



**HAL**  
open science

# Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l'humidité

Mohammed Yacine Ferroukhi

► **To cite this version:**

Mohammed Yacine Ferroukhi. Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l'humidité. Génie civil. Université de La Rochelle; École Royale Militaire (Bruxelles), 2015. Français. NNT : 2015LAROS027 . tel-01373447

**HAL Id: tel-01373447**

**<https://theses.hal.science/tel-01373447>**

Submitted on 28 Sep 2016

**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.



UNIVERSITE DE LA ROCHELLE  
École Doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique,  
Énergétique et Aéronautique (SI-MMEA)  
Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE)



ÉCOLE ROYALE MILITAIRE DE BRUXELLES  
Département de Mécanique

## THÈSE

présentée par

MOHAMMED YACINE FERROUKHI

pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de La Rochelle  
et de l'École Royale Militaire de Bruxelles  
Discipline : Génie Civil

---

# Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : Evaluation des désordres causés par l'humidité

---

Soutenue le 01/12/2015

### Jury :

E. ANTCZAK	Professeur, Université d'Artois,	Rapporteur
M. EL GANAOUI	Professeur, Université de Lorraine,	Rapporteur
R. BENNACER	Professeur, Ecole Normale Supérieure de Cachan,	Examineur
G-V. FRACASTORO	Professeur, École Polytechnique de Turin,	Examineur
K. LIMAM	Maitre de conférences, Université de La Rochelle,	Directeur de thèse
R. Belarbi	Professeur, Université de La Rochelle	Co-directeur de thèse
W. BOSSCHAERTS	Professeur, École Royale Militaire de Bruxelles,	Co-directeur de thèse



# Abstract

The present PhD thesis work is conducted in the framework of the National Program ANR HUMIBATex Project « How to predict the disorders caused by moisture? What technical solutions to renovate the existing buildings? ». It deals with the numerical and experimental modeling of a coupled heat, air and moisture transfers at different scales: material, envelope and building ambience.

In the theoretical part, based on expression of heat and moisture (vapor, liquid and air) balances equations, a phenomenological model describing the coupled heat, air and moisture transfer (HAM) through the wall has been developed. After validation stage (comparison with experimental results and analytical solution), the model has been implemented with confidence in a building energy simulation code (BES). Using this HAM-BES dynamic co-simulation tool, the hygrothermal behavior of the wall and indoor air of buildings were predicted finely. Two cases studies have been undertaken. The aim of the first one was to highlight the impact of hydrothermal transfers on the prediction of building energy consumption. However, the second case study was devoted to study efficiency of different ventilation strategies (extracting or insufflation) on the control and reduction of disorders caused by moisture in residential buildings.

In the experimental part, a characterization campaign of physical, hydric and thermophysical properties of construction materials has been carried out. This experimental campaign has been focused on analyzing of the impact of thermal and hydric state of the construction material on the hygrothermal properties values. In another work, several experimental devices, at small-scale and wall scale, were designed in the laboratory to study the hygrothermal response of different building envelopes configuration and validate the developed HAM-BES dynamic co-simulation platform. Results of confrontation have showed good agreement between the numerical solution and experimental measurements.

The obtained results in the framework of this PhD thesis have highlighted the influence of a detailed modeling of coupled heat air and moisture transfer through the wall on the hygrothermal behavior prediction of the indoor air, on assessment of pathology indicators and on the evaluation of the buildings energy loads.

**Keywords:** Humidity, Hygrothermal transfer, HAM-BES co-simulation, Numerical and experimental modeling, hydric and thermophysical properties.



# Remerciement

A l'issue de la rédaction de cette thèse, je suis convaincue que ce travail est loin d'être accompli dans la solitude. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifesté à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de « l'apprenti-chercheur ».

En premier lieu, j'adresse mes sincères remerciements à M. A. AIT-MOKHTAR, directeur du LaSIE pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire. Je remercie également l'Agence Nationale de la Recherche pour avoir financé ce travail de thèse.

Cette thèse a été réalisée en Cotutelle avec l'Ecole Royale Militaire (ERM) de Bruxelles, je remercie M. W. BOSSCHAERTS, directeur du département de mécanique à l'UMR pour son accueil chaleureux, sa gentillesse ainsi que pour son implication et sa disponibilité dans l'encadrement de ce travail.

J'adresse mes remerciements M. E. ANTCZAK, Professeur à l'Université d'Artois et M. E. EL GANAOU, Professeur à l'Université de Lorraine pour avoir accepté de rapporter et d'évaluer mon travail. Je tiens à remercier M. R. BENNACER, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan d'avoir accepté d'être président de jury. Je remercie également M. G-V. FRACASTORO, Professeur à l'Ecole Polytechnique de Turin pour avoir accepté d'examiner et de juger mon travail.

Je tiens à remercier très chaleureusement M. K. LIMAM pour m'avoir encadré, encouragé tout au long de ces trois années thèse. Il a toujours été disponible, à l'écoute tout en mettant à ma disposition les moyens nécessaires pour la réussite de cette thèse.

J'exprime toute ma gratitude à M. R. BELABI, pour l'excellence de son encadrement scientifique, son soutien au quotidien ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail de thèse. Ses conseils, ses qualités scientifiques et humaines mon permis de grandir tant sur le plan professionnel que personnel. Pour tout cela Merci.

Je souhaite remercier tout le personnel technique et administratif du laboratoire LaSIE, du département de Génie Civil de l'université de La Rochelle et du département de mécanique de l'Ecole Royale Militaire de Bruxelles. Un intérêt particulier à Mme A. NOUVIERE pour sa collaboration et sa disponibilité. Son aide, ses remarques m'ont été d'une aide précieuse dans la réalisation de la partie expérimentale de mon travail.

Je remercie tous mes collègues et thésards du LaSIE avec qui j'ai partagé des moments conviviaux durant ces trois années de thèse. Une pensée particulière à mes amis N. Issaadi, R. Cherif, M. Oulghelou, M. Benamour, R. Djedjig et A. Hamami.

J'exprime ma plus grande gratitude à mon père ainsi qu'à toute ma famille qui m'a toujours soutenu, aidé et encouragé lors de la réalisation de ce projet.

Enfin, un seul et dernier mot pour ma femme, celle qui a partagé mes doutes, mes joies, mes humeurs, celle qui m'a toujours soutenu, encouragé et compris tout au long de ces années de thèse : Merci.



# Résumé

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre du projet ANR HUMIBATex « Comment prédire les désordres causés par l'humidité ? Quelles solutions techniques pour rénover le bâti existant? » (2012-2016). Elle traite de la modélisation numérique et expérimentale des transferts couplés hydro-thermo-aérauliques à différentes échelles : matériau, paroi et ambiance de bâtiment.

Sur le plan théorique, un modèle phénoménologique des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à travers les enveloppes de bâtiments (HAM) a été élaboré. Après la phase de validation (confrontation avec des solutions analytiques et des résultats expérimentaux), ce modèle a été implémenté avec confiance dans un code de simulation thermique dynamique du bâtiment (BES). Ceci a permis, ainsi, de développer une plateforme de co-simulation HAM-BES. Grâce à l'outil mis en œuvre, les comportements hygrothermiques de la paroi et de l'ambiance habitable des bâtiments ont été prédits finement. Deux cas d'études ont été entrepris. Le premier avait pour but de mettre en évidence l'impact des transferts hygrothermiques sur la prédiction des consommations énergétiques. Le deuxième cas d'étude a été dédié à l'étude de l'efficacité de différentes stratégies de ventilation (extraction ou insufflation) sur le contrôle et la diminution des risques d'apparition de désordres liés à l'humidité au niveau des bâtiments résidentiels.

Sur le plan expérimental, une campagne de caractérisation des propriétés physiques, hydriques et thermophysiques des matériaux de construction a été effectuée. Cette campagne expérimentale s'est focalisée sur l'analyse de l'impact de l'état thermique et hydrique du matériau sur les valeurs des propriétés hygrothermique. Dans un autre travail expérimental, des dispositifs expérimentaux, à petite échelle mais également à l'échelle de la paroi, ont été conçus au laboratoire dans le but d'étudier la réponse hygrothermique des enveloppes de bâtiment ainsi que valider la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES. La confrontation des résultats a montré une bonne concordance entre la résolution numérique et les mesures expérimentales.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de thèse ont mis en exergue l'influence d'une modélisation fine des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité, à la fois sur la prédiction du comportement hygrothermique des ambiances habitables mais aussi sur le calcul des besoins énergétiques des bâtiments.

**Mots clés :** Humidité, Transfert hygrothermique, Plateforme de co-simulation HAM-BES, Modélisation numérique et expérimentale, Propriétés hydriques et thermophysiques.



# Table des matières

Abstract .....	3
Remerciement.....	5
Résumé.....	7
Table des matières.....	9
Table des illustrations.....	13
Liste des Tableaux.....	17
Nomenclature .....	19
Introduction Générale.....	23
Chapitre I. Etat de l’art sur les transferts hygrothermiques dans les bâtiments.....	29
I.1 Introduction .....	29
I.2 Désordres causés par l’humidité dans le bâtiment.....	30
I.2.1 Pathologies au niveau de l’ambiance habitable.....	31
I.2.2 Pathologies structurelles causées par l’humidité .....	34
I.2.3 Indicateurs de durabilité : pathologies liées à l’humidité .....	45
I.3 Mécanismes des transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux .....	47
I.3.1 Milieux poreux .....	47
I.3.2 Transfert et stockage d’humidité dans les milieux poreux .....	49
I.3.3 Transfert et stockage de chaleur dans les milieux poreux .....	57
I.3.4 Effet du couplage entre les transferts de chaleur et de masse.....	57
I.4 Modélisation des transferts couplés de chaleur, d’air et d’humidité dans les parois multicouches de bâtiments .....	58
I.4.1 Différentes approches de la modélisation des transferts hygrothermiques dans les parois de bâtiment .....	59
I.5 Interaction des transferts hygrothermiques dans l’enveloppe et l’ambiance habitable du bâtiment.....	69
I.6 Conclusion.....	73

Chapitre II. Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments	75
II.1	Introduction ..... 75
II.2	Modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments 76
II.2.1	Hypothèses du modèle..... 76
II.2.2	Equations gouvernantes des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité ..... 77
II.2.3	Interaction enveloppe - ambiance : Conditions initiales et aux limites ..... 82
II.3	Modélisation numérique..... 84
II.3.1	Comparaison avec des solutions analytiques..... 84
II.3.2	Confrontation expérimentale à petite échelle ..... 87
II.4	Sensibilité du modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité vis-à-vis de la variation des propriétés hygrothermiques des matériaux ..... 95
II.4.1	Démarche de l'analyse de sensibilité..... 96
II.4.2	Cas d'une paroi multicouche ..... 96
II.4.3	Analyse des résultats ..... 98
II.5	Conclusion..... 102
Chapitre III. Caractérisation expérimentale des matériaux de construction : Propriétés physiques et hygrothermiques.....	103
III.1	Introduction ..... 103
III.2	Matériaux étudiés ..... 104
III.3	Propriétés physiques..... 105
III.3.1	Porosité par intrusion de mercure..... 105
III.3.2	Principe de l'essai..... 105
III.3.3	Résultats et analyse..... 106
III.4	Propriétés du transfert hydrique ..... 107
III.4.1	Perméabilité à la vapeur d'eau ..... 107
III.4.2	Isotherme d'adsorption et de désorption d'eau..... 113
III.4.3	Evaluation de la capacité de stockage d'humidité..... 122
III.4.4	Courbe de rétention d'eau isotherme..... 124
III.5	Propriétés du transfert thermique ..... 128
III.5.1	Conductivité thermique ..... 128
III.5.2	Résultats et analyse..... 129
III.5.3	Chaleur spécifique..... 131
III.5.4	Dispositif expérimental et mode opératoire..... 131
III.5.5	Résultats et analyse..... 133
III.6	Conclusion..... 133

Chapitre IV. Modélisation du comportement hygrothermique des enveloppes hygroscopiques dans les bâtiments multizones : Approche de co-simulation dynamique .....	135
IV.1 Introduction .....	135
IV.2 Intégration du modèle de paroi des transferts « HAM » dans un code de simulation dynamique de bâtiment : plateforme de co-simulation HAM-BES .....	137
IV.2.1 Choix des outils de modélisation.....	137
IV.2.2 Mise en œuvre de la co-simulation dynamique HAM-BES .....	138
IV.2.3 Validation de la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES .....	140
IV.3 Validation expérimentale de la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES .....	147
IV.3.1 Description du dispositif expérimental.....	148
IV.3.2 Essais réalisés .....	151
IV.4 Effet de l'interaction dynamique enveloppe-ambiance sur le comportement hygrothermique et énergétique des bâtiments.....	161
IV.4.1 Présentation du cas d'étude .....	161
IV.5 Etude numérique comparative sur la performance des stratégies de ventilation : Indicateurs de pathologies liés à l'humidité.....	176
IV.5.1 Présentation du cas d'étude .....	176
IV.5.2 Modélisation thermo-hydro-aéraulique .....	180
IV.5.3 Indicateurs de pathologies liés à l'humidité .....	185
IV.6 Conclusion.....	195
Conclusions générales et perspectives.....	199
Références bibliographiques .....	205



# Table des illustrations

FIGURE I.1 : PLAGES D'HUMIDITE FAVORABLE A LA CROISSANCE DE POLLUANTS (ROULET, 2004).....	32
FIGURE I.2: EXEMPLES DE DEGRADATIONS CAUSEES PAR L'HUMIDITE (ZHONG AND BRAUN, 2008).....	34
FIGURE I.3: ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE EFFECTUES SUR DES ECHANTILLONS DE BETON DE DIFFERENTS DEGRES DE SATURATION (SR) (VU, 2007).....	35
FIGURE I.4: (A) RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU DU BOIS, (B) RESISTANCE A LA TRACTION EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU DU BOIS (ABBASI ET AL., 2006).....	36
FIGURE I.5: VARIATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU : BRIQUES (A GAUCHE) (MEUKAM, 2004) ET LAINES MINERALES (A DROITE) (JERMAN AND ČERNÝ, 2012).....	37
FIGURE I.6: PHENOMENE DE GEL D'EAU DANS UN PORE (VALENZA AND SCHERER, 2007).....	38
FIGURE I.7: SCHEMATISATION DE LA CRISTALLISATION DANS UN PORE (VERAN-TISSOIRES, 2011).....	39
FIGURE I.8: PROCESSUS DE CRISTALLISATION DES SELS (BERGER, 2014).....	40
FIGURE I.9: REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN MILIEU POREUX.....	47
FIGURE I.10: ILLUSTRATION SCHEMATIQUE DE LA TORTUOSITE.....	48
FIGURE I.11: ILLUSTRATION DES MODES DE DIFFUSION DE LA VAPEUR D'EAU DANS UN PORE.....	50
FIGURE I.12 : COURBE D'ISOTHERME D'ADSORPTION ET DE DESORPTION DE LA BRIQUE ROUGE A 20°C.....	52
FIGURE I.13: CLASSIFICATION DES ISOTHERMES D'ADSORPTION PHYSIQUE DONNEE PAR (IUPAC, 1994).....	52
FIGURE I.14: ADSORPTION ET DESORPTION DANS UN PORE CYLINDRIQUE (BELLINI, 1992).....	54
FIGURE I.15: ILLUSTRATION DE L'EFFET BOUTEILLE D'ENCRE LORS DE L'ADSORPTION ET DESORPTION D'EAU AU NIVEAU D'UN PORE (BELLINI, 1992).....	54
FIGURE I.16: CLASSIFICATION DES FORMES D'HYSTERESIS PROPOSEE PAR IUPAC (IUPAC, 1994).....	55
FIGURE I.17: CAPILLARITE DANS LE MILIEU POREUX (DAÏAN, 2013).....	55
FIGURE I.18: HOMOGENEISATION PAR PRISE DE MOYENNE VOLUMIQUE (ABAHRI, 2012).....	60
FIGURE I.19: MICROSTRUCTURE CONSTITUEE DE LA REPETITION PERIODIQUE DE LA CELLULE (MCHIRGUI, 2012).....	60
FIGURE I.20: SOLLICITATIONS EXTERIEURES ET INTERIEURES D'UNE PAROI DE BATIMENT.....	65
FIGURE I.21: TYPES DE CONTACT POSSIBLES ENTRE DEUX MATERIAUX (DE FREITAS ET AL., 1996).....	68
FIGURE I.22 : STRATEGIES DE COUPLAGE DYNAMIQUE ENTRE LES MODELES DE TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES AUX NIVEAUX DE L'ENVELOPPE ET L'AMBIANCE DU BATIMENT.....	70
FIGURE I.23: SCHEMA DU SYSTEME DE COUPLAGE CHAMPS-BES (NICOLAI ET AL., 2007).....	71
FIGURE II.1 : SCHEMA GENERAL D'UNE PAROI MULTICOUCHE.....	84
FIGURE II.2 : CONDITIONS AUX LIMITES ET INITIALES DE LA SIMULATION.....	86
FIGURE II.3 : CONFRONTATION ENTRE LA SOLUTION ANALYTIQUE (A GAUCHE) ET NUMERIQUE (A DROITE) : EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DE LA TEMPERATURE A LA SURFACE ET AU CENTRE DU MATERIAU.....	87
FIGURE II.4 : CONFRONTATION ENTRE LA SOLUTION ANALYTIQUE (A GAUCHE) ET NUMERIQUE (A DROITE) : EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DE LA TENEUR EN EAU A LA SURFACE ET AU CENTRE DU MATERIAU.....	87
FIGURE II.5: ISOLATION DES ECHANTILLONS.....	88
FIGURE II.6 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	89
FIGURE II.7 : ZOOM SUR LA COUPELLE PLACEE DANS LE COMPARTIMENT BAS DU DISPOSITIF.....	89
FIGURE II.8 : CENTRALE D'ACQUISITION ET CAPTEUR SHT75 DE TYPE SENSIRION.....	89
FIGURE II.9 : POSITIONNEMENT DES CAPTEURS DANS LES ECHANTILLONS TESTES.....	90
FIGURE II.10: CONDITIONS AUX LIMITES DES SIMULATIONS.....	91
FIGURE II.11: COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION NUMERIQUE ET LES DONNEES EXPERIMENTALES POUR LA CONFIGURATION I (PLATRE + BRIQUE).....	92

FIGURE II.12: COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION NUMERIQUE ET LES DONNEES EXPERIMENTALES POUR LA CONFIGURATION 2 (POLYSTYRENE + BRIQUE) .....	93
FIGURE II.13: COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION NUMERIQUE ET LES DONNEES EXPERIMENTALES POUR LA CONFIGURATION 3 (PLATRE + AGGLOMERE).....	94
FIGURE II.14: COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION NUMERIQUE ET LES DONNEES EXPERIMENTALES POUR LA CONFIGURATION 1 (POLYSTYRENE + AGGLOMERE).....	95
FIGURE II.15: CONFIGURATION DE LA PAROI ETUDIEE.....	97
FIGURE II.16 : EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE, PRESSION DE VAPEUR D'EAU ET D'HUMIDITE RELATIVE .....	98
FIGURE II.17 : IMPACT DE LA VARIATION DES PROPRIETES HYGROTHERMIQUES SUR L'EVOLUTION TEMPORELLE D'HUMIDITE RELATIVE .....	99
FIGURE II.18 : ECARTS RELATIFS MOYENS DES CHAMPS DE PRESSION DE VAPEUR D'EAU.....	100
FIGURE II.19 : ECARTS RELATIFS MOYENS DES CHAMPS DE TEMPERATURE .....	100
FIGURE II.20 : ECARTS RELATIFS MOYENS DES CHAMPS DE L'HUMIDITE RELATIVE .....	101
FIGURE III.1 : MATERIAUX ETUDIES .....	104
FIGURE III.2: POROSIMETRE A MERCURE MICROMETRICS-AUTOPORE III 9420 .....	105
FIGURE III.3 : DISTRIBUTION DE LA TAILLE DES PORES OBTENUE PAR INTRUSION AU MERCURE POUR LE BOIS AGGLOMERE, LA BRIQUE, LE PARPAING ET LE PLATRE.....	107
FIGURE III.4: ILLUSTRATION DE L'IMPACT DE LA TEMPERATURE SUR L'EVOLUTION DE LA PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU POUR UN BETON CELLULAIRE (HEDENBLAD, 1996).....	108
FIGURE III.5 : SCHEMA DESCRIPTIF DE LA COUPELLE.....	109
FIGURE III.6 : DISPOSITIF GINTRONIC-GravITest ET SON PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT .....	109
FIGURE III.7 : REPRESENTATION DES RESISTANCES A LA VAPEUR D'EAU INTRODUITES DANS LA METHODE DE LA COUPELLE .....	111
FIGURE III.8 : EVOLUTION DE LA MASSE DES ECHANTILLONS TESTES AU COURS DU TEMPS.....	112
FIGURE III.9 : EVALUATION DE LA PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LA BRIQUE, LE PARPAING ET LE BOIS AGGLOMERE .....	113
FIGURE III.10 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'ADSORPTION PHYSIQUE D'EAU DANS UN PORE (COLLET, 2004) .....	114
FIGURE III.11 : BELSORP AQUA3 (A GAUCHE) ET SON PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT (A DROITE).....	116
FIGURE III.12 : COURBES D'ISOTHERME D'ADSORPTION ET DE DESORPTION POUR LES MATERIAUX TESTES : BRIQUE, PARPAING, BOIS AGGLOMERE ET PLATRE.....	117
FIGURE III.13 : DEUX CYCLES D'ADSORPTION/DESORPTION POUR LE PLATRE .....	119
FIGURE III.14 : COURBES D'ISOTHERME D'ADSORPTION/DESORPTION EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LE BOIS AGGLOMERE, LA BRIQUE ET LE PARPAING .....	120
FIGURE III.15 : PHOTO DU DISPOSITIF VSA « VAPOR SORPTION ANALYZER ».....	121
FIGURE III.16 : COMPARAISON DES ISOTHERMES D'ADSORPTION/DESORPTION OBTENUES PAR DEUX METHODES DIFFERENTES : GRAVIMETRIQUE ET VOLUMETRIQUE.....	122
FIGURE III.17 : CAPACITES DE STOCKAGE D'HUMIDITE A 20°C ET 35°C POUR LA BRIQUE, LE PARPAING ET LE BOIS AGGLOMERE.....	123
FIGURE III.18 : EXTRACTEUR A MEMBRANE (MODELE 10120 DE SOIL-MOISTURE EQUIPMNET CORP).....	125
FIGURE III.19 : COURBES DE RETENTION D'EAU POUR LES MATERIAUX TESTES : AGGLOMERE ET PLATRE (A GAUCHE), BRIQUE ET PARPAING (A DROITE) .....	125
FIGURE III.20 : EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE DANS LA ZONE SUPER-HYGROSCOPIQUE.....	127
FIGURE III.21 : LAMBDA-METER Ep 5000E.....	128
FIGURE III.22 : ECHANTILLONS TESTES (BOIS AGGLOMERE, PARPAING ET PLATRE).....	129
FIGURE III.23 : EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU POUR LE PLATRE, LE BOIS AGGLOMERE ET LE PARPAING .....	130
FIGURE III.24 : CALORIMETRE CALVET BT 2.15.....	131

