coefficient d'échange (simulation saine)

Annexe C : Paroi parpaing - champs de température et d'humidité relative

La Figure C-1 présente les champs de température et d'humidité relative initiaux dans la Paroi Parpaing pour la simulation saine. Cette figure met en évidence plusieurs constats :

- Les humidités relatives et dans une moindre mesure les températures, ne sont pas homogènes sur un même axe x ;
- Le flux de chaleur est favorisé dans la partie solide du parpaing ;
- Le flux d'humidité est favorisé au travers des alvéoles du parpaing.

Par ailleurs, dans le parpaing, les températures minimales et maximales sont localisées en surfaces intérieure et extérieure. A l'inverse, les humidités relatives les plus importantes sont localisées sur les surfaces internes de la cavité.

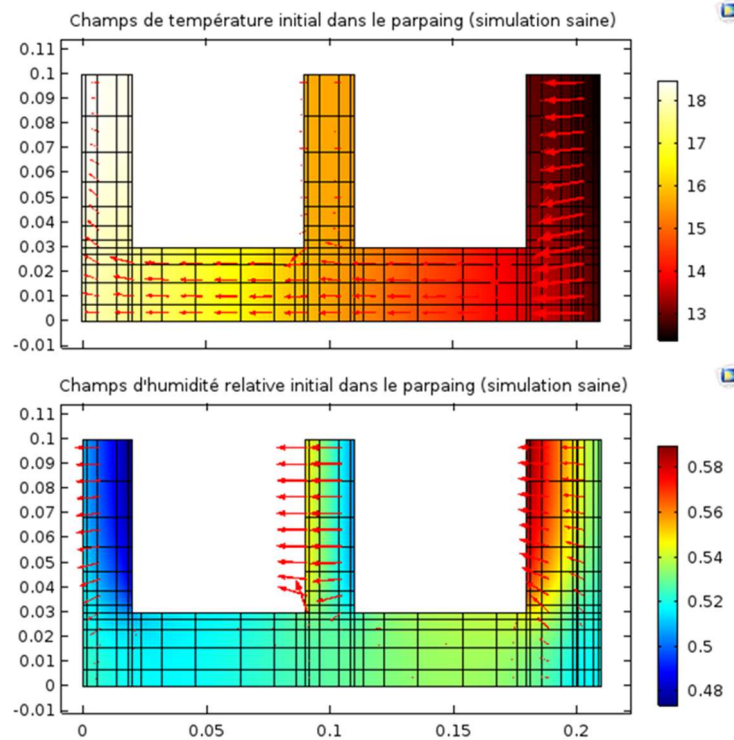


Figure C-1 : Champs de température et d'humidité relative initiaux dans le parpaing (simulation saine).

Annexe D : Paroi parpaing - comparaison des flux de chaleur

La Figure D-1 présente les densités de flux de chaleur mesurées et calculées ainsi que l'évolution d'humidité relative calculée en surface d'enduit (côté extérieur). On constate que la déviation du flux de chaleur peut être corrélée à un état de saturation maintenu au-delà du 7^{ème} jour en surface d'enduit. Ces résultats sont obtenus sans modification des propriétés du parpaing et de l'enduit.

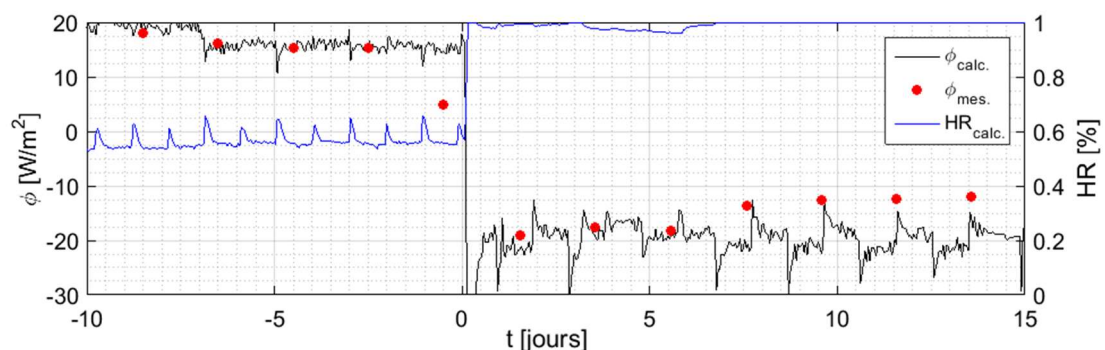


Figure D-1 : Comparaison des densités de flux de chaleur mesurée et calculée à l'humidité relative calculée en surface d'enduit.