FIGURE III.25 : DISPOSITIF DE MESURE DE LA CHALEUR SPECIFIQUE .....	132
FIGURE III.26 : EVOLUTION DE LA CHALEUR SPECIFIQUE EN FONCTION DE L'ETAT HYDRIQUE DU MATERIAU.....	133
FIGURE IV.1 : PRINCIPE DE LA PLATEFORME DE CO-SIMULATION HAM-BES ET LES OUTILS UTILISES .....	137
FIGURE IV.2: STRATEGIE DE SYNCHRONISATION TEMPORELLE .....	139
FIGURE IV.3: SCHEMA DE COUPLAGE HAM-BES PAR LA CO-SIMULATION ENTRE COMSOL ET TRNSYS.....	140
FIGURE IV.4: SCHEMA DU BATIMENT ETUDIE .....	141
FIGURE IV.5: APPORT D'HUMIDITE PAR JOUR.....	141
FIGURE IV.6 : COMPARAISON ENTRE LA SOLUTION ANALYTIQUE ET LA RESOLUTION NUMERIQUE POUR UN REGIME QUASI-STATIONNAIRE .....	142
FIGURE IV.7 : COMPARAISON DE LA REPOSE HYGROTHERMIQUE AU NIVEAU DE L'AMBIANCE INTERIEURE POUR LE MODELE TRNSYS-COMSOL ET LES MODELES STANDARDS DE TRNSYS : NON HYGROSCOPIQUE, ECH ET BSH.....	144
FIGURE IV.8 : SCENARIO DE PRODUCTION D'HUMIDITE .....	145
FIGURE IV.9: COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION NUMERIQUE ET CONSOMMATION ENERGETIQUE (DONNEES EXPERIMENTALES DU 17 AU 19 FEVRIER 2005).....	146
FIGURE IV.10: COMPOSITION DE L'ENVELOPPE DES DEUX CAISSONS .....	148
FIGURE IV.11: SYSTEME DE REGULATION THERMIQUE : ECHANGEUR DE CHALEUR (A GAUCHE) ET CRYOSTAT « HUBER » (A DROITE) .....	149
FIGURE IV.12: CONTROLE HYGROMETRIQUE : MICHELL HUMIDITY GENERATOR10.....	149
FIGURE IV.13: BANC EXPERIMENTAL DEVELOPPE .....	150
FIGURE IV.14: CENTRALE D'ACQUISITION SENSIRION (A GAUCHE) CAPTEUR HYGROTHERMIQUE SENSIRION SHT75 (A DROITE) .....	150
FIGURE IV.15: POSITIONNEMENT DES CAPTEURS HYGROTHERMIQUES DANS LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL .....	151
FIGURE IV.16: PRINCIPE DE DETERMINATION DES COEFFICIENTS D'ECHANGE CONVECTIF .....	152
FIGURE IV.17: EVOLUTIONS DES TEMPERATURES DANS LES DEUX COMPARTIMENTS ET AUX SURFACES DE LA PAROI .....	153
FIGURE IV.18: POSITIONNEMENT DES CAPTEURS AU NIVEAU DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL (LA PAROI TESTEE ET LES DEUX COMPARTIMENTS I ET II).....	154
FIGURE IV.19: CONDITIONS HYGROTHERMIQUES EXPERIMENTALES CONTROLEES DANS LES DEUX AMBIANCES I ET II DANS LE CAS ISOTHERME .....	155
FIGURE IV.20: COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION NUMERIQUE ET LES DONNEES EXPERIMENTALES AU NIVEAU DE LA PAROI ETUDIEE POUR DES CONDITIONS ISOTHERMES .....	156
FIGURE IV.21: COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE L'HUMIDITE RELATIVE ENTRE LA SIMULATION NUMERIQUE ET LES DONNEES EXPERIMENTALES AU NIVEAU DU COMPARTIMENT II POUR DES CONDITIONS ISOTHERMES ...	156
FIGURE IV.22: CONDITIONS HYGROTHERMIQUES EXPERIMENTALES CONTROLEES DANS LES DEUX AMBIANCES I ET II DANS LE CAS ISOTHERME .....	158
FIGURE IV.23: COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION NUMERIQUE ET LES DONNEES EXPERIMENTALES AU NIVEAU DE LA PAROI ETUDIEE POUR DES CONDITIONS NON-ISOTHERMES.....	159
FIGURE IV.24 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE L'HUMIDITE RELATIVE ENTRE LA SIMULATION NUMERIQUE ET LES DONNEES EXPERIMENTALES AU NIVEAU DU COMPARTIMENT II POUR DES CONDITIONS NON-ISOTHERMES .....	159
FIGURE IV.25: GEOMETRIE ET COMPOSITION DE LA CONFIGURATION ETUDIEE (INTERSECTION ENTRE LE MUR EXTERIEUR ET LE PLANCHER SUPERIEUR).....	163
FIGURE IV.26: TEMPERATURE ET HUMIDITE RELATIVE EXTERIEURES POUR LE CLIMAT DE LA ROCHELLE .....	163
FIGURE IV.27: FREQUENCES D'OCCURRENCE DE LA TEMPERATURE INTERIEURE (A DROITE) ET L'HUMIDITE RELATIVE INTERIEURE (A GAUCHE) POUR LE MOIS DE JANVIER (CLIMAT DE LA ROCHELLE) .....	164
FIGURE IV.28: GAIN HYDRIQUE TOTAL AU NIVEAU DE L'AMBIANCE INTERIEURE (PRODUCTION D'HUMIDITE ET L'APPORT HYDRIQUE DE L'ENVELOPPE) POUR LE CAS A .....	165
FIGURE IV.29: TEMPERATURE ET HUMIDITE RELATIVE EXTERIEURES POUR LE CLIMAT DE HONG KONG .....	165
FIGURE IV.30: FREQUENCES D'OCCURRENCE DE LA TEMPERATURE INTERIEURE (A DROITE) ET L'HUMIDITE RELATIVE INTERIEURE (A GAUCHE) POUR LE MOIS D'AOUT (CLIMAT DE HONG KONG) .....	166

FIGURE IV.31: GAIN HYDRIQUE TOTAL AU NIVEAU DE L'AMBIANCE INTERIEURE (PRODUCTION D'HUMIDITE ET L'APPORT HYDRIQUE DE L'ENVELOPPE) POUR LE CAS B .....	166
FIGURE IV.32: TEMPERATURE ET HUMIDITE RELATIVE EXTERIEURES POUR LE CLIMAT DE BERLIN.....	167
FIGURE IV.33: FREQUENCES D'OCCURRENCE DE LA TEMPERATURE INTERIEURE (A DROITE) ET L'HUMIDITE RELATIVE INTERIEURE (A GAUCHE) POUR LE MOIS DE JANVIER (CLIMAT DE BERLIN).....	167
FIGURE IV.34: GAIN HYDRIQUE TOTAL AU NIVEAU DE L'AMBIANCE INTERIEURE (PRODUCTION D'HUMIDITE ET L'APPORT HYDRIQUE DE L'ENVELOPPE) POUR LE CAS C .....	168
FIGURE IV.35: CONSOMMATION ENERGETIQUE (CHAUFFAGE ET RAFRAICHISSEMENT) DANS LE CLIMAT DE LA ROCHELLE.....	169
FIGURE IV.36: FLUX THERMIQUE TOTAL A LA SURFACE INTERIEURE DE L'ENVELOPPE POUR LA PERIODE HIVERNALE (20 AU 25 JANVIER) POUR LE CLIMAT DE LA ROCHELLE .....	169
FIGURE IV.37: CONSOMMATION ENERGETIQUE (CHAUFFAGE ET RAFRAICHISSEMENT) DANS LE CLIMAT DE HONG KONG .....	170
FIGURE IV.38: FLUX THERMIQUE TOTAL A LA SURFACE INTERIEURE DE L'ENVELOPPE POUR LA PERIODE ESTIVALE (20 AU 25 AOUT) POUR LE CLIMAT DE HONG KONG.....	170
FIGURE IV.39: CONSOMMATION ENERGETIQUE (CHAUFFAGE ET RAFRAICHISSEMENT) DANS LE CLIMAT DE HONG KONG .....	171
FIGURE IV.40: FLUX THERMIQUE TOTAL A LA SURFACE INTERIEURE DE L'ENVELOPPE POUR LA PERIODE ESTIVALE (20 AU 25 AOUT) POUR LE CLIMAT DE HONG KONG.....	172
FIGURE IV.41: DEMARCHE DE MODELISATION HAM-BES PAR CHAINAGE (APPROCHE DECOUPLEE) .....	173
FIGURE IV.42: COMPARAISON DE LA DISTRIBUTION DES CHAMPS DE TEMPERATURE ENTRE L'APPROCHE COUPLEE ET DECOUPLEE (31 JANVIER).....	173
FIGURE IV.43: COMPARAISON DE LA DISTRIBUTION DES CHAMPS DE PRESSION DE VAPEUR ENTRE L'APPROCHE COUPLEE ET DECOUPLEE (31 JANVIER).....	174
FIGURE IV.44: COMPARAISON DE LA DISTRIBUTION DES CHAMPS D'HUMIDITE RELATIVE ENTRE L'APPROCHE COUPLEE ET DECOUPLEE (31 JANVIER).....	174
FIGURE IV.45: FLUX HYDRIQUE ET THERMIQUE TRAVERSANT LA SURFACE INTERIEURE DE DU PONT THERMIQUE : COMPARAISON ENTRE LES APPROCHES COUPLEE ET DECOUPLEE .....	175
FIGURE IV.46: PLAN DE LA MAISON ETUDIEE (RAHMEH, 2014).....	176
FIGURE IV.47: DEMARCHE DE COUPLAGE THERMO-HYDRO-AERAIQUE (CONTAM-TRNSYS-COMSOL)....	184
FIGURE IV.48: DISTRIBUTION ANNUELLE DES NIVEAUX DES TEMPERATURES INTERIEURES DANS LE CAS DE LA VMC.....	185
FIGURE IV.49: DISTRIBUTION ANNUELLE DES NIVEAUX DES TEMPERATURES INTERIEURES DANS LE CAS DE LA VI CENTRALE.....	186
FIGURE IV.50: DISTRIBUTION ANNUELLE DES NIVEAUX DES TEMPERATURES INTERIEURES DANS LE CAS DE LA VI A BALAYAGE.....	186
FIGURE IV.51: COMPARAISON DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE ANNUELLE POUR LES STRATEGIES DE VENTILATION ETUDIEES .....	187
FIGURE IV.52 : DISTRIBUTION ANNUELLE DES NIVEAUX DES HUMIDITES RELATIVES INTERIEURES DANS LE CAS DE LA VMC.....	189
FIGURE IV.53: DISTRIBUTION ANNUELLE DES NIVEAUX DES HUMIDITES RELATIVES INTERIEURES DANS LE CAS DE LA VI-CENTRALE .....	189
FIGURE IV.54: DISTRIBUTION ANNUELLE DES NIVEAUX DES HUMIDITES RELATIVES INTERIEURES DANS LE CAS DE LA VI A BALAYAGE.....	190
FIGURE IV.55 : LA COMPOSITION DE LA PARTIE DE PAROI ETUDIEE .....	191
FIGURE IV.56: EVALUATION ANNUELLE DE RISQUE DE DEPERDITION THERMIQUE AU NIVEAU DE L'ENVELOPPE .....	192
FIGURE IV.57: COMPARAISON DES FREQUENCES ANNUELLES DE RISQUE DE FORTES DEPERDITIONS THERMIQUES POUR LES TROIS SYSTEMES DE VENTILATION ETUDIEES.....	192
FIGURE IV.58: EVALUATION DU RISQUE DU DEVELOPPEMENT FONGIQUE SUR LA SURFACE INTERIEURE POUR LES STRATEGIES DE VENTILATION ETUDIEES.....	194
FIGURE IV.59: EVALUATION DES RISQUES DE CONDENSATION A LA SURFACE DU COMPOSANT DE PAROI ETUDIE .....	195

# Liste des Tableaux

TABLEAU I.1: COEFFICIENTS DE VARIATION DIMENSIONNELLE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU DE QUELQUES MATERIAUX DE CONSTRUCTION (COGNARD, 2002).....	36
TABLEAU I.2: PRINCIPALES CAUSES DE DEVELOPPEMENT DE MOISSURES (MOON AND AUGENBROE, 2003).....	43
TABLEAU I.3: PRINCIPAUX PARAMETRES UTILISES PAR LES MODELES DE DEVELOPPEMENT DE MOISSURES (BERGER ET AL., 2013).....	44
TABLEAU I.4: SYNTHESE DES CRITERES D'APPARITION DE PATHOLOGIES LIEES A L'HUMIDITE (BERGER ET AL., 2013) .....	46
TABLEAU I.5: GRANDEURS DECRIVANT L'ETAT D'UN MILIEU POREUX .....	49
TABLEAU I.6: COEFFICIENTS DE DIFFUSION EFFECTIFS DANS LE MILIEU POREUX (TRABELSI, 2010).....	51
TABLEAU I.7: CLASSIFICATION DES MODELES THERMO-HYDRO-AERAULIQUE SELON LEUR GRANULARITE (WOLOSZYN AND RODE, 2008B) .....	73
TABLEAU II.1. VALEURS USUELLES DES COEFFICIENTS DE TRANSFERT THERMIQUE ET MASSIQUE PAR CONVECTION POUR LES SURFACES EXTERIEURE ET INTERIEURE DES PAROIS.....	83
TABLEAU II.2 : PARAMETRES DE L'APPLICATION.....	85
TABLEAU II.3: CONFIGURATIONS DES ECHANTILLONS TESTES.....	88
TABLEAU II.4 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU CAPTEUR DE TEMPERATURE ET D'HYGROMETRIE SHT75....	90
TABLEAU II.5 : PROPRIETES HYDRIQUES ET THERMIQUES DES MATERIAUX UTILISES DANS L'EXPERIMENTATION DANS LES CONDITIONS SECHES .....	91
TABLEAU II.6 : PROPRIETES DES MATERIAUX CONSTITUANT LES COUCHES DE LA PAROI SIMULEE .....	97
TABLEAU II.7 : CAS DE VARIATION REALISES .....	97
TABLEAU III.1: RELATION ENTRE LA SUCCION ET L'HUMIDITE RELATIVE (LOI DE KELVIN).....	127
TABLEAU IV.1 : PROPRIETES HYGROTHERMIQUES DU BETON CELLULAIRE .....	141
TABLEAU IV.2: SCENARIOS ETUDIES .....	143
TABLEAU IV.3: PROPRIETES DES MATERIAUX CONSTITUANTS LA PAROI .....	145
TABLEAU IV.4: SOLLICITATIONS IMPOSEES DANS LES CAS ISOTHERME ET NON ISOTHERME.....	151
TABLEAU IV.5: COEFFICIENTS D'ECHANGE CONVECTIF CALCULES .....	153
TABLEAU IV.6: DESCRIPTION DES CAS DE SIMULATION REALISES .....	162
TABLEAU IV.7: COMPOSITIONS DES DIFFERENTES PAROIS DE LA MAISON ETUDIEES .....	177
TABLEAU IV.8: SCENARIO DE PRESENCE DANS LA MAISON (KOFFI, 2009) .....	178
TABLEAU IV.9: PRODUCTION D'HUMIDITE DUE A L'OCCUPATION .....	178
TABLEAU IV.10: SCENARIOS JOURNALIERS DE PRODUCTION D'HUMIDITE DANS LES DIFFERENTES PIECES DE LA MAISON .....	179
TABLEAU IV.11: DISTRIBUTIONS DES DEBITS D'AIR POUR LES SYSTEMES DE VENTILATION ETUDIES .....	180
TABLEAU IV.12: COEFFICIENT C POUR LES MODULES D'AIR UTILISES DANS LE CAS D'ETUDE .....	182



# Nomenclature

## Caractères latins

Désignation	Description	Unité
$a_p$	Coefficient d'absorptivité aux précipitations	[-]
$C$	Connectivité	[-]
$C$	Capacité d'humidité pour un potentiel d'humidité	$[kg/(kg \cdot M)]$
$C_a$	capacité de l'air humide	$[s^2/m^2]$
$C_m$	Capacité de stockage d'humidité	$[kg/kg \cdot Pa]$
$C_p$	Chaleur spécifique	$[J/(kg \cdot K)]$
$c_l$	Capacité thermique massique	$[J/kg \cdot K]$
$D$	Coefficient de diffusion d'humidité pour un potentiel d'humidité	$[kg/(m \cdot s \cdot M)]$
$D_a$	Coefficient de diffusion moléculaire	$[m^2/s]$
$D_k$	Coefficient de diffusion de Knudsen	$[m^2/s]$
$D_s$	Coefficient de diffusion surfacique	$[m^2/s]$
$D_T$	Coefficient de diffusion non isotherme de l'eau liquide	$[kg/(m \cdot s \cdot K)]$
$D_m$	Coefficient de diffusion d'humidité	$[m^2/s]$
$D_v$	Coefficient de diffusion effectif d'un milieu poreux	$[m^2/s]$
$D_\theta$	coefficient isotherme de la vapeur d'eau	$[m^2/s]$
$d$	Diamètre du pore	$[m]$
$g$	Accélération de la pesanteur	$[m/s^2]$
$HR$	Humidité relative	[%]
$H_s$	Enthalpie du matériau poreux	$[J/m^3]$
$h_c$	Coefficients d'échange convectif de chaleur	$[W/m^2 \cdot K]$
$h_l$	Enthalpie massiques de l'eau liquide	$[J/kg]$
$h_m$	Coefficients d'échange convectif de masse	$[kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)]$
$h_v$	Enthalpie massiques de la vapeur d'eau	$[J/kg]$
$J_{l,pluie}$	Flux d'eau liquide arrivant sur la paroi	$[kg/(m^2s)]$

$j_a$	Densité de flux massique de l'air sec	$[kg/m^2 \cdot s]$
$j_l$	Densité de flux massique de la phase liquide	$[kg/m^2 \cdot s]$
$j_m$	Densité de flux massique totale	$[kg/m^2 \cdot s]$
$j_q$	Densité de flux de chaleur	$[J/(m^2 \cdot s)]$
$j_v$	Densité du flux de vapeur d'eau	$[kg/(m^2 \cdot s)]$
$K_n$	Nombre de Knudsen	$[-]$
$k$	Perméabilité intrinsèque du milieu poreux	$[m^2]$
$k_f$	Coefficient d'infiltration total	$[kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$
$k_{fl}$	Coefficient d'infiltration liquide	$[kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$
$k_{fv}$	Coefficient d'infiltration vapeur d'eau	$[kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$
$k_l$	Conductivité hydraulique	$[kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$
$k_m$	Perméabilité totale en humidité	$[kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$
$k_T$	Conductivité hydraulique due à un gradient de température	$[kg/(m \cdot s \cdot K)]$
$k_v$	Perméabilité à la vapeur d'eau	$[kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$
$L_v$	Chaleur latente de changement de phase	$[J/kg]$
$l_0$	Epaisseur de l'échantillon	$[m]$
$l_e$	Langueur moyenne du pore	$[m]$
$M$	Masse molaire	$[kg/mol]$
$m$	Masse	$[kg]$
$P$	Pression totale	$[Pa]$
$P_a$	Pression de l'air	$[Pa]$
$P_c$	Pression capillaire	$[Pa]$
$P_{Hg}$	Pression exercée sur le mercure	$[Pa]$
$P_l$	Pression d'eau liquide	$[Pa]$
$P_v$	Pression partielle de vapeur d'eau	$[Pa]$
$P_{vent}$	Pression du vent extérieur	$[Pa]$
$P_{v,sat}$	Pression de vapeur d'eau saturante	$[Pa]$
$Q$	Flux de chaleur	$[W]$
$Q_{air}$	Débit d'air	$[m^3/s]$
$Q_{cond}$	Flux thermique par conduction	$[kJ/h]$
$Q_{conv}$	Flux thermique convectif	$[kJ/h]$
$Q_{HAM}$	Flux thermique dû au modèle HAM	$[kJ/h]$
$Q'_{HAM}$	Flux thermique corrigé dû au modèle HAM	$[kJ/h]$
$Q_{int}$	Gain thermique interne	$[kJ/h]$
$Q_{rad}$	Flux thermique radiatif	$[kJ/h]$

$q$	Densité de flux de chaleur	$[W/m^2]$
$R$	Constante des gaz parfait	$[J/(mol \cdot K)]$
$r_p$	Diamètre du pore	$[m]$
$S$	Surface	$[m^2]$
$S_{dif}$	Rayonnement diffus	$[W/m^2]$
$S_{dir}$	Rayonnement direct	$[W/m^2]$
$S_h$	Source de chaleur due au changement de phase de l'eau	$[J/(m^3 \cdot s)]$
$S_l$	Degré de saturation	$[-]$
$s$	Surface spécifique	$[m^2/m^3]$
$T$	Température	$[K]$
$t$	Temps	$[s]$
$U$	Coefficient de transfert thermique	$[W/(K \cdot m^2)]$
$u$	Teneur en eau volumique	$[kg/m^3]$
$u_a$	Teneur en air sec	$[kg/m^3]$
$u_v$	Teneur en vapeur d'eau	$[kg/m^3]$
$V$	Volume	$[m^3]$
$V_{vent}$	Vitesse du vent	$[m/s]$
$v$	Vitesse de l'air	$[m/s]$
$v_f$	Vitesse d'écoulement	$[m/s]$
$z$	Hauteur de l'ouverture	$[m]$

## Caractères grecs

Désignation	Description	Unité
$\alpha$	Coefficient de transfert thermique par advection dû au gradient de pression de vapeur d'eau	$[m^2/s]$
$\gamma$	Coefficient de transfert thermique par advection dû au gradient de pression totale	$[m^2/s]$
$\gamma$	Chaleur d'absorption ou de désorption	$[J/kg]$
$\varepsilon_p$	porosité ouverte	$[\%]$
$\delta_r$	Ecart relatif	$[\%]$
$\delta$	Coefficient de transfert d'humidité	$[m^2/s]$
$\delta_{RMS}$	Erreur quadratique moyenne	$[\%]$
$\theta$	Angle de contact entre la surface solide et le mercure	$[^\circ]$

$\lambda$	Conductivité thermique	$[W/(m^2K)]$
$\rho$	Masse volumique	$[kg/m^3]$
$\varphi$	Humidité relative	$[\%]$
$\tau$	Tortuosité	$[-]$
$\pi$	Libre parcours moyen dans un milieu poreux	$[m]$
$\eta$	Viscosité dynamique du fluide	$[Po]$
$\sigma$	Critère de changement de phase	$[-]$
$\sigma$	Tension superficielle entre deux phases	$[N/m]$
$\sigma_{Hg}$	Tension superficielle de mercure	$[N/m]$
$\psi$	Coefficient de déperdition thermique	$[W/(m \cdot K)]$
$\omega$	Teneur en eau massique	$[kg/kg]$
$\omega'$	Potentiel d'humidité	$[^{\circ}M]$

## Indice

Désignation	Description
$a$	Air
$l$	Liquide
$v$	Vapeur d'eau
$ext$	Extérieur
$int$	Intérieur

# Introduction Générale

Avec ses 45% de la consommation énergétique mondiale et une émission de CO<sub>2</sub> avoisinant les 36.2 billion de tonnes, le bâtiment se positionne parmi les secteurs les plus gourmands en consommation énergétique. De ce fait une réelle et pressante volonté, de réduire les dépenses énergétiques s'avère nécessaire.

En effet, dès le début des années 1990, le secteur du bâtiment se positionnait déjà en position des secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre, proposant des enjeux économiques et environnementaux majeurs en France et à l'étranger. Ce secteur a très vite été propulsé sur le devant de la scène lorsqu'une réelle volonté politique avait succédé à la déclaration de Rio en 1992 et au protocole de Kyoto en 1995, faisant apparaître en 1996, la loi sur l'utilisation rationnelle de l'énergie. Suite à cela, plusieurs mesures ont été mises en application par le vote de la directive européenne sur la performance énergétique de 2002 et l'adoption du plan climat en 2004 et des réglementations thermiques successives en 2000, 2005 puis 2012.

Les initiatives prises dans le secteur du bâtiment à partir des années 1990 ont permis de stabiliser les hausses des consommations d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre. Pour aller encore plus loin dans cette démarche, et suite au Pacte écologique de 2006, et au Grenelle Environnement de 2007, la France a organisé diverses rencontres politiques à la fin de l'année 2007. Ces rencontres ont pour dénominateur commun l'ambition de prendre des décisions sur le long terme en matière d'environnement et de développement durable. Elles concernent, entre autres, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre des bâtiments à l'horizon 2020. Ces décisions sont traduites au niveau national au travers de réglementations thermique, et des labels de qualité environnementale ou de performance énergétique (maisons passives, bâtiments à basse consommation et maisons à énergie positives...).

Cependant, mettre en pratique ces réglementations thermiques dans les nouvelles constructions ou lors de la réhabilitation du bâti existant, peut créer des ambiances habitables confinées avec des parois très étanches et peu de renouvellement d'air intérieur. Cela rend la part des transferts hydriques sous ces différentes formes (vapeur, liquide, solide) de plus en plus important par rapport aux transferts de chaleur au point où il n'est pas envisageable de les négliger, sous peine d'entacher les prédictions numériques d'erreurs significatives. Par ailleurs, le fait d'avoir des bâtiments à faible perméabilité engendre une présence excessive

d'humidité et accentue, par conséquent, les risques liés à l'apparition de différentes pathologies soit au niveau de l'enveloppe ou au sein de l'ambiance du bâtiment. En effets, la présence de l'eau est responsable de la croissance fongique. De plus, les transferts hydriques constituent le vecteur de transport des agents agressifs (tels que les chlorures et les sulfates) et le siège des réactions chimiques (telle que la carbonatation). En outre, l'utilisation des matériaux à faible impact environnemental tels que les écomatériaux, matériaux bio-sourcés et les matériaux recyclés est freinée, notamment, de par la non disponibilité de bases de données relatives à leurs propriétés intrinsèques et par méconnaissance de leurs comportements dans le temps.

Dans ce contexte, où l'humidité représente la cause majeure de dégradation des bâtiments, la communauté scientifique, nationale et internationale, s'est penchée sur cette problématique afin de comprendre mieux les phénomènes associés aux transferts hygrothermiques à différentes échelles : matériaux poreux, enveloppes de bâtiments ambiances des espaces habités et de mieux cerner les phénomènes physiques mises en jeux.

Dans ce sens, plusieurs équipes de recherches se sont intéressés à la physique du bâtiment et particulièrement au transfert thermo-hydro-aéraulique dans le bâtiment en essayant d'apporter des contributions à la fois à l'échelle expérimentale et numérique. La plupart de ces études ont été menées dans le cadre des projets internationaux de l'Agence Internationale de l'Energie et de son programme Energy Conservation in Buildings and Community Systems.

Parmi les premiers projets, l'annexe 14 (Condensation and Energy), achevée en 1992, s'est intéressée particulièrement aux problèmes de condensation dans les parois et leur impact sur la consommation énergétique des bâtiments. L'intérêt de ce programme était d'améliorer les connaissances en termes de caractérisation des matériaux de constructions vis-à-vis ces phénomènes de condensations et de développement fongique tout en proposant des solutions et des stratégies permettant de réduire l'apparition de ces pathologies.

Dans la continuité, l'annexe 24 (Heat, air and moisture transfer) achevé en 1996 avait pour objectif la modélisation et l'étude des phénomènes fondamentaux liés au transfert de chaleur, d'air et d'humidité à travers les parois multicouches. Un accent particulier a été mis sur la maîtrise de la consommation énergétique moyennant l'optimisation de l'étanchéité à l'air des bâtiments ainsi que sur le comportement hydrique et les aspects de durabilités des constructions.

Les conclusions déduites des deux programmes (annexes 14 et 24) concernent la nécessité de prendre en compte une modélisation globale des transferts couplés de chaleur et de masse à l'échelle du bâtiment et de l'enveloppe. Dans cette optique, l'annexe 41 (2003-2007) (Whole building heat, air and moisture response) a vu le jour. Les principaux travaux menés dans ce projet ont été regroupés dans quatre points :

- Une exploration détaillée des phénomènes physiques impliqués dans les transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans les bâtiments. Cela comprenait le développement de nouveaux modèles ainsi que l'amélioration des modèles existants afin d'étendre leur capacités et affiner leur précision.
- Une étude expérimentale et numérique, à l'échelle du matériau, des transferts hydriques. Par ailleurs, un enrichissement des bases de données en termes de propriétés hygrothermiques des matériaux de construction a été effectué.
- Une investigation concernant les conditions intérieures et extérieures aux bâtiments a été réalisée (collection de données sur l'occupation des bâtiments, détermination des charges dues à la pluie ou au vent). Dans le même sens, les approches de modélisation des échanges thermiques et hydriques à la surface des parois ont été analysées.
- Une analyse des désordres causés par l'humidité dans le bâtiment a été entreprise tout en s'intéressant aux conditions climatiques, systèmes de ventilation et l'utilisation des bâtiments.

Par la suite, l'annexe 55 (2009-2013) (Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting : Probability Assessment of Performance and Cost) a été lancée. La portée de ce projet était de développer et de fournir des informations et des outils d'aide à la décision pour améliorer la réhabilitation énergétique des bâtiments. Le développement des outils était basé sur l'intégration des méthodes probabilistes lors de la prédiction du comportement hygrothermique ainsi que la consommation d'énergie des bâtiments.

Au niveau national, le comportement hygrothermique et les pathologies liées à l'humidité dans les bâtiments est le centre d'intérêt de plusieurs groupes de recherche qui s'est traduit par le montage de plusieurs projets dans cette thématique avec le soutien de l'agence nationale de la recherche (ANR) et Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'énergie (ADEME). Parmi ces programmes on peut citer :

Les projets MACHA (2006-2009) « Définir l'impact des transferts de masse sur les transferts de chaleur » et MACHA 2 (2007-2009) « Mieux comprendre les transferts de masse pour maîtriser les transferts de chaleur », avaient pour objectif une meilleure appréhension des transferts de masse et de leur influence sur les transferts de chaleur. Ils se sont intéressés aussi sur l'analyse des méthodes de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux de construction notamment la méthode classique de la coupelle. Cette étude a mis en évidence l'importance des transferts de masse sur les transferts thermiques à travers les parois de bâtiments où la hausse du transfert de chaleur peut atteindre les 20%. De plus, les conclusions de cette étude ont montré qu'une présence excessive d'humidité dans les matériaux peut engendrer plusieurs dégradations affectant directement les performances énergétiques et structurelles des bâtiments.

Un autre projet intitulé Humirisk (2006-2010) « Renforcement de l'isolation dans l'existant : évaluation des risques liés à l'humidité » a été réalisé. Ce programme consistait en une

campagne de mesures ainsi qu'une modélisation numérique portant sur des bâtiments existants. L'objectif de cette étude était d'analyser l'influence de la rénovation thermique sur la réponse hygrothermique des bâtiments réhabilités et de prévenir les risques liés à l'humidité afin de préserver le bâti existants et assurer le confort des occupants.

Dans le même sujet, des études ont été réalisées sur le comportement hygrothermique des constructions à ossatures bois qui compte parmi les bâtiments les plus vulnérables à l'humidité. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des deux projets : Opti-MOB (2008-2011) « réduction des risques liés à l'humidité et aux transferts d'air dans les constructions à ossature bois » et TRANSBATIBOIS (2008-2011) « Transferts dans les bâtiments bois ».

Récemment, deux projets sont en cours dans cette thématique, le projet Hygrobat (2011-2015) « Vers une méthode de conception hygrothermique des bâtiments performants » et le projet HUMIBATex (2012-2016) « Comment prédire les désordres causés par l'humidité ? Quelles solutions techniques pour rénover le bâti existant ».

L'objectif principal du projet est l'établissement d'une méthodologie d'évaluation et de conception hygrothermique pour les bâtiments en œuvre, soumis à des sollicitations dynamiques. Cette méthodologie devra permettre de quantifier l'impact de l'humidité sur le comportement énergétique d'hiver et d'été. Elle est indispensable pour donner des réponses concrètes et chiffrées sur les questions posées actuellement comme : l'inertie « hygrique », permet-elle d'améliorer le confort des occupants l'été ? Quels sont les gains pouvant être attendu d'un échangeur enthalpique ? Les transferts de masse dans une paroi hygroscopique. La démarche du projet Hygrobat a été progressive et à différentes échelles : à l'échelle de l'échantillon pour la caractérisation des propriétés matériaux, à l'échelle de cellule contrôlé et de bâtiments réels pour l'étude des transferts hygrothermiques dans les parois de bâtiments. La finalité de ce travail est de fournir des propositions d'évolution de la normalisation et de la réglementation permettant de valoriser de façon rigoureuse et fiable les solutions hygrothermiques les plus performantes.

De son côté, le projet HUMIBATex vise à élaborer un guide d'aide à la réhabilitation des bâtiments existants tenant en compte les risques de désordres causés par l'humidité. Les travaux réalisés dans ce projet sont de nature expérimentale et numérique. Pour le volet expérimental, un suivi du comportement hygrothermique de différents bâtiments avant et après réhabilitation a été entrepris. Dans la même démarche, une maison expérimentale à l'échelle 1 est construite afin de tester différentes solutions de réhabilitation. Par ailleurs, une campagne de caractérisation hygrothermique des principales propriétés des matériaux de construction a été réalisée, particulièrement sur les matériaux des anciens bâtis, dans le but d'enrichir les bases de données existantes. Concernant le volet numérique, l'objectif est de proposer un outil de modélisation avec une granularité fine des transferts hygrothermiques à l'échelle global du bâtiment. Cela permet de prédire avec plus de précision les désordres liés à

l'humidité aux niveaux de l'enveloppe et l'ambiance des bâtiments. Les travaux réalisés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de ce projet.

Dans ce contexte, la problématique principale dans cette thématique de recherche doctorale est d'assurer une modélisation globale des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à l'échelle du bâtiment. Cependant, cette démarche est confrontée à des problèmes de complexité numérique particulièrement à l'échelle de la paroi où plusieurs phénomènes fortement couplés se manifestent. L'objectif des travaux réalisés dans cette thèse est de répondre à cette problématique en proposant un outil de modélisation thermo-hydro-aérodynamique des bâtiments avec une granularité appropriée notamment au niveau de l'enveloppe afin de mieux prédire les dégradations liées à l'humidité. L'étude est organisée autour de quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, un état de l'art est dressé concernant les différentes pathologies causées par l'humidité dans les bâtiments tout en décrivant les phénomènes physiques intervenant dans leur développement. Les désordres sont regroupés selon leur apparition, soit au niveau de l'ambiance habitable comme la dégradation de l'air intérieure, soit au niveau de l'enveloppe comme l'augmentation des déperditions thermiques, le développement fongiques et les problèmes de condensation. Ce chapitre apporte aussi quelques éléments bibliographiques concernant les caractéristiques du milieu poreux, les différents phénomènes physiques des transferts couplés de chaleur et de masse et leur modélisation ainsi que les principales approches de modélisation hygrothermique des bâtiments.

Le deuxième chapitre propose un modèle phénoménologique des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois de bâtiments. Le modèle en question est basé sur des moteurs de transferts (Température pour le transfert thermique, la pression de vapeur d'eau pour le transfert d'humidité et la pression totale pour le transfert d'air) qui ne dépendent pas de la nature des matériaux. Ce choix permet d'assurer la continuité au niveau des interfaces entre couches pour les parois multicouches et aborder leur modélisation en évitant des conditions aux limites complexes aux niveaux des interfaces entre les couches. En outre, la variation des propriétés hygrothermiques des matériaux en fonction de leur état thermique et hydrique est considérée, notamment pour la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la perméabilité à la vapeur d'eau et la capacité de stockage d'humidité. Dans un deuxième temps, des validations analytique et expérimentale du modèle de transfert hygrothermique élaboré ont été présentées. Par la suite une étude de sensibilité aux variations des principales propriétés hydriques et thermophysiques sur le comportement hygrothermique d'une paroi multicouche a été effectuée.

Dans le chapitre trois, une campagne de caractérisation des propriétés microstructurale (porosité par intrusion de mercure), thermophysiques (conductivité thermique et chaleur spécifique) et hydriques (isothermes d'adsorption et de désorption, rétention d'eau et perméabilité à la vapeur d'eau) des matériaux de construction a été réalisée. Cette étude s'est

focalisée essentiellement à l'analyse de l'impact de la température sur les propriétés hydriques à savoir la perméabilité à la vapeur d'eau, les courbes d'isotherme d'adsorption et de désorption ainsi que l'effet de l'état hydrique du matériau sur les valeurs des propriétés thermophysiques notamment la conductivité thermique et la chaleur spécifique. Les matériaux testés dans ce travail sont la brique, le parpaing, le plâtre et le bois aggloméré.

Le quatrième chapitre a été consacré à la présentation d'une démarche de co-simulation afin d'assurer une modélisation hygrothermique fine et globale des bâtiments. La co-simulation en question est réalisée entre deux modèles, le premier est un modèle thermique dynamique du bâtiment (modèle BES) représenté par TRNSYS et un modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité à travers l'enveloppe implémenté sous Comsol (modèle HAM). Le bon fonctionnement de la plateforme de co-simulation HAM-BES a été vérifié par la présentation de différentes validations par rapport à des données analytiques et expérimentales issues des travaux de l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie. Une confrontation des résultats numériques de la plateforme de co-simulation avec des résultats expérimentaux est aussi présentée. Les mesures ont été réalisées sur un banc expérimental conçu à cet effet au laboratoire. Par la suite un cas d'étude a été entrepris afin de mettre l'accent sur l'impact de la prise en compte des transferts couplés de chaleur et de masse dans la paroi avec différents degrés de granularité (1D et 2D) sur la prédiction du comportement hygrothermique des bâtiments (enveloppe et ambiance habitable) ainsi que sur les besoins énergétiques. Finalement, dans un autre cas d'étude, la plateforme de co-simulation HAM-BES a été couplée avec un outil de simulation aéraulique des bâtiments (CONTAM) afin de réaliser une étude comparative entre différentes stratégies de ventilation vis-à-vis de leurs efficacité à diminuer ou éliminer l'apparition de désordre causés par l'humidité dans les bâtiments résidentiels.

# Chapitre I.

## Etat de l'art sur les transferts hygrothermiques dans les bâtiments

### I.1 Introduction

Les enjeux économiques et écologiques liés à la réduction de la consommation énergétique des bâtiments sont de plus en plus importants. En effet, le secteur du bâtiment compte parmi les secteurs les plus énergivores avec près de 45% de la consommation mondiale. Dans le but de réduire la facture énergétique et les impacts environnementaux liés aux bâtiments, plusieurs organismes et laboratoires de recherche se sont intéressés à l'étude de la physique du bâtiment, de sa performance énergétique et de la qualité des espaces habitables.

Les fréquentes mesures adoptées afin de baisser la facture énergétique d'un bâtiment se résument dans une forte isolation avec une réduction des infiltrations et du renouvellement d'air intérieur. Cependant ces solutions peuvent accentuer la probabilité d'apparition des pathologies occasionnées par une présence excessive de l'humidité, soit au niveau de l'ambiance habitable, soit au niveau de l'enveloppe du bâtiment.

Ces pathologies liées à l'humidité dans le bâtiment sont dues, soit à l'action direct de l'humidité comme la condensation à la surface des parois ou la dégradation des propriétés thermiques des isolants, soit à une action indirect où les conditions hygrométriques représentent un milieu favorable d'apparition de pathologies comme le développement fongique.

Dans ce contexte, assurer une bonne prédiction des risques de dégradations liées à l'humidité passe nécessairement par le développement de modèles physiques décrivant avec le maximum de précision le comportement hygrothermique global du bâtiment.

Le présent chapitre constitue une synthèse sur l'action directe et indirecte de l'humidité sur le bâtiment et son lien avec la modélisation hygrothermique à la fois de l'enveloppe mais également de l'ambiance du bâtiment.

Dans un premier temps, un état de l'art sur les dégradations causées par l'humidité est dressé tout en détaillant les principaux facteurs intervenant dans l'apparition de ces pathologies. Par la suite, les principales grandeurs caractérisant le milieu poreux sont exposées ainsi que les différents phénomènes intervenant dans les mécanismes de transferts et de stockage de chaleur et de masse dans les matériaux poreux de construction. Dans ce sens, les principaux modèles des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiment sont présentés en les classant selon les types de moteurs de transfert thermique et hydrique utilisés. Ce chapitre sera clôt par un état de l'art où il est exposé les différentes démarches de modélisation adoptées afin d'assurer une interaction dynamique et continue entre les transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe et ceux au niveau de l'environnement intérieur et extérieur du bâtiment.