Annexe E : Analyse et validation des données météorologiques recueillies *in situ*

Analyse de la donnée météorologique

La distribution cumulée des écarts entre la valeur moyenne et les extrema de température, de puissance solaire et de vent est présentée respectivement sur les Figure E-1 et Figure E-2. On constate que 95% des écarts sont inférieurs à la précision de $0,5^{\circ}\text{C}$ indiquée par le constructeur, soulignant la faible variation de la température sur une période d'acquisition. De même, 5% des écarts sur la puissance solaire sont supérieurs à 5% et peuvent être dû à une alternance de nuage et d'éclaircies. Enfin, la distribution cumulée du vent est plus étendue, indiquant une plus forte variabilité de ce paramètre sur une période d'acquisition. Cela est d'autant plus vrai pour une ville côtière où la dynamique des masses d'air entre le continent et l'océan est complexe.

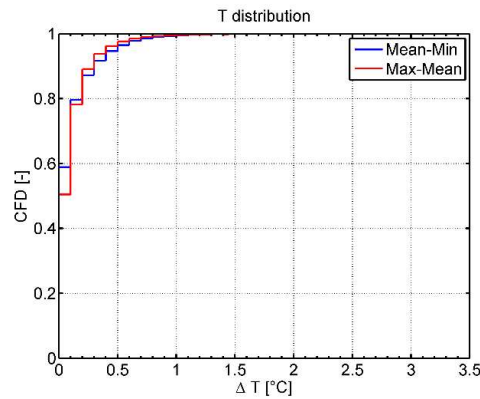


Figure E-1 : Distribution cumulée des écarts entre la température moyenne et les températures minimales et maximales sur une période d'acquisition.

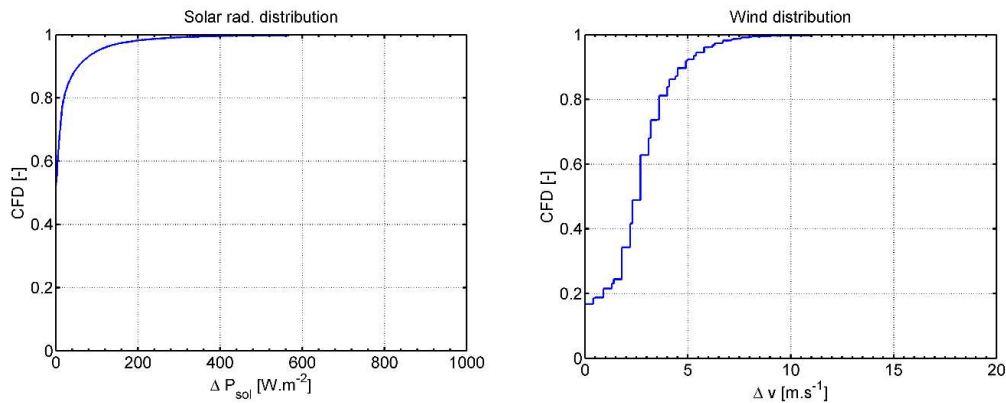


Figure E-2 : Distribution cumulée des écarts entre la moyenne et le maximum des puissances solaires et des vitesses de vent sur une période d'acquisition.

Comparaison de la donnée météo avec une station proche

Les données météo mesurées sur le site du lycée sont comparées à celles obtenues par un équipement identique localisé sur le toit du bâtiment « Science 1 » de l'Université de Bretagne Sud. Les deux stations sont distantes de moins d'un kilomètre. La comparaison est effectuée sur une période de 6 mois allant de novembre 2015 à mai 2016. Ici, la confrontation porte sur les mesures de température, d'humidité relative, de pression de vapeur et d'éclairement solaire (cf. Figure E-3 à Figure E-6). En revanche, compte tenu du caractère très local du vent, ce dernier n'est pas traité.

Quelle que soit la grandeur, on observe d'une part des évolutions semblables entre les deux stations météo et d'autre part une forme gaussienne centrée sur 0 de la distribution de leurs écarts. Par ailleurs, les écarts maxima observés restent majoritairement en deçà de l'incertitude des capteurs.