## I.2 Désordres causés par l'humidité dans le bâtiment

Dans le bâtiment, l'enveloppe est l'élément qui joue le rôle le plus important dans le maintien du confort nécessaire au niveau de l'ambiance habitable. Selon les travaux de (Unver et al., 2004) une enveloppe optimale d'un bâtiment doit assurer, à la fois, le confort visuel, thermique et acoustique du bâtiment. En outre, (Rousseau, 2003) précise qu'une bonne conception d'un bâtiment repose sur la compréhension des mécanismes de transferts et de stockages de l'humidité dans les matériaux de construction et la maîtrise des techniques de gestion d'humidité dans l'enveloppe. Cela permet de mieux contrôler le transfert de chaleur, d'air et de masse par un choix judicieux et efficace des matériaux de construction avec des propriétés adéquates.

Cependant, dans le cas d'une présence excessive de l'humidité dans le bâtiment, des pathologies peuvent apparaître, entraînant une dégradation structurelle au niveau de l'enveloppe ainsi qu'une détérioration du confort thermique et la qualité de l'air des ambiances habitables. Dans ce qui suit, un état de l'art sur les principales pathologies liées à l'humidité est présenté. En se basant sur le travail réalisé par (Berger et al., 2013a), les différentes pathologies dans le bâtiment liées à l'humidité sont regroupées selon leurs apparitions, au niveau de l'enveloppe ou de l'ambiance habitable.

## I.2.1 Pathologies au niveau de l'ambiance habitable

La température et l'humidité de l'air intérieur représentent les facteurs principaux qui influent directement sur le confort et le bien être des occupants. D'un autre côté, des conditions hygrothermiques intérieures défavorables favorisent l'apparition et le développement d'agents biologiques nocifs.

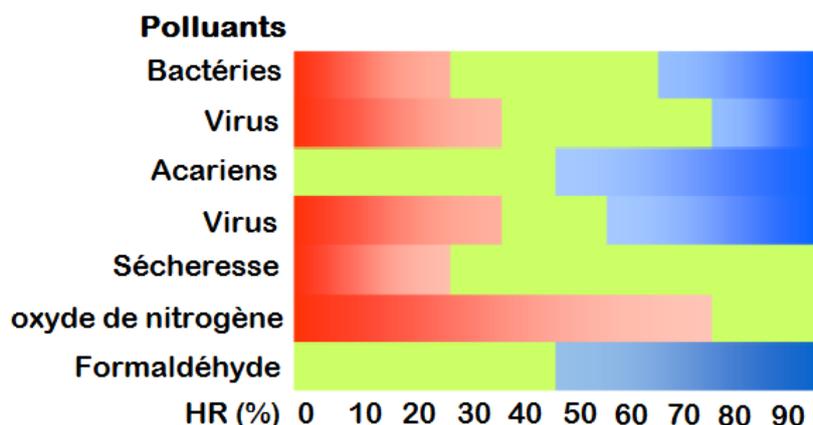
### I.2.1.1 Détérioration de la qualité de l'air intérieur

Une bonne qualité de l'air intérieur est un paramètre primordial pour assurer un bien-être des occupants. Cependant, différents polluants sont une source de contamination de l'atmosphère intérieure. Selon leur nature, ils sont regroupés dans deux grandes catégories :

- Les contaminants physico-chimiques : Fumée de tabac dans l'environnement (FTE), produits de combustion (CO, NO<sub>2</sub> et particules respirables), fibres, formaldéhyde et composés organiques volatils (COV).
- Les contaminants biologiques : moisissures, bactéries, allergènes respiratoires d'origine biologique dont les principales sources sont les acariens, les animaux domestiques et les blattes, champignons, et virus.

En s'intéressant aux polluants susceptibles d'apparaître ou de se développer dans des conditions hygrométriques défavorables, nous trouvons principalement les polluants et contaminants biologiques (Baughman and Arens, 1996). En effet, dans la plupart des études réalisées sur ce sujet, les contaminants biologiques ont tendances à se développer dans des humidités relatives élevées, généralement supérieures à 60% (Baughman and Arens, 1996). Dans une autre étude (Green, 1985), les résultats ont montrés que de faible taux d'humidité peuvent être un milieu favorable de développement des agents biotiques et ainsi provoquer l'augmentation de la sensibilité des occupants par rapport à ces agents biologiques.

Dans un travail mené par (Roulet, 2004), un état de l'art a été proposé sur les polluants biologiques et les hygrométries favorables à leur développement. La Figure I.1 résume les plages d'humidité relative favorable à la croissance des principaux agents biotiques. Les zones bleues et rouges représentent respectivement les zones de fortes et faibles humidités relatives favorables au développement des polluants ainsi que la zone verte qui représente les taux d'humidité défavorables à leur croissance. Comme pour les conclusions de (Berger et al., 2013a), la figure montre que la plage d'humidité optimale pour une bonne qualité d'air intérieur est entre 40% et 60%.



**Figure I.1** : Plages d'humidité favorable à la croissance de polluants (Roulet, 2004)

### I.2.1.2 Confort hygrothermique des habitants

Le confort hygrothermique est défini par la société américaine ASHRAE « American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers » comme l'ensemble des conditions requises pour assurer une satisfaction et un bien être des occupants. Le confort hygrothermique est une notion complexe qui dépend de plusieurs variables de natures différentes (physiologique, psychologique et physique ...).

Dans le travail expérimental mené par (Fang et al., 2000) sur le confort hygrothermique, les résultats ont montré que la température et l'humidité ont un impact significatif à la fois sur le ressenti immédiat et adaptative du degré de confort intérieur. D'un autre côté, la baisse de la température et le taux d'humidité au niveau de l'air intérieur peut améliorer le confort thermique. En effet, la satisfaction des occupants par rapport au confort thermique augmente linéairement avec la diminution de l'enthalpie de l'air.

En outre, dans une ambiance présentant un inconfort hygrothermique, il a été vérifié (Toftum et al., 1998), que des difficultés respiratoires des occupants peuvent être observées.

Bien que des niveaux élevés ne soient pas favorable pour un confort hygrothermique des occupants, de très faibles taux d'humidité peuvent causer des infections respiratoires. En outre, un faible taux d'humidité est également responsable de chocs électrostatique de vêtements, tapis.

Dans la littérature, deux approches principales sont développés pour l'évaluation du confort thermique, l'approche analytique ou statique et l'approche adaptative.

L'approche analytique se focalise sur l'aspect physique et les échanges thermiques entre l'occupant et son environnement thermique, elle est basée sur une étude expérimentale de Fanger (Kameni et al., 2013). Dans cette approche deux indicateurs sont définis pour évaluer le confort thermique : PMV « Predicted Mean Vote » et PPD « Predicted Percentage Dissatisfied ». La norme NF ISO 7730 (Koffi, 2009) est basée sur l'approche statique, dans le

cas où le paramètre PMV est compris entre 1 et -1, le confort thermique des occupants est assuré.

L'approche adaptative s'intéresse aux mécanismes rétroactifs de l'adaptation de l'occupant dans son environnement (Brager and De Dear, 1998). Des limites de températures opératives ont été proposées dans la norme NF EN 15251 en se référant à cette approche.

Dans leur étude, (Moujalled et al., 2008) ont réussi à coupler les deux approches considérées comme complémentaires afin de mieux évaluer le confort thermique. Les auteurs proposent une approche systémique qui caractérise le confort thermique à l'aide d'un système microscopique composé de deux sous-systèmes complexes qui assurent une interaction entre le bâtiment et l'occupant (Santamouris et al., 2007).

## I.2.2 Pathologies structurelles causées par l'humidité

L'humidité a une action directe et indirecte sur l'enveloppe du bâtiment. En effet, dans un environnement présentant une hygrométrie défavorable, plusieurs pathologies peuvent se manifester au niveau de la paroi du bâtiment. Ces dégradations sont ou bien d'ordre structurel comme la baisse des performances mécaniques et la détérioration dû au phénomène gel/dégel ainsi que la variation dimensionnelle. Elles peuvent être aussi d'ordre biologique et chimique comme le développement des moisissures à la surface de la paroi ou encore la corrosion des structures métalliques. La Figure I.2 donne quelques exemples des désordres et problèmes causés par l'humidité. Les principales pathologies liées à l'humidité au niveau l'enveloppe sont détaillés dans ce qui suit.



(a) Corrosion des aciers



(b) Détérioration du plafond



(c) Apparition de moisissures



(d) Fissurations



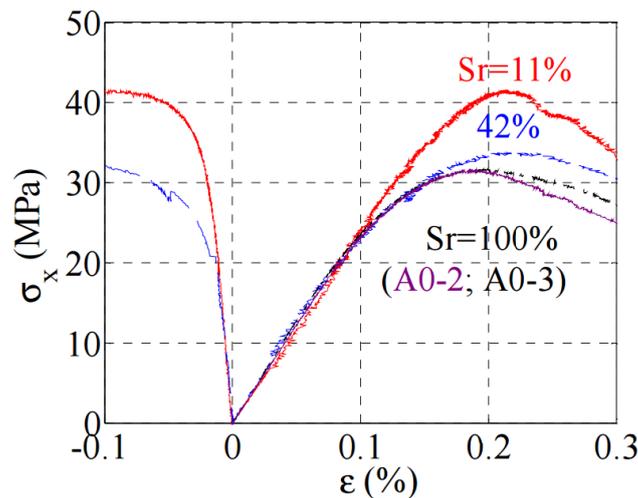
(d) Désordres dus au cycle gel/dégel

**Figure I.2:** Exemples de dégradations causées par l'humidité  
(Zhong and Braun, 2008)

I.2.2.1 Dégradation des performances mécaniques et variation dimensionnelle

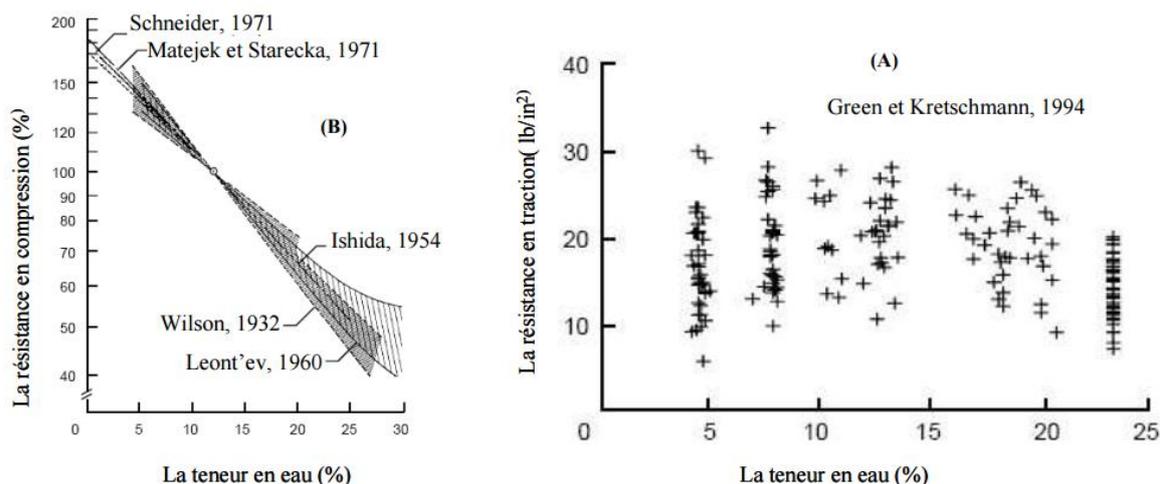
Les propriétés mécaniques d'un matériau de construction peuvent être fortement affectées par un taux d'humidité élevés, la résistance mécanique des matériaux est inversement proportionnelle à leur teneur en eau (Coignet, 2006). En effet, dans un environnement à haute humidité relative, le matériau a tendance à stocker de l'humidité par phénomène d'adsorption, ce qui engendre une augmentation de la teneur en eau et par conséquent une baisse de la résistance mécanique. Cela peut causer des dégradations structurelles au niveau des bâtiments.

(Vu, 2007), dans son travail a évalué la variation de la contrainte à la rupture d'un béton en fonction du degré de saturation, les résultats ont montré que la résistance du béton diminue de 31% entre l'état saturé et l'état sec (Figure I.3). Dans le même sens, une étude sur le plâtre humide a montré que son comportement mécanique est non linéaire entraînant une diminution de 50% des propriétés de rupture entre l'état sec et l'état saturé (Meille, 2001). Le même comportement a été observé pour la pierre de tuffeau, avec une baisse de la résistance à la compression de 55% entre les deux états sec et saturé (Beck et al., 2003).



**Figure I.3:** Essais de compression simple effectués sur des échantillons de béton de différents degrés de saturation (Sr) (Vu, 2007)

D'autres résultats expérimentaux relatifs à un autre matériau, le bois, ont conclu que, sous un chargement mécanique, lorsque ce matériau est soumis à une variation hydrique, les contraintes internes se relaxent et sa déformation différée s'accélère. Cela confirme qu'il existe un couplage entre la contrainte mécanique et la variation de la teneur en eau du bois (Navi and Heger, 2005). Pour une structure porteuse (entre le point de saturation et 8% de teneur en eau), toutes les propriétés mécaniques du bois progressent quand le bois tend vers un état sec. Toutefois, pour une structure en extérieure dont l'humidité du bois oscille entre 12 et 20% certaines de ces propriétés mécaniques varient d'environ 50% (Green and Kreschmann, 1994). La Figure I.4 présente la variation de la résistance à la compression et à la traction du bois en fonction de la teneur en eau pour différentes campagnes expérimentales.



**Figure I.4:** (A) Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau du bois, (B) Résistance à la traction en fonction de la teneur en eau du bois (Abbasi et al., 2006)

En plus de la modification des propriétés mécaniques, une présence excessive de l'humidité engendre une variation dimensionnelle qui peut être irréversible ce qui mène à une probable apparition de dégradations structurelles des bâtiments. En effet, dans un environnement humide, les matériaux hygroscopiques, avec une capacité de stockage d'humidité élevée, se dilatent. C'est le cas du béton, du bois et de la brique. Le Tableau I.1 résume les coefficients de variation dimensionnelle en fonction de la teneur en eau de quelques matériaux de construction (Cognard, 2002).

**Tableau I.1:** Coefficients de variation dimensionnelle en fonction de la teneur en eau de quelques matériaux de construction (Cognard, 2002)

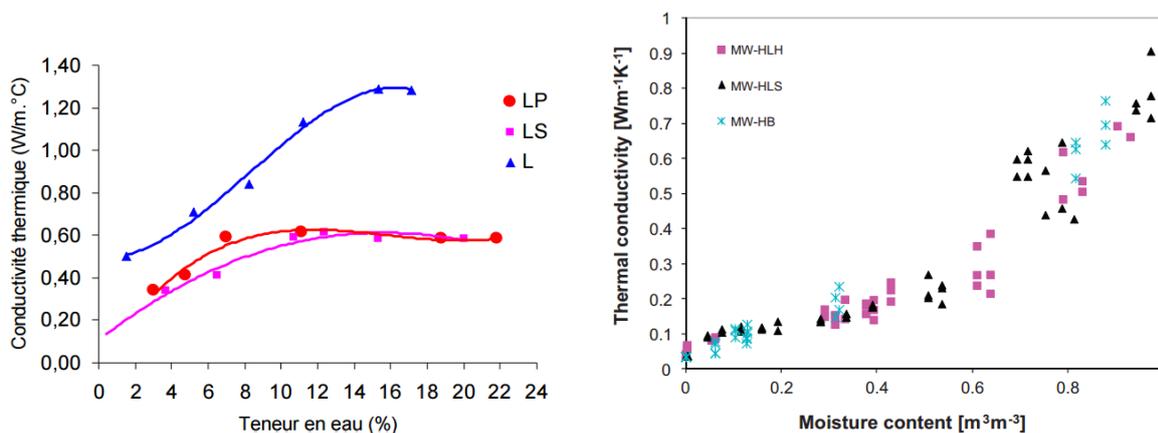
Matériaux	Coefficient de variation dimensionnelle	
	réversibles	Irréversibles
Béton avec agrégats courants	0.02 à 0.06	-0.03 à -0.07
Béton avec agrégats légers	0.03 à 0.06	-0.03 à -0.08
Parpaing avec agrégats courants	0.02 à 0.04	-0.02 à -0.06
Parpaing avec agrégats légers	0.03 à 0.06	-0.02 à -0.06
Briques	0.02	0.02 à 0.07
Calcaire	0.01	Non
Grès	0.07	Non

### I.2.2.2 Dégradation des performances thermiques

Une exposition continue à un environnement excessivement humide affecte considérablement les performances thermiques des matériaux de construction particulièrement les isolants thermiques et influe négativement sur les consommations énergétiques des constructions.

En effet, dans un milieu humide super hygroscopique, le matériau poreux adsorbe de l'humidité qui forme des ponts capillaires et remplace les vides initialement rempli d'air. Cela accentue le transfert de chaleur par conduction, vu que la conductivité thermique de l'eau est d'environ 25 fois plus grande que celle de l'air ( $\lambda_{eau} = 0.6 [W/(m^2K)]$  et  $\lambda_{air} = 0.024 [W/(m^2K)]$ ).

Plusieurs études expérimentales ont été réalisées sur différents matériaux de construction afin d'évaluer la variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau. Les résultats ont confirmé la grande influence de l'état hydrique du matériau sur la valeur de la conductivité thermique. Parmi ces travaux, celui de (Jerman and Černý, 2012), réalisé sur différents types d'isolants, où ils ont montré que la conductivité thermique de la laine minérale augmente de 90% entre l'état sec et l'état saturé (Figure I.5), cette hausse est de 40% pour le polystyrène. Le même comportement est observé sur d'autres matériaux (Taoukil et al., 2013), (Sotehi, 2010), l'augmentation de la conductivité thermique entre l'état sec et saturé peut atteindre 140% (Figure I.5) (Meukam, 2004).

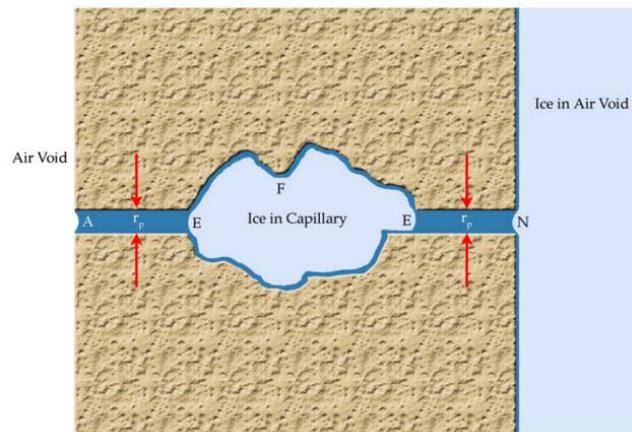


**Figure I.5:** Variation de la conductivité thermique des matériaux de construction en fonction de la teneur en eau : Briques (à gauche) (Meukam, 2004) et laines minérales (à droite) (Jerman and Černý, 2012)

### I.2.2.3 Effets des cycles de gel/dégel des matériaux

Les ouvrages soumis à des ambiances hivernales rigoureuses peuvent montrer des signes d'altérations (fissuration de masse, écaillage) à cause de la répétition de cycles gel/dégel. En effet, un matériau de construction exposé à des températures inférieures à zéro dans un environnement à forte hygrométrie, voit une partie de l'eau contenue dans les pores geler. La nature de la structure poreuse du matériau a un impact important sur le processus de gel/dégel d'eau (Mamillan, 1994), seule l'eau contenue dans les pores les plus gros (porosité capillaire) gèle. L'eau chimiquement liée ou adsorbée sur la surface des pores les plus fins est fortement structurée et ne peut cristalliser sous forme de glace que pour des températures très basses (inférieure à  $-78^{\circ}C$ ) ce qui n'est pas le cas dans le domaine du bâtiment.

Lors du phénomène de gel, la masse volumique de l'eau à l'intérieur des pores augmente d'environ 9% ce qui engendre un gonflement du matériau poreux (Valenza and Scherer, 2007). En outre, l'expansion volumique du matériau poreux est générée aussi par des pressions hydrauliques sur l'eau des capillaires restée à l'état liquide (Figure I.6). De même, l'effet d'osmose, qui est dû à une différence de concentration des sels présents dans l'eau liquide dans les pores les plus fin et au voisinage de la glace entraîne le développement de pression dites osmotiques afin d'assurer un certain équilibre interne.



**Figure I.6:** Phénomène de gel d'eau dans un pore (Valenza and Scherer, 2007)

Les désordres liés à la répétitions des cycles de gel/dégel sont principalement d'ordre structurel, provoquant des microfissurations ou fissurations, particulièrement, pour les matériaux cimentaires, et des écaillages de la surface. Ces désordres sont susceptibles d'apparaître lorsque les contraintes internes créées deviennent supérieures à la résistance à la traction du matériau. Vu la complexité du phénomène gel/dégel dans les matériaux poreux et sa nature microscopique, plusieurs investigations expérimentales (Powers, 1949), (Litvan, 1975), (Lisø et al., 2007), principalement sur des matériaux cimentaires, ont été réalisées dans le but de mieux comprendre le processus de gel dans les matériaux de construction.

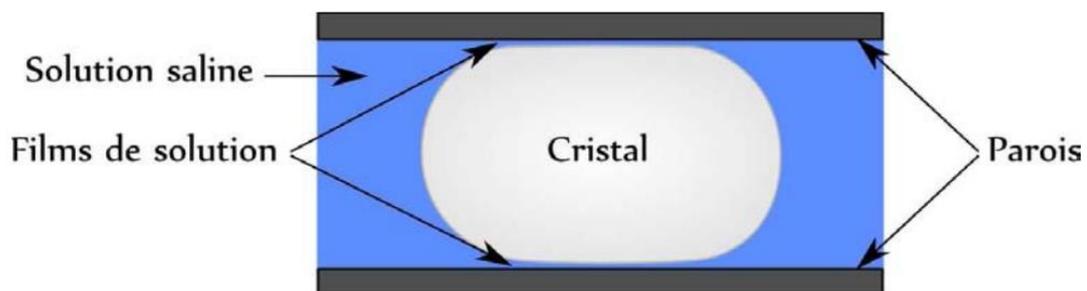
Par ailleurs, plusieurs modèles microscopiques ont été développés dans le but de prédire les dégradations causées par ce phénomène de gel/dégel. Ainsi, le modèle de (Zuber and Marchand, 2000), (Zuber, 2002), (Zuber, 2004) ont essayé de déterminer les déformations macroscopiques à partir de la simple connaissance de la distribution de la taille des pores. L'objectif de leur étude était, d'une part, d'analyser l'influence des paramètres physiques tels que la porosité, la perméabilité et le module d'élasticité du matériau ; d'autre part, de tester l'aptitude du modèle développé à décrire le comportement des matériaux en terre cuite. Le modèle proposé considère à la fois les phénomènes mécaniques à l'échelle macroscopique ainsi que les phénomènes d'équilibres thermodynamiques à l'échelle du pore.

#### I.2.2.4 Effets de la cristallisation des sels

L'exposition des enveloppes de bâtiments à un environnement contenant des sels comme les chlorures de sodium, les sulfates de magnésium, de sodium et de calcium (Nord, 1992) et (Andrés et al., 2009), peut engendrer des détériorations au niveau des matériaux constituant la paroi. L'origine de ces sels est soit interne, de la composition chimique du matériau lui-même ou la solution interstitielle comme la brique mal cuite (Veran-Tissoires, 2011), soit externe dissous dans l'air humide comme le brouillard salin ou l'eau de mer dans les régions maritimes (Aït-Mokhtar et al., 2004), (Friedmann et al., 2008) et (Nguyen and Amiri, 2014). Plusieurs auteurs ont présenté dans leurs travaux les différentes sources des sels dans le processus de dégradation des matériaux de construction. A titre d'exemple, l'étude de (Arnold and Zehnder, 1987), l'état de l'art de (Price, 1998) et l'ouvrage de (Goudie and Viles, 1997).

Dans le cas des sels dissous dans l'air humide, les matériaux poreux vont d'abord être contaminés en surface quand les gouttelettes d'eau salée s'y déposent. Lors de la pénétration de l'eau dans le milieu poreux, elle va dissoudre ces sels et les faire entrer dans le matériau. Par la suite, l'évaporation de l'eau ou la chute de la température engendre une cristallisation des sels à la surface ou en profondeur, pouvant par conséquent provoquer des dégradations structurelles au niveau du matériau poreux.

Lors de la cristallisation des sels au niveau du milieu poreux, des contraintes sur la matrice solide sont créées (Figure I.7). Quand ces pressions exercées par les cristaux dépassent la résistance de la matrice solide des dégradations sont observées à l'échelle macroscopique.

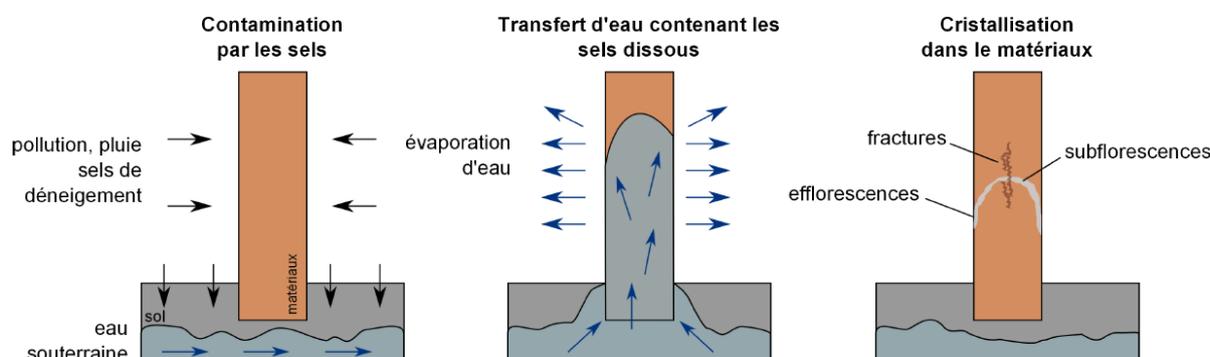


**Figure I.7:** schématisation de la cristallisation dans un pore (Veran-Tissoires, 2011)

L'apparition des pathologies dues à la cristallisation des sels dépend de plusieurs paramètres, notamment la sursaturation du sel, la taille des pores et l'amplitude de la force de répulsion entre les cristaux et la surface des pores (Scherer, 2004). Une variété de facteurs influent sur la sursaturation comme la nature du sel (qui affecte l'aptitude à la nucléation) et la quantité de la solution interstitielle (Valenza and Scherer, 2007).

A l'échelle macroscopique, la cristallisation cause des dégradations à la surface de la paroi par la formation d'efflorescence qui ne représente pas une détérioration structurelle car ce processus n'affecte pas la matrice solide du matériau poreux (Lewin, 1982) et (Rodriguez and

Doehne, 1999). En revanche, dans le cas d'une cristallisation interne (formation d'efflorescences), les contraintes exercées sur la matrice solide sont susceptibles de provoquer des dégâts au niveau de la structure comme l'écaillage et l'apparition de fissures. La Figure I.8 schématise les causes de la cristallisation des sels et les types de dégradations dus à ce processus.



**Figure I.8:** Processus de cristallisation des sels (Berger, 2014)

Du point de vu de la modélisation prédictive des dégradations liées à la cristallisation, la plupart des travaux sont basés sur un couplage entre une modélisation microscopique du phénomène de cristallisation au niveau du pore en décrivant les interactions mécaniques entre le cristal et la surface du pore, et une modélisation macroscopique des transferts de chaleur et de masse. Dans l'étude de (Berger, 2014), un état de l'art a été établi sur les modèles microscopiques de cristallisation tels que ceux proposés par (Koniorczyk and Gawin, 2012), (Nguyen et al., 2008), (Nicolai, 2008), (Espinosa et al., 2008), (Poupeleer, 2007) et celle de (Derluyn, 2006).

#### I.2.2.5 Corrosion des métaux

La corrosion des métaux est définie comme le phénomène d'oxydation du métal lors de son interaction chimique, électrochimique ou biochimique avec le milieu ambiant. Elle correspond à une réaction superficielle irréversible d'un matériau avec son environnement qui implique une "consommation" du matériau ou la dissolution dans ce matériau d'une composante de l'environnement. La corrosion des métaux est basée sur le principe suivant : « toute cause qui tend à déplacer l'équilibre en favorisant la mise en solution du métal sous forme d'ions engendre la corrosion » (Touzain, 1996).

Dans le domaine de la construction, l'humidité a une influence indirecte sur la corrosion des composants métalliques du bâtiment. En effet, les dégradations causées par la corrosion est soit surfacique engendrant des salissures des façades, soit à l'intérieur de la paroi, particulièrement pour les matériaux enrobant des métaux comme le béton armé où les dégradations peuvent mettre en cause la stabilité et la résistance de la construction.

La corrosion superficielle se produit quand la température à la surface des composants métalliques du bâtiment atteint une température de rosé. Cela mène à une condensation à la surface de l'élément métallique avec une dissolution des gaz oxydants présents dans l'atmosphère (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>,...). Ce type de corrosion est influencé par plusieurs paramètres, notamment la nature du métal, l'état de sa surface et son exposition, le taux de gaz oxydants dans l'atmosphère, les conditions thermiques, hydriques et climatiques (vents et pluies) (Berger, 2014).

Concernant la corrosion à l'intérieur de la paroi, qui se produit généralement au niveau des armatures des bétons armés, l'humidité a un rôle important dans ce processus. En effet l'eau présent dans le matériau joue un rôle important dans le transfert des agents agressifs tels que les chlorures ou les sulfates jusqu'à atteindre la surface de l'armature.

Les ions chlorures provenant des sources extérieures pénètrent dans le béton avec une combinaison de plusieurs mécanismes de transport. Les plus importants sont la diffusion ionique due au gradient de la concentration des chlorures entre la face exposée et la solution poreuse de la matrice cimentaire, l'adsorption capillaire d'eau qui contient les chlorures dans les bétons non saturées ainsi que les chlorures transportés dans le béton par un débit d'eau lorsque la pression hydrostatique augmente avec la profondeur de l'enrobage (Nguyen, 2010), (Friedmann et al., 2008) et (Aït-Mokhtar et al., 2004).

Pour la plus part des travaux réalisés sur le transfert des chlorures dans le béton, la diffusion est toujours considérée comme le mécanisme principal du transport des ions chlorures, en imposant comme hypothèse que le béton est totalement saturé. Cependant, il s'avère que les bétons partiellement saturés comme les structures exposées à des cycles d'humidification séchage sont souvent les premiers à être dégradés par la corrosion causée par l'attaque des ions de chlorures (Nguyen and Amiri, 2014). Le profil des chlorures dans ces structures dépend essentiellement de la distribution de l'humidité au niveau de l'enrobage, car le transfert par diffusion est beaucoup plus lent par rapport au transfert par advection due au flux d'humidité dans le béton. C'est pour cela que la détermination du profil des transferts d'humidité et le degré de saturation de l'enrobage sont des paramètres très importants dans ce cas (Nguyen, 2010).

Concernant la prédiction de dégradations causées par le processus de corrosion dans les parois de bâtiment, plusieurs travaux ont été réalisés dans la littérature. Comme le travail de (Martin Pérez, 1999) qui a réalisé un couplage entre le phénomène de transfert des chlorures dans le béton et le phénomène de corrosion tout en estimant l'état des contraintes au niveau de l'enrobage avec un modèle dit modèle d'anneau de béton (Tepfers, 1979) et la perte de masse au niveau de l'acier (Andrade and Alonso, 1996).

D'autres études peuvent être citées, comme les travaux de (Zelinka et al., 2007), (Zelinka et al., 2010) et (Zelinka and Stone, 2011) sur la corrosion des métaux présents dans les

structures en bois, où une campagne expérimentale a été réalisée avec une proposition d'un modèle empirique de prédiction des dégradations causées par la corrosion.

#### I.2.2.6 Apparition de moisissures

Les dégradations biologiques et les apparitions de moisissures représentent les pathologies les plus fréquentes liées à l'humidité dans le bâtiment. Ce type de problèmes engendre plusieurs détériorations au niveau des constructions comme la dégradation de finitions intérieures de l'enveloppe. En outre, ils représentent un risque important sur la santé des occupants en raison de la sédimentation et la propagation des agents pathogènes (Platt et al., 1989), (Lacey, 1994), (Piecková and Jesenská, 1999) et (Burr et al., 2007), particulièrement dans le cas des espèces dangereuses de moisissures comme les *aspergillus*, *fumigatus* ou *stachybotris* (Boutin-Forzano et al., 2004).

Les principales conditions favorables à la formation des moisissures peuvent se résumer dans les points suivants :

- Un apport d'oxygène suffisant ;
- Une température stable (idéalement entre 5 et 25°C) ;
- Un substrat nourrissant : substances organiques décomposables (cellulose, colle de papier peint) ;
- Une humidité suffisante.

Les trois premiers facteurs, à l'origine d'apparition des moisissures étant normalement toujours présents dans une habitation, il est important de réduire la présence d'humidité au niveau de l'ambiance habitable. Dans une étude sur les modèles de prédiction d'apparition de moisissures dans le bâtiment menée par (Moon and Augenbroe, 2003), les auteurs ont résumé les différents paramètres favorisant le développement des moisissures dans le bâtiment sont résumés dans le Tableau I.2.

**Tableau I.2:** Principales causes de développement de moisissures (Moon and Augenbroe, 2003)

Causes	Problèmes favorisant le développement des moisissures
Défauts des systèmes HVAC	Infiltration directe de l'air humide Gradient de pression négative à travers l'enveloppe Élimination inadéquate de l'humidité (conduite de retour) Ventilation inadéquate
Défauts de conception	Mauvaise disposition du pare-vapeur Surfaces intérieures imperméables Isolation inadéquate et apparition de ponts thermiques Fuites de précipitation Drainage défectueux
Utilisation du bâtiment	Haute densité d'occupation Mauvaises habitudes culinaires Mauvais réglages de l'air conditionné Stockage de bois, papiers ou livres
Maintenance du bâtiment	Entretien et fonctionnement inadéquats des équipements Nettoyages Vieillessement des matériaux de construction
Défauts de construction	Mauvais drainage du site de construction Localisation et orientation de la construction Fuites d'eau à partir de la tuyauterie, toit, sous-sol

La prédiction de l'apparition de moisissures dans le bâtiment est, d'un côté, un exercice difficile vu la complexité du phénomène biologique de développement de ces agents. D'un autre côté, une détermination précise des différents paramètres influençant sur le développement de moisissures est aussi difficile, tels que le comportement hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment, particulièrement au niveau de la surface intérieure. Cela nécessite une modélisation détaillée des transferts hygrothermiques dans le bâtiment tout en assurant une interaction dynamique entre l'enveloppe et l'ambiance habitable.

(Vereecken and Roels, 2012), ont dressé dans leur travail un état de l'art sur les différents modèles existant pour la prédiction du développement de moisissures et leur influence sur l'évaluation des risques dus aux moisissures. Dans leur étude, les modèles de prédiction du développement de moisissures sont regroupés dans deux catégories, les modèles statiques et dynamiques.

Les modèles statiques sont des modèles simplifiés qui permettent juste d'indiquer le début d'apparition de dégradation biologique. Parmi ces modèles, le modèle développé dans le cadre de l'annexe 14 de l'agence internationale de l'énergie (IEA-Annex 14, 1990) et le modèle Time of Wetness (Adan, 1994) qui est basé sur une campagne expérimentale sur l'évaluation du développement des champignons en fonction de la teneur en eau du matériau.

Les modèles dynamiques permettent à la fois la détermination de l'initiation de la dégradation biologique ainsi que le développement des moisissures. Ce type de modèle est généralement un couplage dynamique entre un modèle de transfert hygrothermique dans l'enveloppe du bâtiment et un modèle décrivant le développement des agents biologiques. Parmi ces modèles, nous trouvons le modèle VTT (Hukka and Viitanen, 1999), celui de (Viitanen, 1996) et (Ojanen et al., 2011), les courbes isoplèthes de (Ayerst, 1969), (Smith and Hill, 1982), (Clarke et al., 1999) et (Rowan et al., 1999) et enfin le modèle Biohygrothermal proposé par (Krus et al., 2007).

Le Tableau I.3 réalisé par (Berger et al., 2013a), en s'inspirant de la recherche bibliographique menée par (Vereecken and Roels, 2012), résume les principaux modèles de développement des moisissures et leurs principaux paramètres utilisés.

**Tableau I.3:** Principaux paramètres utilisés par les modèles de développement de moisissures (Berger et al., 2013)

Modèle	AIE Annexe 41	Time of Wetness	Modèle VTT	Courbes isoplèthes	Bio-hygrothermal
Influence de T	oui	Non	Oui	Oui	Oui
Influence en HR	Indirectement	Non	Oui	Oui	Oui
Prise en compte des matériaux	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Développement (D) ou Initiation (I)	I	I	D	D (modéré)	D
Paramètres d'entrées	$T_{int}, T_{ext}$ $T_{int, surface}$	$HR_{int}$	$T_{in}, HR_{int}$	$T_{in}, HR_{int}$	$T_{in}, HR_{int}$ bilan hydrique des spores
Indicateurs	$\tau = \frac{T_s^{min} - T_e}{T_i - T_e}$ $\geq 0.7$	Ratio de temps où $HR_{int} > 80\%$	Indice de moisissure M	Courbes Isoplèthes	Teneur en eau minimale de la spore
Couplage modèle de bâtiment	Non	Non	Oui	ESP-r	Wufi-bio

### I.2.3 Indicateurs de durabilité : pathologies liées à l'humidité

L'humidité représente la première cause de dégradation au niveau du bâtiment, les pathologies liées à l'humidité, présentées précédemment, peuvent être aussi regroupées selon le rôle de l'humidité en quatre catégories (Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat. & Collombet, 1989):

- Pathologies dues à l'action propre de l'humidité comme la modification des propriétés thermique et mécanique ainsi que la variation dimensionnelle ;
- Pathologies dont l'humidité est le vecteur comme le gel des matériaux et la cristallisation des sels ;
- Pathologies se développant en milieu humide comme le développement des moisissures et la corrosion des métaux ;
- Pathologies au niveau des ambiances habitables.

Ces pathologies dépendent, en plus de l'état hygrothermique de plusieurs paramètres ce qui rend leur évaluation très complexe, particulièrement pour les pathologies de nature biologiques ou chimiques. Dans l'état de l'art proposé par (Berger et al., 2013a) sur les pathologies liées à l'humidité dans le bâtiment un tableau (Tableau I.4) récapitulatif a été dressé où des propositions de critères et de facteurs d'apparition de pathologies ainsi que les paramètres d'entrée nécessaires pour leur détermination ont été répertoriés. Ces critères représentent une approche globale permettant la détermination des risques de pathologies liées à l'humidité.

**Tableau I.4:** Synthèse des critères d'apparition de pathologies liées à l'humidité (Berger et al., 2013)

Pathologies liées à l'humidité	Paramètres d'entrée	Facteurs clé	Critère
Modification des propriétés thermiques	Champs spatio-temporels de teneur en eau $\omega$ Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau du matériau $\lambda(\omega)$	Coefficient de transfert thermique effectif $U_{eff}$	$U_{eff} > U_{crit}$ avec $U_{crit} = 1.05 \cdot U_{decl}$ $U_{decl}$ coefficient de transfert déclaré (EN-ISO 10456)
	Champs spatio-temporels de teneur en eau $\omega$ Variation de la résistance mécanique en fonction de la teneur en eau du matériau $R_{mec}(\omega)$	Résistance mécanique $R_{mec}$	$R_{mec} < R_{crit}$ Avec $R_{crit}$ résistance critique du matériau
	Champs spatio-temporels de teneur en eau $\omega$ Variation du coefficient de dilatation en fonction de la teneur en eau du matériau $D(\omega)$	Coefficient de dilatation $D$	Variation de 10% par rapport à l'état sec
Variation dimensionnelle			
Gel des matériaux	Champs spatio-temporels de la température $T$ dans la paroi	Température $T$	$T < T_{sol}$ Avec $T_{sol}$ température de solidification de l'eau
Corrosion des métaux	Champs spatio-temporels de la température $T$ dans la paroi	Température de surface du métal $T_{s,met}$	$T_{s,met} < T_{ros}$ Avec $T_{ros}$ température de rosée
Dégradations biologiques	Champs spatio-temporels de la température $T$ et d'humidité relative $\varphi$ Sensibilité du matériau Etat des surfaces	Indice de moisissure $M$	$M > 1$ Avec $M = 1$ développement biologique amorcé
Confort hygrothermique	Température ambiante $T_a$ Pression de vapeur ambiante $P_{v,a}$ Température radiative $T_r$ Métabolisme des occupants $M_{e,t}$ Vitesse de l'air $v_a$ Indice de vêture des occupants $I_{cl}$	Indicateur $PMV$	$PMV \notin [-1, 1]$ Zone d'inconfort hygrothermique
Qualité de l'air intérieure	Température ambiante $T_a$ Pression de vapeur ambiante $P_{v,a}$	Humidité relative ambiante $\varphi_a$	$\varphi_a \notin [0.4; 0.6]$

Enveloppe

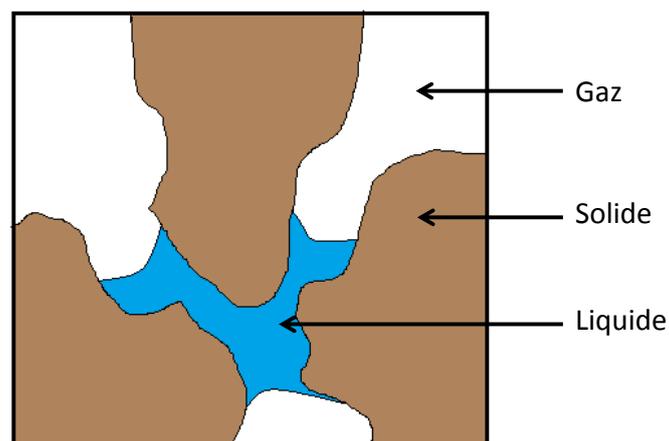
Ambiances Habitables

## I.3 Mécanismes des transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux

### I.3.1 Milieux poreux

Dans le domaine de la physique du bâtiment, les matériaux de construction sont considérés comme des milieux poreux où se produisent les différents phénomènes de transferts et d'échanges de masse et de chaleur.