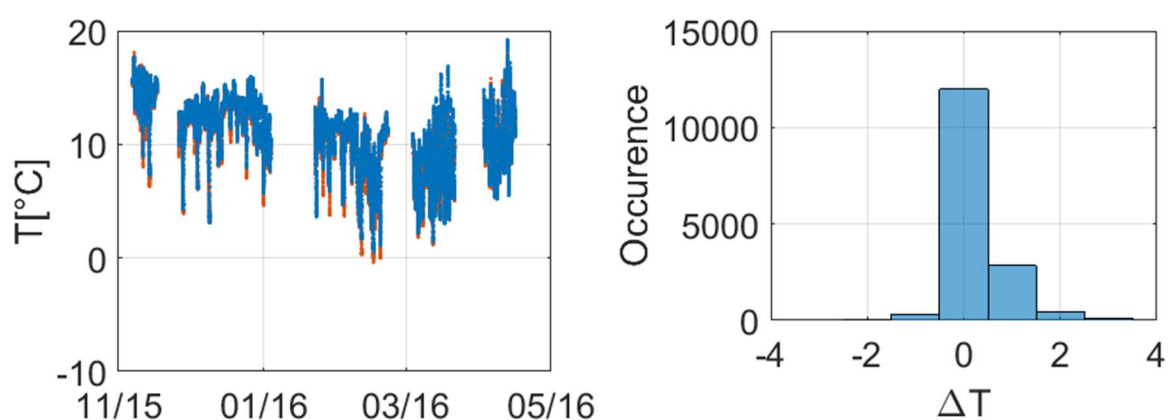


Figure E-3 : Comparaison des évolutions de température (gauche) et distribution des écarts (droite).

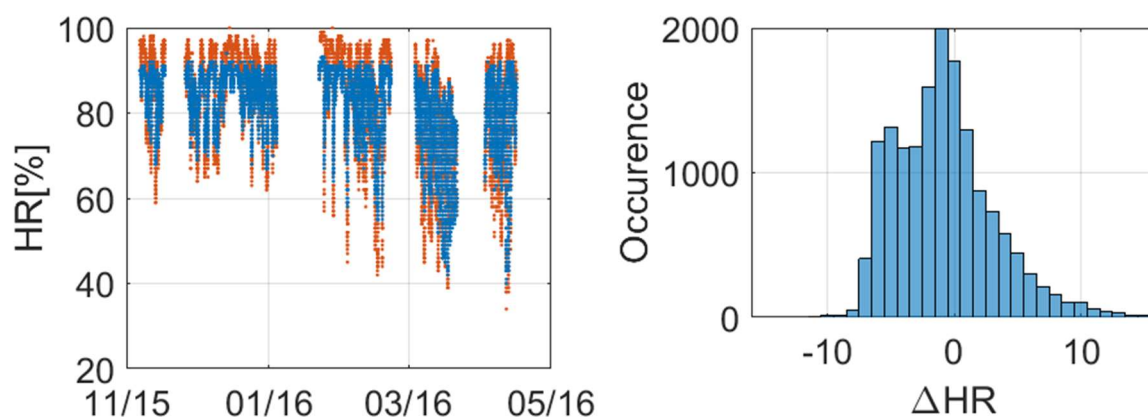


Figure E-4 : Comparaison des évolutions d'humidité relative et distribution des écarts.

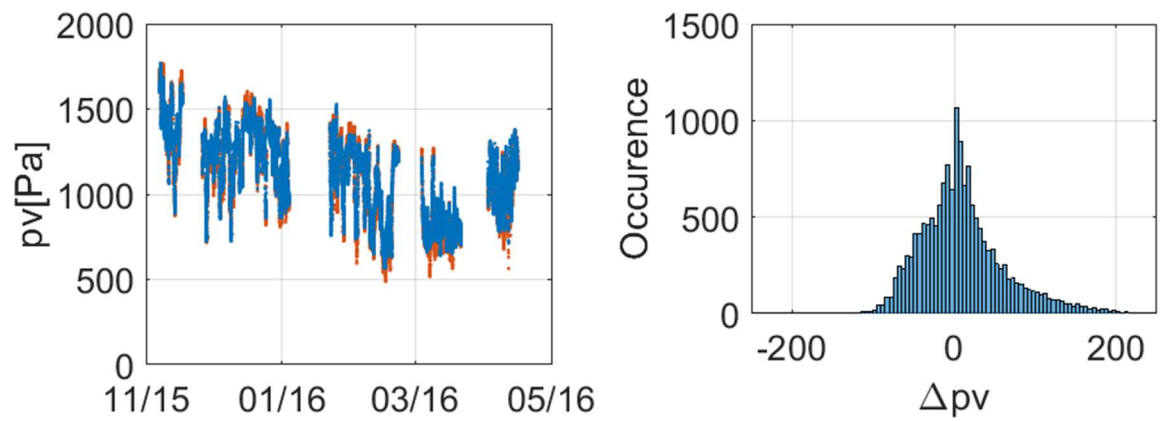


Figure E-5 : Comparaison des évolutions de pression de vapeur et distribution des écarts.