Un milieu poreux est composé d'une matrice solide rigide comportant des cavités et des pores isolés ou reliés, formant ainsi un espace poreux qui peut être occupé par un ou plusieurs fluides, sous forme liquide ou gazeuse (Dařan, 2013) (Figure I.9). Généralement un milieu poreux est décrit par différentes grandeurs caractéristiques qui donnent des informations sur l'espace poral total disponible (porosité et distribution des pores) et sa géométrie (tortuosité et connectivité).



**Figure I.9:** Représentation schématique d'un milieu poreux

La porosité correspond à un rapport entre le volume total du matériau et celui occupé par les pores (équation I.1). Ce paramètre fournit une information quantitative sur les volumes respectifs des deux espaces solide et poreux d'un matériau. Cependant, vu la nature micro-structurale complexe des matériaux de construction, il existe dans le matériau des pores isolés inaccessibles qui n'ont pas une influence sur les phénomènes de transferts notamment le transfert d'humidité. Dans la suite de ce document la notion de la porosité sous-entend la porosité ouverte qui prend uniquement en considération les pores accessibles.

$$\varepsilon_p = \frac{V_p}{V_{total}} \quad (\text{I.1})$$

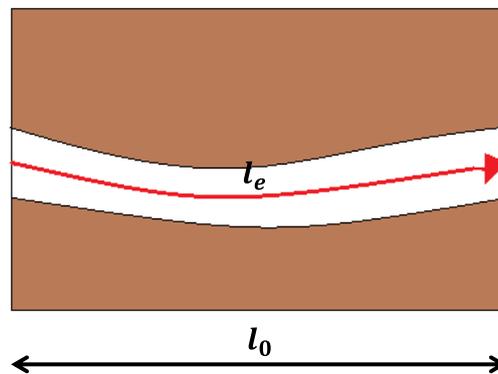
Avec  $\varepsilon_p$  [%] est la porosité ouverte,  $V_{total}$  [ $m^3$ ] et  $V_p$  [ $m^3$ ] représentent respectivement le volume total du matériau et le volume des pores accessibles.

Il est à noter que les pores sont classés dans trois domaines différents selon la classification de l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC, 1994) :

- Les micropores d'un diamètre inférieur à 2nm
- Les mésopores d'un diamètre compris entre 2nm et 50nm
- Les macropores d'un diamètre supérieur à 50nm

Deux paramètres micro-structurels importants sont utilisés dans la caractérisation de la structure poreuse : la tortuosité et la connectivité.

La tortuosité ( $\tau$ ) quantifie la porosité inefficace par rapport aux phénomènes de transfert, elle reflète aussi une mesure de l'écart à la rectitude des chemins traversés du matériau (Figure I.10).



**Figure I.10:** Illustration schématique de la tortuosité

Cette grandeur est généralement déterminée comme le ratio entre la longueur moyenne du pore ( $l_e$ ) et l'épaisseur de l'échantillon ( $l_0$ ) (équation I.2).

$$\tau = \frac{l_e}{l_0} \quad \text{(I.2)}$$

La connectivité qui représente le degré de connexion et de liaison entre les pores. Cette propriété donne une information importante sur les écoulements de fluides et les chemins traversés dans une structure poreuse. Fischmeister (Dullien, 1979) l'a défini comme le plus grand nombre de branches du réseau pouvant être coupées sans créer de partie indépendantes (équation I.3).

$$C = b - n + 1 \quad \text{(I.3)}$$

Où  $C$  est la connectivité,  $b$  représente le nombre de branche et  $n$  le nombre de nœuds.

En plus des grandeurs micro-structurelles citées précédemment, l'état d'un milieu poreux peut être caractérisé par d'autres paramètres résumés dans le Tableau I.5.

**Tableau I.5:** Grandeurs décrivant l'état d'un milieu poreux

Paramètre		Expression
Masse volumique	$\rho_s = m_s/V_0$	$V$ : Volume
Surface spécifique	$s = S/V_0$	$S$ : Surface $m$ : Masse
Teneur en eau	$u = m_l/V_0$	$P_v$ : Pression de vapeur d'eau
Teneur en eau massique	$\omega = m_l/V_s$	$P_{v,sat}$ : Pression de vapeur saturante
Teneur en eau volumique	$\theta_l = V_l/V_0$	<u>Indices</u>
Teneur en vapeur en eau	$u_v = m_v/V_0$	0 : Apparent s : Solide l : Liquide
Humidité relative	$HR = P_v/P_{v,sat}$	v : Vapeur d'eau

### I.3.2 Transfert et stockage d'humidité dans les milieux poreux

#### I.3.2.1 Diffusion

Comme il a été mentionné précédemment, la nature de la structure poreuse à une grande influence sur les phénomènes de transfert d'humidité dans un matériau. En effet, pour le transfert de la vapeur d'eau les mécanismes de diffusion peuvent être différents selon la taille des pores.

Dans des conditions isothermes et selon le diamètre du pore, le transfert de la vapeur d'eau dans les matériaux de construction poreux se produit sous trois modes différents.

Au niveau des pores avec un diamètre supérieur à  $10^{-6}$ m, le mode de transfert de la vapeur d'eau prédominant est la diffusion moléculaire ou la diffusion de Fick (Gertis, 1991). Ce type de transfert de vapeur d'eau est gouverné par la collision entre les particules ou les molécules sans aucune interaction avec la matrice solide (Figure I.11). Pour décrire la diffusion moléculaire, De Vries (Philip and De Vries, 1957) a proposé un coefficient de diffusion décrit dans l'équation I.4.

$$D_a = c \left( \frac{P_0}{P} \right) \left( \frac{T}{T_0} \right)^n \quad \text{(I.4)}$$

Où la pression et la température de référence prennent respectivement comme valeurs :  $P_0 = 1.01325 \cdot 10^{-5}$ [Pa],  $T_0 = 273.15$ [K].  $c = 2.17 \cdot 10^{-5}$ [m<sup>2</sup>/s] et  $n = 1.88$ .

Un autre mode de transport de vapeur d'eau, la diffusion de KNUDSEN ou l'effusion existe. Ce type de diffusion, où il y a une interaction avec la matrice solide, devient important si la taille des pores est inférieure à  $10^{-8}$ m. En effet quand le diamètre du pore est inférieur au libre parcours moyen, le transfert des molécules d'eau se produit par des collisions entre particules et la paroi du pore (Figure I.11). Cette dernière est considérée comme une surface rugueuse qui impose différentes tortuosités de la voie de diffusion. Ce mode de transport est caractérisé

par le nombre de Knudsen qui est défini par le rapport entre le libre parcours moyen ( $\pi$ ) et le diamètre du pore ( $d$ ) suivant l'équation I.5.

$$K_n = \frac{\pi}{d} \quad (\text{I.5})$$

En considérant un capillaire cylindrique de rayon  $r$  [cm], le coefficient de diffusion de Knudsen  $D_k$  [ $m^2/s$ ] (Delmon, 1969) est défini par la relation I.6.

$$D_k = 9.7 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (\text{I.6})$$

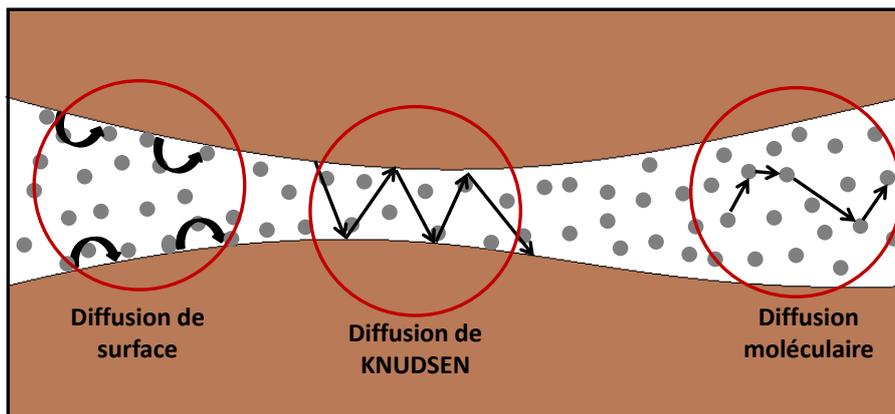
Avec  $T$  est la température absolue et  $M$  est la masse molaire de la vapeur d'eau.

Les molécules de vapeur d'eau adsorbées et fixées au niveau de la surface des pores, peuvent à leur tour se déplacer (Figure I.11) sous une certaine énergie d'activation qui permet la libération et le saut des particules adsorbées (Duong, 1998). Dans ce cas, la densité de flux de vapeur d'eau  $J_{sv}$  [ $kg/(m^2 \cdot s)$ ] est exprimée en fonction de la concentration de la phase adsorbée  $C_\mu$  (équation I.7).

$$J_{sv} = -D_s \nabla C_\mu \quad (\text{I.7})$$

Où  $D_s$  [ $m^2/s$ ] est le coefficient de diffusion au niveau de la surface.

En supposant un équilibre local entre la phase adsorbée et les phases libres, l'équation peut être exprimée en termes de concentration de la phase gazeuse. Cette hypothèse est acceptable vu le taux d'adsorption qui est plus important que les cinétiques de diffusion dans les deux phases.



**Figure I.11:** Illustration des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore

Selon le mode de diffusion, le transfert des particules de vapeur d'eau dans un milieu poreux est caractérisé par un coefficient de diffusion effectif égale au produit d'une constante près et

le coefficient de diffusion pour chaque type de diffusion (moléculaire, Knudsen ou surfacique) (Trabelsi, 2010). Le Tableau I.6 résume l'expression des coefficients de diffusions effectifs dans le milieu poreux.

**Tableau I.6:** Coefficients de diffusion effectifs dans le milieu poreux (Trabelsi, 2010)

Diffusion moléculaire	Diffusion de Knudsen	Diffusion de surface
$D_v = \left(\frac{\varepsilon}{\tau}\right) D_a$	$D_v = \left(\frac{\varepsilon}{\tau}\right) D_k$	$D_v = (1 - \varepsilon) D_s$

Dans le cas non-isotherme, un autre type de transfert de vapeur d'eau dans le milieu poreux peut se manifester. Ce mode de transfert d'humidité est provoqué par une différence de température. En effet, la diffusion thermique est basée sur la différence entre la masse volumique de l'air sec et celle des molécules de vapeur d'eau, qui cause un mouvement des particules de vapeur du froid au chaud.

### I.3.2.2 Mécanisme de stockage d'humidité

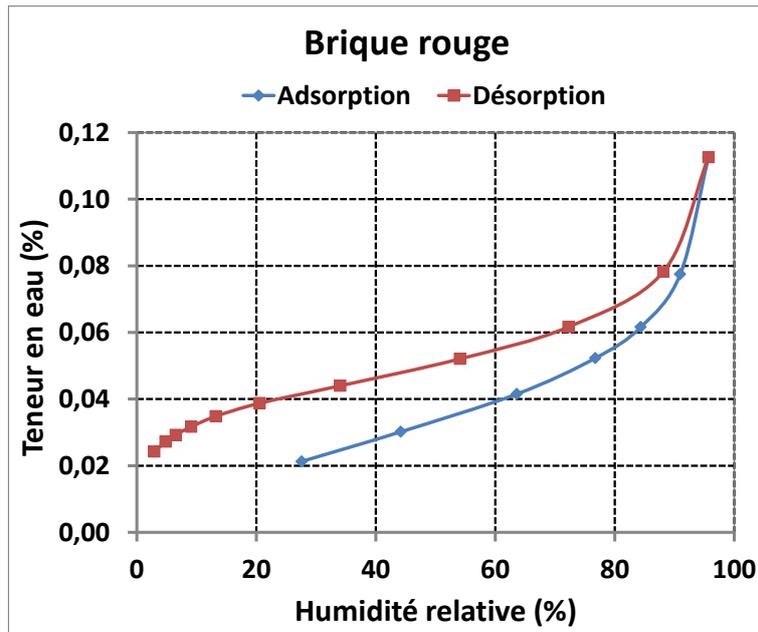
L'adsorption est un phénomène par lequel des molécules d'une phase fluide sont fixées par la surface d'un solide. Ce phénomène se produit quand la concentration du fluide augmente au voisinage de la surface solide. Il existe deux types d'adsorption qui se différencient complètement par les énergies mises en jeu et par leur nature : l'adsorption physique (adsorption de Van der Waals) et l'adsorption chimique (adsorption activée).

L'adsorption physique est un phénomène réversible qui résulte des forces intermoléculaires d'attraction entre les molécules du solide et celles du fluide adsorbé (essentiellement forces de Van Der Waals) (Caro, 2004). Ce type d'adsorption est multimoléculaire sans de sites privilégiés.

L'adsorption chimique résulte d'une interaction chimique qui se traduit par un transfert d'électrons entre le solide et le fluide adsorbé. Il y a alors formation d'un composé à la surface du solide. Contrairement à l'adsorption physique, la chimie sorption est un procédé irréversible qui peut changer la nature du matériau solide.

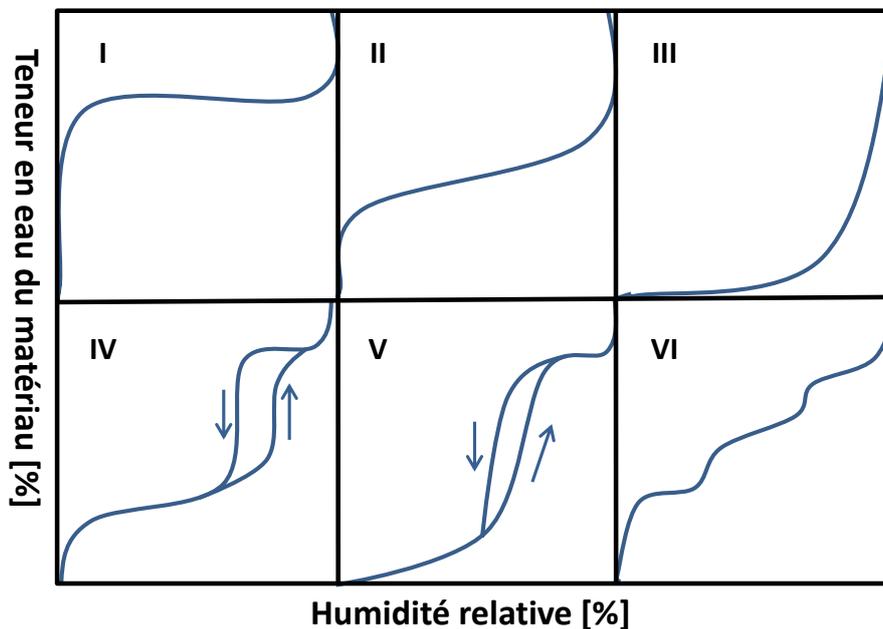
#### *I.3.2.2.1 Isotherme d'adsorption (ou de désorption)*

L'activité de l'eau dans un milieu poreux dépend principalement de sa teneur en eau et de sa température. L'isotherme d'adsorption (ou désorption) est la courbe représentant, pour une température donnée, l'évolution de la teneur en eau d'un matériau en fonction de l'activité de l'eau ou l'humidité relative de l'air en équilibre. La Figure I.12 illustre une courbe d'adsorption et de désorption pour la brique rouge.



**Figure I.12 :** Courbe d'isotherme d'adsorption et de désorption de la brique rouge à 20°C

L'isotherme d'adsorption est déterminée expérimentalement. Selon l'allure de la courbe d'isotherme d'adsorption, une classification a été proposée par (IUPAC, 1994) selon le type de porosité et la nature de l'interaction (Figure I.13)



**Figure I.13:** Classification des isothermes d'adsorption physique donnée par (IUPAC, 1994)

- Type I : la microstructure du milieu est microporeuse. Elle a tendance à se saturer pour des faibles hygrométries. La ligne horizontale signifie qu'aucune adsorption ne se produit pour les valeurs plus élevées d'humidité relative.

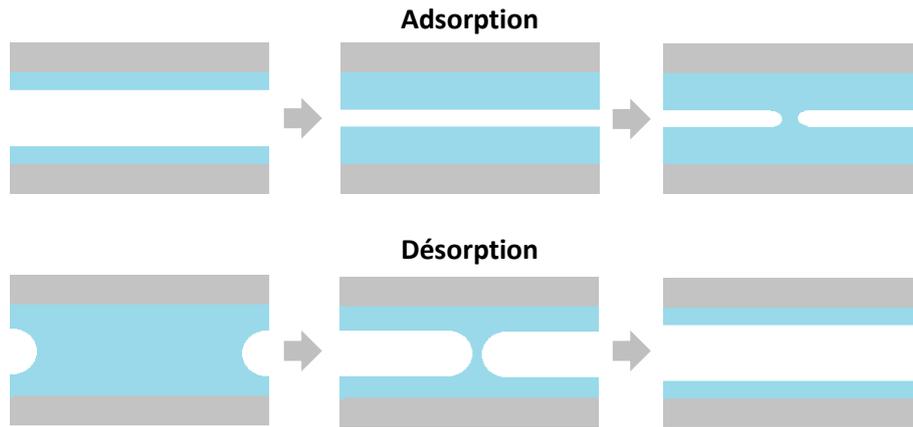
- Type II : le squelette solide est relativement non poreux ou macroporeux. L'adsorption augmente progressivement avec la hausse de l'humidité relative. Le fluide adsorbé peut s'épaissir sur plusieurs couches.
- Type III : le milieu poreux est de même nature que celui du type II. Cependant, l'adsorption du fluide est relativement faible, ce type d'isotherme est rarement rencontré.
- Type IV : l'isotherme est identique que celui du type II pour les basses humidités relatives. Un palier de saturation se développe pour les hautes pressions de vapeur. Le milieu est méso poreux où une condensation capillaire se produit. Le phénomène n'est pas réversible, une hystérèse (hystérésis) est observée entre les phases d'adsorption et de désorption.
- Type V : l'isotherme a le même comportement que celui du type IV avec une faible interaction entre le milieu solide et le fluide adsorbé.
- Type VI : l'isotherme correspond à un milieu poreux dans lequel l'adsorption se fait progressivement en formant plusieurs couches.

Généralement, les isothermes obtenues expérimentalement correspondent rarement de manière rigoureuse à l'un des types précités. L'interprétation d'une isotherme expérimentale se fait en la décomposant en plusieurs portions en fonction des isothermes types.

#### *1.3.2.2.2 Phénomène d'hystérésis*

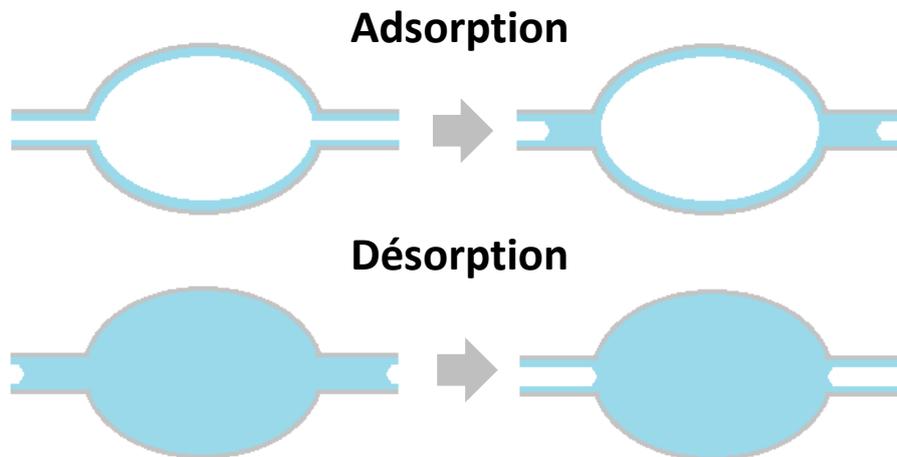
Pour une courbe d'isotherme d'adsorption et de désorption, la relation entre l'humidité relative et la teneur en eau d'un matériau poreux n'est pas univoque. En effet, pour une humidité relative donnée, le matériau poreux tend vers une teneur en eau différente pour la phase d'adsorption que celle de la phase de désorption. Ce comportement est qualifié de phénomène d'hystérésis. Plusieurs phénomènes physiques peuvent justifier ce processus. Toutefois, les principaux facteurs auxquels est attribué le phénomène d'hystérésis sont l'angle de contact et la non uniformité géométrique des pores (Bellini, 1992) et (Musy and Soutter, 1991).

- L'angle de contact varie selon la direction dans laquelle le ménisque se déplace. Quand cette dernière avance, l'angle de contact est plus grand et par conséquent le rayon de courbure sont plus grands que lorsqu'il recule. Ainsi, pour une même humidité relative, le rayon de courbure de désorption est plus grand que celui d'adsorption (Figure I.14).



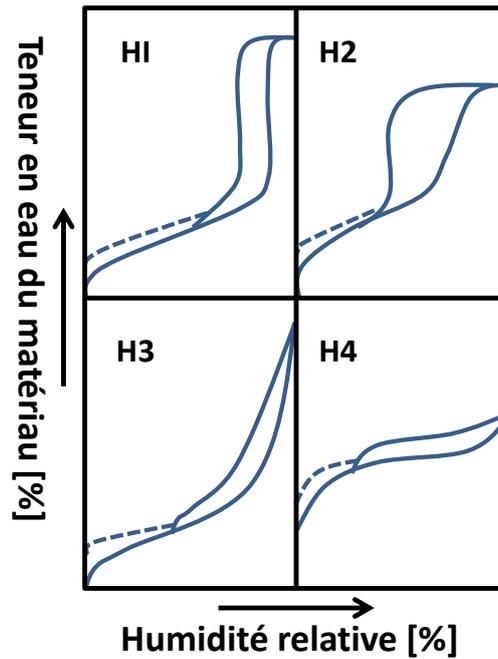
**Figure I.14:** Adsorption et désorption dans un pore cylindrique (Bellini, 1992)

- La distribution de la taille des pores est irrégulière. Ces pores sont vides de formes variables interconnectées par des passages plus petits. Le remplissage d'un pore de faible diamètre empêche le remplissage d'un pore adjacent de diamètre supérieur provoquant un piégeage d'air. Ainsi, lors de la désorption, la vidange se produit au premier lieu au niveau des pores à faible diamètre puis au niveau des pores plus grand sous une humidité relative plus faible (effet bouteille d'encre). La Figure I.15 illustre l'effet bouteille d'encre au niveau d'un pore.



**Figure I.15:** Illustration de l'effet bouteille d'encre lors de l'adsorption et désorption d'eau au niveau d'un pore (Bellini, 1992)

Le phénomène d'hystérésis et sa forme dans la courbe d'isotherme diffère selon la nature du matériau et sa structure poreuse. L'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) propose une classification des différentes formes d'hystérésis (Figure I.16).

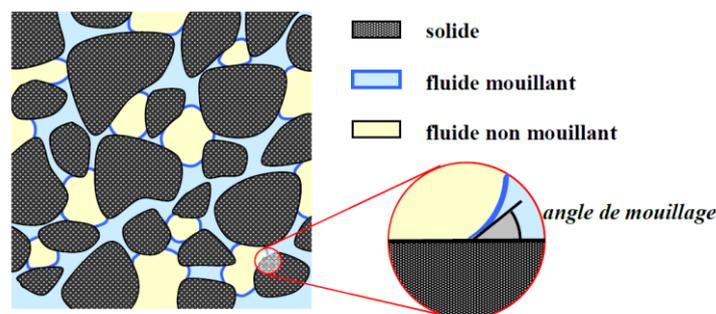


**Figure I.16:** Classification des formes d'hystérésis proposée par IUPAC (IUPAC, 1994)

- Type H1 : généralement obtenue pour des structures poreuses de forme sphérique.
- Type H2 : observé pour les matériaux caractérisés par une large distribution porale, ce type d'hystérésis est le plus fréquent.
- Types H3 et H4 : rencontrés dans le cas de particules plates séparées par des pores inter-feuillets.

### I.3.2.3 Capillarité et équilibre thermodynamique local

Pour des conditions super hygroscopiques avec des humidités relatives élevées, une condensation capillaire se produit au niveau du matériau poreux formant un ménisque liquide séparé de la phase gazeuse. Avec ce phénomène, un équilibre sous des forces superficielles est établi. Cela permet de maintenir l'eau à la surface des pores ainsi qu'entre la phase liquide et celle gazeuse (Figure I.17).



**Figure I.17:** Capillarité dans le milieu poreux (Daian, 2013)

En effet, l'équilibre au niveau de l'interface liquide/gaz est exprimé par la loi de Laplace où la pression capillaire positive  $P_c$  [Pa] (équation I.8) représente la différence entre les deux pressions de l'air  $P_a$  [Pa] et du liquide  $P_l$  [Pa].

$$P_c = P_a - P_l = \sigma \cos(\theta) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{I.8})$$

Avec  $\sigma$  [N/m] est la tension superficielle entre les deux phases liquide/gazeuse,  $\theta$  [rad] est l'angle de mouillage,  $R_1$  [m] et  $R_2$  [m] sont respectivement les rayons de courbures à l'interface des deux phases.

D'un autre côté, et dans le domaine hygroscopique, où on a une occupation partielle de l'espace poreux par l'eau liquide en présence de l'air, la pression capillaire peut être exprimée par la loi de Kelvin (équation I.9) (ATILH, 2008) qui définit un équilibre thermodynamique local avec la relation entre la pression capillaire et le taux de saturation de la vapeur d'eau (ou l'humidité relative). Cette relation s'obtient en exprimant l'égalité des potentielles thermodynamiques du fluide dans chacune des phases.

$$P_c = \frac{RT\rho_l}{M} \ln \left( \frac{P_v}{P_{v,sat}} \right) \quad (\text{I.9})$$

Avec :

$R$  [J/(mol.K)] : Constante des gaz parfait ( $R = 8.31443$  [J/(mol.K)]),

$M$  [kg/mol] : Masse molaire de l'eau,

$\rho_l$  [kg/m<sup>3</sup>] : Masse volumique de l'eau,

$T$  [K] : Température,

$P_v$  [Pa] : Pression de vapeur d'eau,

$P_{v,sat}$  [Pa] : Pression de vapeur d'eau saturante, elle est en fonction de la température, elle s'exprime par :

$$P_{v,sat}(T) = \exp \left( 23.5771 - \frac{4042.9}{T - 37.58} \right) \quad (\text{I.10})$$

Lors d'une condensation capillaire, au niveau d'un milieu poreux homogène et isotrope, un écoulement d'eau liquide peut se produire sous un gradient de pression de part et d'autre du matériau, ce phénomène est exprimé par la loi de Darcy (équation I.11) (Wong, 1999).

$$v_f = -\frac{k \Delta P}{\eta L} \quad (\text{I.11})$$

Avec :  $v_f$  [m/s] est la vitesse d'écoulement,  $k$  [m<sup>2</sup>] est la perméabilité intrinsèque du milieu poreux,  $\eta$  [Po] est la viscosité dynamique du fluide,  $\Delta P$  [Pa] est le gradient de pression et  $L$  [m] est la longueur de l'échantillon.

### I.3.3 Transfert et stockage de chaleur dans les milieux poreux

#### I.3.3.1 Stockage d'énergie dans les matériaux de construction

Le stockage de chaleur dans un matériau poreux sous des conditions isobares est défini par la notion d'enthalpie. En effet, dans le domaine du bâtiment où la température varie entre  $-20^{\circ}\text{C}$  et  $40^{\circ}\text{C}$ , l'enthalpie varie linéairement avec la variation de la température. L'enthalpie d'un matériau de construction sec est décrite par l'équation I.12.

$$H_s = \rho C_p T \quad (\text{I.12})$$

Avec  $H_s$  [ $\text{J}/\text{m}^3$ ] est l'enthalpie du matériau poreux,  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] et  $C_p$  [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ] sont respectivement la masse volumique et la chaleur spécifique du milieu poreux.

#### I.3.3.2 Transfert de chaleur dans les matériaux de construction

Dans un milieu poreux, le mode de transfert de chaleur le plus dominant est la conduction thermique déterminée par la loi de Fourier (équation I.13). Le flux de chaleur élémentaire  $d\overrightarrow{Q}_{cond}$  traversant une surface  $dS$  est proportionnel au gradient de la température  $T$ .

$$d\overrightarrow{Q}_{cond_s} = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad}(T) \cdot dS = \overrightarrow{q}_{cond} \cdot dS \quad (\text{I.13})$$

Avec  $\overrightarrow{q}_{cond}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] est la densité de flux de chaleur et  $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ] est la conductivité thermique du milieu poreux.

Au sein des matériaux poreux, les phénomènes de convection et de rayonnement s'additionnent à la conduction à l'échelle du pore. Cependant, étant donné que la détermination expérimentale des propriétés du milieu poreux, notamment, la conductivité thermique, est réalisée sur des échantillons macroscopique, les phénomènes de convection et de rayonnement sont pris en compte en pratique dans une conductivité thermique équivalente donc incluent indirectement dans l'équation de Fourier.

### I.3.4 Effet du couplage entre les transferts de chaleur et de masse

Le transfert et le stockage de chaleur et de masse dans les milieux poreux sont deux phénomènes fortement couplés. Une bonne représentation du comportement hygrothermique au niveau des matériaux de constructions humides ne peut être atteinte sans tenir compte du couplage des transferts énergétiques et massiques. En effet, les états hydrique et thermique d'un matériau à un impact direct sur la cinétique des transferts hygrothermiques qui peut être résumée dans les points suivants :

- La température et le taux d'humidité ont un impact très important sur les principales propriétés thermiques et hydriques caractérisant le transfert hygrothermique dans un milieu poreux. Plusieurs campagnes expérimentales menées dans ce sens ont évalué

l'impact de l'état hygrothermique, particulièrement hydrique, sur les propriétés thermiques comme la chaleur spécifique et la conductivité thermique (Jerman and Černý, 2012) et (Taoukil et al., 2013). Le même effet est observé pour les propriétés hydriques qui varient à leur tour selon l'état thermique du matériau poreux, notamment la perméabilité à la vapeur d'eau (Hedenblad, 1996) et la capacité de stockage d'humidité ou l'isotherme d'adsorption et de désorption.

- Un autre effet dû au couplage d'énergie et de masse sur le transfert hydrique peut se manifester. Cet impact consiste dans un mouvement d'humidité causé par un gradient de température où autrement appelé « effet Soret ». En effet, la température modifie l'humidité relative ce qui influe localement sur le taux d'humidité, entraînant indirectement une redistribution de l'humidité au niveau du matériau poreux. Différents travaux ont été réalisés afin de confirmer et d'évaluer ce phénomène de thermodiffusion. On peut citer les travaux de (Peuhkuri et al., 2008), (Belarbi et al., 2006), (Trabelsi et al., 2012) et (Trabelsi et al., 2013).
- Le transfert de masse dans un milieu poreux engendre un transfert d'énergie par advection. En outre, pour un milieu poreux humide, une chaleur spécifique supplémentaire d'eau intervient dans l'enthalpie globale. Cette enthalpie de l'eau dépend fortement de son état. Sa détermination exacte ne peut être possible que dans le cas où la distribution porale et la fonction de stockage d'humidité sont bien définies (Künzel, 1995).
- dans un matériau de construction exposé à des hygrométries élevées sous un gradient de température, le phénomène de changement de phase à l'intérieur du matériau poreux a un effet non négligeable sur le transfert thermique. (Künzel, 1995) a montré que le phénomène de changement de phase peut faire doubler le flux thermique dans certains matériaux isolants exposés à des hautes humidités relatives. La prise en compte du changement de phase dans le transfert thermique se traduit par l'ajout d'un terme traduisant la chaleur latente présentée dans l'équation I.14.

$$S_h = L_v \cdot \nabla J_v \quad (\text{I.14})$$

Où  $S_h$  [ $J/(m^3 \cdot s)$ ] est une source de chaleur (positive ou négative) due à la condensation ou l'évaporation d'eau,  $L_v$  [ $J/kg$ ] est la chaleur latente de changement de phase et  $J_v$  [ $kg/(m^2 \cdot s)$ ] est la densité du flux de vapeur d'eau.

## I.4 Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches de bâtiments

L'état de l'art réalisé précédemment sur les dégradations liées à l'humidité, particulièrement ceux au niveau de l'enveloppe, a montré qu'une bonne prédiction de ces pathologies nécessite forcément une modélisation détaillée des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité

dans les enveloppes multicouches de bâtiment. Cette modélisation est utile pour prédire la performance énergétiques des bâtiments et le niveau de confort assuré aux occupants.

#### I.4.1 Différentes approches de la modélisation des transferts hygrothermiques dans les parois de bâtiment

La modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiment est un axe de recherche très important dans le domaine de la physique du bâtiment. Dans la littérature, il existe plusieurs modèles décrivant le transfert hygrothermique dans le milieu poreux qui peuvent être regroupés dans deux types d'approches : une approche par homogénéisation et changement d'échelle microscopique-macroscopique et une approche phénoménologique macroscopique.

##### I.4.1.1 Modélisation par homogénéisation

L'assimilation des matériaux de construction à des milieux poreux avec une structure microscopique hétérogène rend la description des phénomènes physiques très complexe, voire impossible, si toutes les hétérogénéités sont considérées. Parmi les approches entreprises afin de s'affranchir de cette difficulté, les méthodes d'homogénéisation qui permettent la représentation du milieu poreux fortement hétérogène à l'échelle microscopique par un milieu homogène continu ayant le même comportement en moyenne à une échelle macroscopique. En effet, à partir de ces méthodes d'homogénéisation un comportement physique macroscopique du milieu poreux est obtenu à travers une description microscopique des phénomènes physiques mises en jeu. Cette description équivalente doit être intrinsèque au matériau et indépendante des conditions aux limites macroscopiques.

Les approches d'homogénéisation sont regroupées dans trois types de méthodes :

- Homogénéisation par prise de moyenne (Whitaker, 1977), (Whitaker, 1986) et (Samson et al., 1999) où les phénomènes physiques sont modélisés à l'échelle du pore. Par la suite, ces phénomènes sont exprimés par un modèle équivalent macroscopique d'un milieu fictif équivalent en exprimant une moyenne du champ de variables macroscopiques dans un domaine spatial représentative. La
- Figure I.18 illustre l'homogénéisation par la prise de moyenne d'un milieu poreux hétérogène.

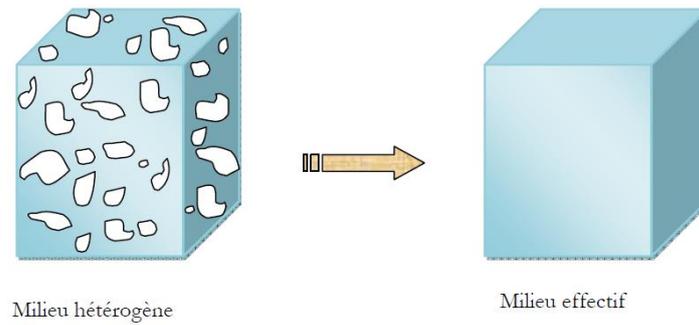


Figure I.18: Homogénéisation par prise de moyenne volumique  
(Abahri, 2012)

Cette méthode représente la méthode la plus utilisée dans le domaine du transfert hygrothermique dans les milieux. Parmi les études réalisées dans ce sens, le travail de (Moyen et al., 1988) qui ont développé un modèle de transfert hygrothermique homogénéisé en considérant juste la diffusion de la vapeur d'eau et la conduction thermique. Dans un autre travail, (Samson et al., 1999) ont développé un modèle de transfert hygrothermique homogénéisé (par prise de moyenne) en couplant différents phénomènes de transfert (diffusion de vapeur, convection de liquide et diffusion de chaleur), ce modèle a été établi en se basant sur les travaux de (Whitaker, 1977) et (Whitaker, 1986). Un autre modèle peut être cité, le modèle proposé par (Abahri, 2012) en définissant les transferts de chaleur et de masse par un champ spécial de trois variables (température, teneur en eau et pression totale). Les résultats obtenus ont mis en évidence l'intérêt de l'approche d'homogénéisation par la prise de moyenne dans l'étude de la contribution du gradient de pression totale dans les transferts hydriques, en clarifiant un certain nombre d'aspects fondamentaux du problème.

Homogénéisation périodique (Sanchez-Palencia, 1985), (Moyne and Murad, 2002), (Moyne and Murad, 2006) et (Lemaire et al., 2007), dans cette méthode la microstructure du domaine macroscopique est assimilée à une répétition périodique d'une cellule élémentaire définie comme une cellule de base (Figure I.19).



Figure I.19: Microstructure constituée de la répétition périodique de la cellule (Mchirgui, 2012)

Cette approche est relativement moins utilisée dans le domaine du transfert hygrothermique. L'étude réalisée par (Bouddour et al., 1998) peut être citée. Dans leur travail plusieurs modèles de transferts hygrothermiques par homogénéisation périodique ont été établis pour différentes configurations physiques (convection de chaleur prédominante, diffusion de vapeur prédominante,...). Dans une autre étude, (Lewandowska and Laurent, 2001) qui ont appliqué l'approche d'homogénéisation périodique dans le cas de transfert hydrique dans un milieu à double porosité. Enfin, le travail de (Mchirgui, 2012) qui s'est intéressé à l'application de la méthode d'homogénéisation périodique dans le domaine du transfert hydrique dans les matériaux cimentaire insaturés. Des expressions des coefficients de diffusion hydrique homogénéisés ont été proposées pour différentes cas : diffusion de vapeur d'eau prédominante, diffusion de vapeur d'eau et convection d'eau liquide du même ordre de grandeur, convection d'eau liquide prédominante.

- Une autre approche d'homogénéisation par l'utilisation de méthodes statistiques a été développée (Maghous et al., 2007), (Sanahuja et al., 2007) et (Zhu et al., 2009). Cette approche est généralement appliquée pour des milieux à microstructure aléatoire ou désordonnés.

A noter que la qualité de la prédiction par l'utilisation de cette approche est tributaire à la parfaite connaissance de la topologie microstructurale du matériau. Cette approche par changement d'échelle micro-macro ne sera pas abordée dans ce travail de thèse. D'amples détails sur ces approches et leurs applications pour les transferts hygrothermiques sont illustrés dans les travaux de : (Monteagudo et al., 2001), (Bourbatache, 2009), (Mchirgui, 2012) et (Abahri, 2012).

#### I.4.1.2 Modélisation phénoménologique

Généralement, la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments est basée sur une approche phénoménologique inspirée des travaux de Luikov (Luikov, 1966). Dans cette démarche, le milieu poreux est considéré comme un milieu homogène ce qui permet d'établir les équations de transferts hygrothermiques à partir des principes fondamentaux de la thermodynamique (Daïan, 2013). Les bilans énergétique et massique sont exprimés à l'aide de moteurs de transfert mesurables (Température, teneur en eau, pression de vapeur...) et des coefficients liés explicitement aux propriétés macroscopiques des matériaux (conductivité thermique, chaleur spécifique, perméabilité à la vapeur d'eau,...) déterminés expérimentalement.

Les modèles de transferts hygrothermiques macroscopiques se distinguent généralement par les choix des différents moteurs de transferts utilisés. Pour le transfert de chaleur, la température est désignée comme moteur de transfert classique. En revanche, pour le transfert massique il n'y a pas d'unanimité. Il existe plusieurs modèles avec différents moteurs de transfert hydrique. Selon Funk (Funk and Wakili, 2007), ces modèles donnent des résultats assez similaires, car il existe, sous des hypothèses bien précises comme l'équilibre

thermodynamique local, des lois qui assurent la liaison entre les différents moteurs de transferts hygrothermiques comme la loi des gaz parfait et la loi de Kelvin (Daïan, 2013).

Parmi ces modèles, le modèle de Pedersen (Pedersen, 1992) qui a décomposé le transfert hydrique en deux équations de transport en prenant comme moteur la pression de vapeur pour la phase vapeur et la pression capillaire pour la partie liquide. Cette décomposition a été effectuée dans le but d'assurer une certaine continuité du transfert capillaire pour les composants de parois multicouches. Le bilan massique a été exprimé comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla(\delta_p \nabla P_v - k_l \cdot P_c \nabla(\ln P_c)) \quad (\text{I.15})$$

Où :

$u [m^3/m^3]$	La teneur en eau volumique ;
$\delta_p [kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$	La perméabilité à la vapeur d'eau ;
$k_l [kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$	La conductivité hydraulique ;
$P_v [Pa]$	La pression de vapeur d'eau ;
$P_c [Pa]$	La pression de succion capillaire.

Un modèle plus classique, le modèle de Philip & De Vries (Philip and De Vries, 1957) qui ont décrit le transfert hygrothermique comme étant fonction de la teneur en eau et de la température. Le transfert d'humidité sous un gradient thermique est pris en compte. Le transfert de chaleur est décrit uniquement par conduction pure et un transfert lié au changement de phase. L'advection thermique liée aux gradients de pression de vapeur et de pression totale est non considérée. Le système d'équation décrivant les bilans massique et énergétique est représenté dans l'équation I.16.

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla(D_T \nabla T) + \nabla(D_\theta \nabla u) + \nabla k_l \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + L_v \nabla(D_\theta \nabla u) \end{cases} \quad (\text{I.16})$$

Avec :

$D_T [kg/(m \cdot s \cdot K)]$	Le coefficient de diffusion non isotherme de l'eau liquide ;
$D_\theta [m^2/s]$	Le coefficient isotherme de la vapeur d'eau ;
$\lambda [W/(m \cdot K)]$	La conductivité thermique ;
$C_p [J/(kg \cdot K)]$	La chaleur spécifique du matériau ;
$L_v [J/kg]$	La chaleur latente de vaporisation ;
$k_l [m/s]$	La conductivité hydraulique.

Dans le même sens, (Belarbi et al., 2008) et Qin et al. (Qin et al., 2009) ont développé un modèle de transfert hygrothermique non isotherme où la température et la teneur en vapeur d'eau sont considérées comme moteurs de transfert hygrothermique afin de s'affranchir des

problèmes de discontinuité du transfert hydrique au niveau des interfaces entre couches pour les parois multicouches. Dans leur développement, les auteurs ont introduit un coefficient de gradient thermique évalué expérimentalement qui quantifie l'apport du transfert d'humidité dû au gradient thermique (Qin, 2008). L'équation I.17 résume le système d'équation traduisant le transfert hygrothermique dans les enveloppes de bâtiment.

$$\begin{cases} \rho C_m \frac{\partial u_v}{\partial t} = \nabla(\delta \nabla u_v) + \nabla(\varepsilon \delta \nabla T) \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \rho C_m (\sigma L_v + \gamma) \frac{\partial u_v}{\partial t} \end{cases} \quad (\text{I.17})$$

Avec :

$u_v [kg/m^3]$	La teneur en vapeur d'eau ;
$\delta [m^2/s]$	Le coefficient de transfert d'humidité ;
$\varepsilon [kg/(m^3 \cdot K)]$	Le coefficient de thermogradient ;
$\sigma [-]$	Le critère de changement de phase ;
$\gamma [J/kg]$	La chaleur d'absorption ou de désorption ;

$C_m [m^3/kg]$  est la capacité de stockage d'humidité, celle-ci est définie en fonction de la pente de la courbe d'isotherme d'adsorption et de désorption  $\frac{\partial u}{\partial \varphi}$  comme suit :

$$C_m = \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{1}{\rho \cdot u_{v,sat}(T)} \quad (\text{I.18})$$

Un autre type d'approche, en plus de la teneur en eau et la température, la pression totale intervient comme un moteur de transfert hygrothermique supplémentaire. Dos Santos & Mendes (Santos and Mendes, 2009) ont élaboré un modèle mathématique pour prédire les transferts hygrothermiques dans un bloc de matériau en brique creux. Dans leurs travaux, ils ont utilisé le MTDMA (Multi-TriDiagonal-Matrix Algorithm) pour résoudre leurs équations algébriques.