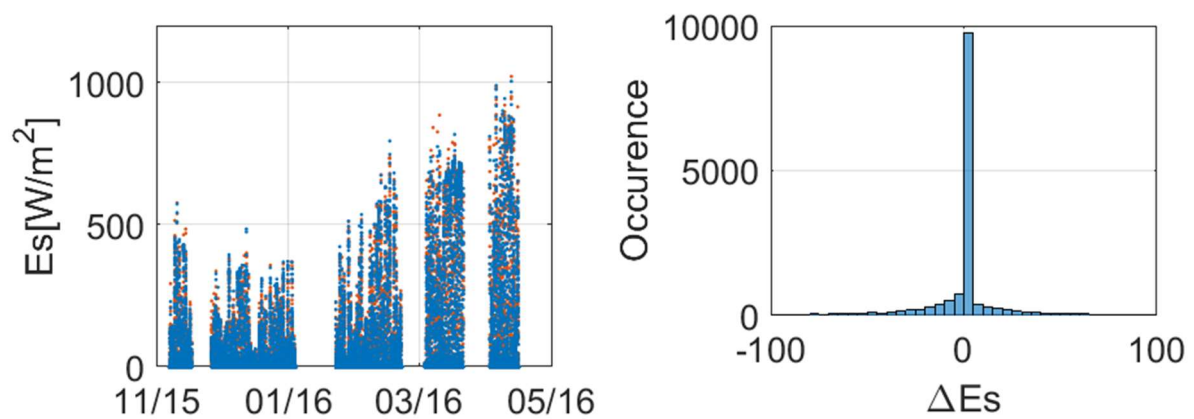


Figure E-6 : Comparaison des évolutions d'éclairement solaire et distribution des écarts.

Systemes d'Isolation Thermique par l'Extérieur : Études Expérimentales et Numériques des Transferts de Chaleur et d'Humidité

Résumé Français :

L'isolation thermique par l'extérieure (ITE) constitue une solution intéressante pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments. Elle permet de minimiser les échanges de chaleur en éliminant les ponts thermiques tout en préservant la surface habitable. Toutefois, la pose de tels systèmes modifie le comportement hygrothermique des parois ce qui peut induire des problèmes de durabilité dus à la condensation. Dans ce contexte, des expérimentations ont été réalisées en enceinte biclimatique pour étudier le comportement hygrothermique de trois systèmes d'ITE rapportés sur une paroi en parpaing : un système PSE sous enduit (voie humide) et deux systèmes sous bardage (voie sèche). En parallèle, des modèles numériques ont été développés pour la prédiction des transferts de chaleur et d'humidités au sein de ces systèmes. Les expériences réalisées avec le suivi des températures et des humidités, combinées aux simulations numériques, ont permis d'appréhender le comportement hygrothermique des solutions d'ITE à différents stades : lors de la pose, en usage « normal » et dans des conditions conduisant à des risques de condensation. Les résultats du système PSE sous enduit montrent le rôle important de la colle et la difficulté d'appréhender numériquement son comportement. Les résultats des systèmes sous bardage soulignent l'intérêt d'utiliser des matériaux biosourcés dans des conditions à risques, mais également la sensibilité des simulations numériques aux propriétés hydriques. Pour conforter ces travaux, le suivi *in situ* d'un bâtiment après rénovation thermique a également été réalisé. L'analyse des mesures a souligné l'absence de risques majeurs liés à l'humidité durant les deux années étudiées. Par ailleurs, la comparaison simulation/expérience a mis en évidence le rôle important joué par la lame d'air ventilée.

Mots clefs : Isolation, Bâtiment, Transfert de chaleur et d'humidité, Matériaux hygroscopiques, Instrumentation, Caractérisation, Simulation numérique, Enceinte biclimatique, Etude *in situ*.

English Abstract :

External thermal insulation (ETI) is an interesting technical solution for improving the energy performance of the building sector. It minimizes heat exchange by eliminating thermal bridging while preserving the living space. However, ETI may change the hygrothermal balance of the envelope which can lead to problems of durability due to condensation. In this context, experiments have been carried out in a bi-climatic enclosure to study the hygrothermal behavior of three ITE systems reported on a hollow concrete block wall: an ETICS system (wet process) and two systems under cladding (dry process). Numerical models have also been developed for dynamic prediction of heat and moisture transfer within these systems.

Experiments with temperature and humidity monitoring combined with numerical simulations, made it possible to apprehend the hygrothermal behavior of the tested solutions at different stages: during the installation of ETI solutions, in "normal" use and under conditions leading to risks of condensation. The results of the ETICS system show the important role of the glue and the difficulty to understand numerically its behavior. The results of the cladding systems underline the interest of using bio-based materials under hazardous conditions, but also the sensitivity of numerical simulations to the hydric properties of hygroscopic materials. A second study on the *in situ* analysis of a cladding ETI system highlighted the absence of major risks related to humidity during the two years studied. In addition, the simulation / experiment comparison highlighted the important role played by the ventilated air.

Key words: Insulation, Building, Heat and Moisture transfer, Hygroscopic materials, Instrumentation, Characterization, Simulation, Bi-climatic chamber, *In situ* study.