Avec la même approche, Abahri (Abahri, 2012) a proposé un modèle plus détaillé de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiment. Pour le transfert d'humidité, en plus de la diffusion, l'apport du gradient de pression totale, exprimé par un coefficient d'infiltration, est considéré, ainsi que l'apport du gradient thermique traduit par un coefficient de thermogradient. Les deux coefficients ont été évalués expérimentalement par des essais développés en laboratoire (Remki et al., 2012) et (Abahri et al., 2013). Les bilans massiques et énergétiques sont présentés dans le système d'équation I.19 suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}[D_m(\nabla u + \varepsilon \nabla T + \alpha \nabla P)] \\ \rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\alpha_t \nabla T + \delta_t \nabla u + \alpha_t \nabla P) + L_v C_m \sigma \frac{\partial u}{\partial t} \\ h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + C_m \sigma \frac{\partial u}{\partial t} \end{array} \right. \quad (\text{I.19})$$

Avec :

$D_m [m^2/s]$  est le coefficient de diffusion de l'humidité (vapeur d'eau et eau liquide) ;  
 $\varepsilon [kg/(m^3 \cdot K)]$  est le coefficient de thermogradient ;  $\alpha [kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$  est le coefficient traduisant l'infiltration d'eau due à un gradient de pression totale ;  $\alpha_t [W/(m \cdot K)]$  est la conductivité thermique modifiée ;  $\delta_t [kg/(s \cdot m)]$  et  $\alpha_t [m^2/s]$  sont des coefficients traduisant l'advection thermique due au respectivement aux gradients d'humidité et de pression totale ;  $\lambda_f [kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$  est le coefficient d'infiltration d'air ;  $h_a [kg \cdot s^2/(m^2 \cdot mol)]$  est la capacité d'air humide.

Le modèle de (Künzel, 1995) peut être aussi cité, ce modèle est utilisé dans le logiciel WUFI qui représente l'un des outils commerciaux les plus utilisés dans la modélisation 1D et 2D des transferts de chaleur et d'humidité. Dans ce modèle, la température et l'humidité relative sont définies comme moteurs de transferts. Les équations résolues par la méthode des volumes finis sont écrites comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + L_v \nabla(\delta_p \nabla(\varphi \cdot P_{v,sat})) \\ \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi \cdot P_{v,sat})) \end{array} \right. \quad (\text{I.20})$$

Où :

$H [J]$	L'enthalpie totale du matériau ;
$\varphi [-]$	L'humidité relative ;
$P_{v,sat} [Pa]$	La pression de vapeur saturante ;
$\partial \omega / \partial \varphi [-]$	La pente de la courbe d'isotherme d'adsorption ;
$D_\varphi [kg/(m \cdot s)]$	Le coefficient de conduction liquide ;

Il existe d'autres logiciels commerciaux qui permettent la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité, parmi eux Delphin qui est basé sur le modèle de (Nicolai and Grunewald, 2006) où la température, la pression de vapeur d'eau et la pression de gaz sont considérées comme variables de calcul.

Les logiciels commerciaux destinés à la modélisation des transferts hygrothermiques dans les enveloppes de bâtiment représentent généralement des boîtes noires où une modification des équations traduisant les transferts couplés de chaleur et de masse s'avère très difficile voire

impossible. Cela représente l'inconvénient majeur lors de l'utilisation de ces logiciels, particulièrement pour les adapter à des études bien spécifiques ou ajouter d'autres phénomènes non considérés dans la modélisation de base comme l'effet de l'hystérésis ou celui de la pression totale (façades ventilées) dans WUFI.

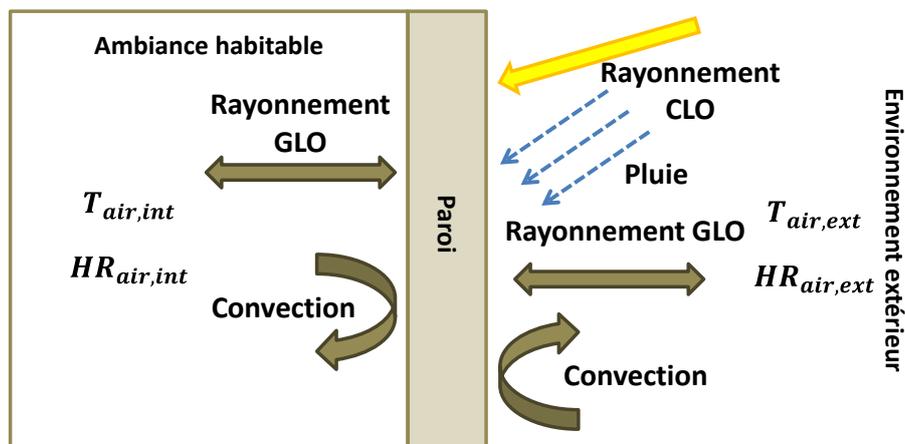
#### I.4.1.3 Conditions aux interfaces dans le bâtiment

Les modèles de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité décrits précédemment sont valables au niveau du matériau poreux lui-même. En revanche, au niveau du contour et à limite du domaine d'application des modèles d'autres phénomènes décrits avec d'autres équations rentrent en jeu dans la modélisation. Dans le cas d'une modélisation macroscopique des transferts hygrothermiques aux niveaux des parois multicouches, deux types de conditions aux limites sont distingués. Le premier est à l'interface entre la paroi et l'air (intérieur ou extérieur) et le deuxième c'est l'interface entre deux couches successives de matériaux différents d'une paroi multicouche.

##### I.4.1.3.1 Surfaces intérieure et extérieure de la paroi

En considérant une paroi extérieure, les deux faces de cette paroi sont exposées à deux environnements différents, l'environnement climatique extérieur et l'ambiance habitable intérieure.

Concernant l'environnement extérieur, la paroi est soumise, en plus des variations de températures et d'humidités relatives, à un rayonnement de grande et courte longueur d'onde, à une convection forcée due au vent ainsi à l'effet de la pluie. Pour l'ambiance intérieure, la paroi est exposée aussi à la variation de température et d'humidité relative, au rayonnement de grande longueur d'onde ainsi qu'à la convection naturelle ou forcée selon la stratégie de ventilation adoptée. La Figure I.20 résume les phénomènes se déroulant aux interfaces intérieure et extérieure de la paroi.



**Figure I.20:** Sollicitations extérieures et intérieures d'une paroi de bâtiment

### I.4.1.3.1.1 Rayonnement

L'échange thermique radiatif est composé en un rayonnement de courtes longueurs d'onde (rayonnement solaire) et un rayonnement de grandes longueurs d'onde. Le rayonnement à la surface extérieure de la paroi ( $S_e$  [ $W/m^2$ ]) est exprimé comme suit (Janssen et al., 2007a).

$$S_e = \kappa(S_{dir} + S_{dif}) + \sigma\varepsilon[F_{sol}(T_{sol}^4 - T_{se}^4) + F_{ciel}(T_{ciel}^4 - T_{se}^4)] \quad (\text{I.21})$$

Les rayonnements direct ( $S_{dir}$  [ $W/m^2$ ]) et diffus ( $S_{dif}$  [ $W/m^2$ ]) sont obtenus à partir des données météo. Un appareil de mesure de la trajectoire des rayons solaire (Kittler, 1981) est utilisé pour projeter le rayonnement direct sur la surface de la construction. La température à la surface du sol ( $T_{sol}$  [K]) est prise égale à celle de l'air extérieur ( $T_e$  [K]) (Janssen, 2002) et (Janssen et al., 2004). Pour le calcul de la température du ciel ( $T_{ciel}$  [K]), plusieurs modèles ont été proposés qui donnent généralement des résultats similaires (Janssen, 2002). Le modèle le plus utilisé est représenté dans l'équation I.22.

$$T_{ciel} = T_e - (23.8 - 0.2025(T_e - 273.15)) \cdot (1 - 0.87cf) \quad (\text{I.22})$$

Avec :

$F$ [-]	Le facteur de forme,
$\kappa$ [-]	Le coefficient d'absorption solaire,
$\varepsilon$ [-]	L'émissivité du matériau,
$\sigma$ [ $W/m^2K^4$ ]	La constante de Boltzmann
$cf$ [-]	Le facteur d'opacité.

Le rayonnement au niveau de la surface intérieure  $S_i$  [ $W/m^2$ ] est dû aux échanges de rayonnement de grandes longueurs d'onde entre la surface intérieure de la paroi de température ( $T_{si}$  [K]) et les autres murs de la pièce de température ( $T_{mur}$  [K]), il est déterminé selon l'équation I.23.

$$S_i = \frac{\sigma(T_{si}^4 - T_{mur}^4)}{\left(\frac{1 - \varepsilon_{surf}}{\varepsilon_{surf} \cdot S_{surf}} + \frac{1}{S_{surf} \cdot F_{surf-mur}} + \frac{1 - \varepsilon_{mur}}{\varepsilon_{mur} \cdot S_{mur}}\right)} \quad (\text{I.23})$$

### I.4.1.3.1.2 Convection

Dans la physique du bâtiment les échanges de vapeur d'eau et de la chaleur entre la surface de la paroi et l'air (extérieur ou intérieur) sont exprimés par des coefficients d'échange convectif de masse  $h_m$  [ $kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$ ] et de chaleur  $h_c$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] comme suit :

$$Q_{conv} = h_c(T_{air} - T_{surf}) \quad (\text{I.24})$$

$$H_{conv} = h_m(P_{v,air} - P_{v,surf}) \quad (\text{I.25})$$

Où :

$Q_{conv}$  [ $J/(m^2s)$ ] Le flux convectif thermique ;

$H_{conv}$  [ $kg/(m^2s)$ ] Le flux convectif massique ;

$P_{v,air}$  [ $Pa$ ] La pression de vapeur d'eau de l'air (extérieur ou intérieur) ;

$P_{v,surf}$  [ $Pa$ ] La pression de vapeur de la surface de la paroi (intérieure ou extérieure).

Les valeurs des coefficients d'échange convectif thermique et massique dépendent de l'environnement (intérieur ou extérieur).

#### I.4.1.3.1.3 Pluie

La pluie battante est rarement considérée dans la modélisation des conditions aux limites extérieures. (Künzel, 1995) a exprimé l'infiltration de la pluie ( $J_{l,pluie\ infiltrée}$  [ $kg/(m^2s)$ ]) par un flux d'eau liquide comme suit :

$$J_{l,pluie\ infiltrée} = a_p \cdot J_{l,pluie} \quad (I.26)$$

Avec  $J_{l,pluie}$  [ $kg/(m^2s)$ ] est le flux d'eau liquide arrivant sur la paroi et  $a_p$  est le coefficient d'absorptivité aux précipitations.

Dans l'étude de (Janssen et al., 2007b) sur la modélisation des transferts hygrothermiques dans une paroi de bâtiment sous des conditions atmosphériques, la précipitation d'eau à la surface de la paroi due à la pluie ( $R$  [ $kg/(m^2s)$ ]) est produite par la pluie horizontale ( $R_h$  [ $kg/(m^2s)$ ]) et la pluie battante transportée par le vent ( $R_{vent}$  [ $kg/(m^2s)$ ]) (pluie transportée par la composante horizontale de la vitesse du vent). La précipitation en surface due à la pluie est présentée dans l'équation I.27.

$$R = R_h \cos(\beta) + R_{vent} \quad (I.27)$$

Avec  $\beta$  [ $^\circ$ ] est l'angle d'inclinaison de la paroi par rapport au plan horizontal.

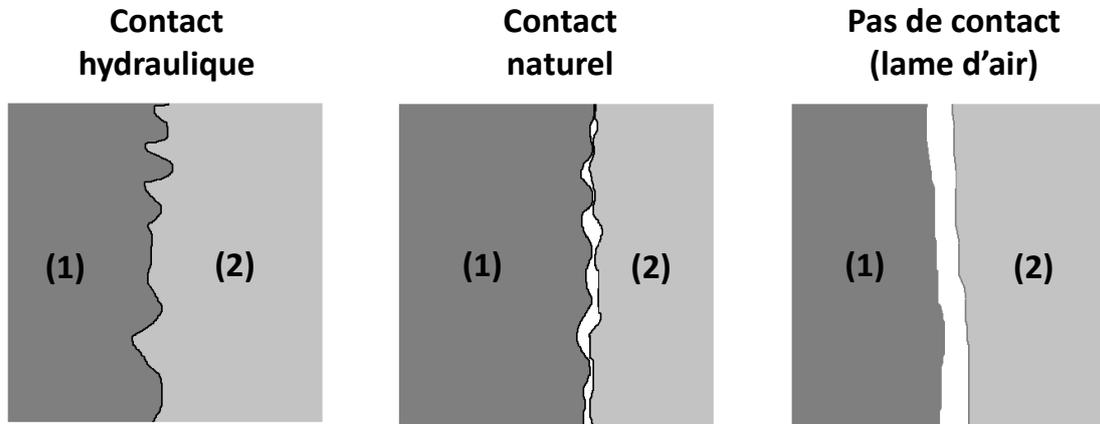
La pluie horizontale est obtenue par les fichiers météo. En revanche les données concernant la pluie battante due au vent ne sont pas disponibles dans les fichiers météo. Cette grandeur est généralement calculée en fonction de la pluie horizontale, la vitesse et la direction du vent. La sollicitation due à la pluie battante varie fortement dans le temps et dans l'espace. Cela est dû à plusieurs paramètres comme la géométrie du bâtiment et son orientation. Il existe trois méthodes d'évaluation de cette grandeur (Blocken and Carmeliet, 2004): par mesure, modèle semi-empirique ou modèle numérique basé sur l'approche de la CFD (Computational Fluid Dynamics). Parmi les modèles établis, le modèle de (Janssen et al., 2007b) présenté dans l'équation I.28.

$$R_{vent} = \alpha(R_h, U, \theta, \varphi) R_h U \quad (I.28)$$

Avec  $\alpha$  [s/m] est le coefficient traduisant le transport de la pluie par le vent. La détermination de ce coefficient dépend de la pluie horizontale, de la vitesse de référence du vent ( $U$  [m/s]), de la direction du vent ( $\theta$  [° par rapport au nord]) et l'orientation du bâtiment ( $\varphi$  [° par rapport au nord]).

#### I.4.1.3.2 Interface entre deux couches de la paroi

Les parois de bâtiment sont généralement constituées de plusieurs couches de matériaux possédant des propriétés hygrothermiques différentes. Les conditions aux limites aux niveaux des interfaces entre deux couches successives sont définies selon la nature du contact entre les deux couches. (De Freitas et al., 1996) ont proposé dans leur étude trois types de contact entre deux couches d'une paroi (Figure I.21) : contact naturel, contact hydraulique ou une lame d'air entre les deux couches.



**Figure I.21:** Types de contact possibles entre deux matériaux  
(De Freitas et al., 1996)

Pour le contact hydraulique où le contact entre les deux matériaux est interpénétré (contact parfait) la continuité est supposée assurée des flux thermique et hydrique au niveau de l'interface, ainsi les conditions aux limites peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{aligned} T_1^{interface} &= T_2^{interface} \\ p_{v,1}^{interface} &= p_{v,2}^{interface} \end{aligned} \quad (\text{I.29})$$

Concernant le contact naturel où les deux matériaux sont considérés en contact sans interpénétration. Dans ce cas la conservation du flux thermique à l'interface est maintenue. En revanche, pour le transfert hydrique, le flux à l'interface est exprimé en fonction d'une résistance hydrique ( $R_{hydrique}$  [m<sup>2</sup>s/kg]). La densité du flux hydrique à l'interface ( $J_{interface}$  [kg/(m<sup>2</sup>s)]) est exprimé par l'équation I.30.

$$J_{interface} = - \frac{HR_1^{interface} - HR_2^{interface}}{R_{hydrique}} \quad (\text{I.30})$$

Quand une lame d'air est supposée entre les deux matériaux, la continuité n'est plus assurée ni pour le transfert thermique ni hydrique, le flux hydrique est exprimé selon l'équation I.30 décrite ci-dessus et une résistance thermique ( $R_{thermique} [m^2K/W]$ ) est imposée lors de l'écriture de la densité du flux thermique à l'interface ( $Q_{interface} [W/m^2]$ ) (équation I.31).

$$Q_{interface} = - \frac{T_1^{interface} - T_2^{interface}}{R_{thermique}} \quad \text{(I.31)}$$

Lors de la modélisation des transferts hygrothermiques dans les parois multicouches de bâtiment, l'hypothèse de la continuité hydraulique est souvent adoptée (Qin et al., 2009), (Aït Ouméziane, 2013) et (Ferroukhi et al., 2014). Cependant, cette hypothèse n'est pas valable lors de l'utilisation de la teneur en eau comme moteur de transfert hydrique (Tariku et al., 2010a) et (Prommas, 2011). En effet la teneur en eau est une variable qui dépend fortement de la nature du matériau et sa structure poreuse, ainsi au niveau de l'interface entre deux matériaux, ayant une microstructure différente, une discontinuité du flux hydrique est observée. Pour s'affranchir de cette problématique, le transfert hydrique est décrit en utilisant des variables d'état qui ne sont pas tributaires à la microstructure du matériau comme la pression de vapeur d'eau et la pression capillaire ou encore l'humidité relative.

## I.5 Interaction des transferts hygrothermiques dans l'enveloppe et l'ambiance habitable du bâtiment

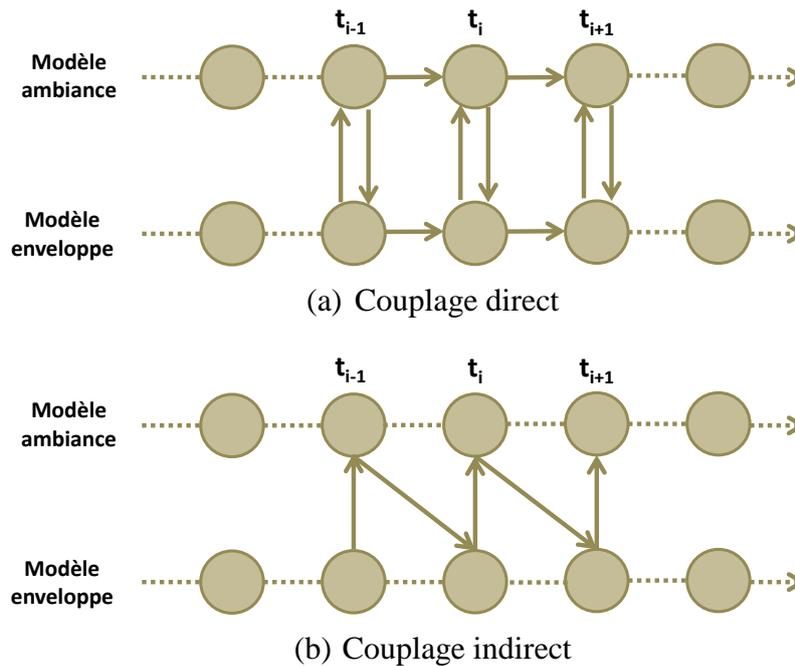
Pour mieux prédire le comportement hygrothermique d'un bâtiment, il est primordial de tenir en compte des différents phénomènes de transferts thermiques et hydriques se produisant dans l'enveloppe et des interactions avec l'ambiance habitable ainsi que l'environnement extérieur.

Cependant, les échanges thermiques et hydriques entre l'enveloppe du bâtiment et son ambiance intérieure sont liés et continus. En effet, la nature non linéaire et le couplage fort du système d'équations traduisant les transferts hygrothermiques rendent la modélisation plus complexe et difficile à mettre en œuvre notamment pour des niveaux de discrétisation élevés.

Il existe différents outils de modélisation et logiciels de simulation approuvés pour l'étude thermique et hygrométrique du bâtiment comme TRNSYS, Energie plus ou Open Modelica. Néanmoins, la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois avec une granularité fine est généralement mal représentée. Or, la modélisation incomplète des transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe influe directement sur la précision de la simulation du comportement thermique et hydrique global du bâtiment.

Pour remédier à cette problématique, plusieurs démarches de modélisation ont été proposées afin d'assurer une interaction dynamique et continue des transferts hygrothermiques entre l'enveloppe et l'ambiance du bâtiment.

Le principe de ces démarches est généralement basé, soit sur une implémentation complète du modèle de transfert hygrothermique du bâtiment (Paroi et ambiance) sur un seul outil de simulation où les deux modèles HAM et BES sont résolus au même temps avec le même solveur (couplage direct), soit sur une procédure de co-simulation de deux outils où la résolution des deux modèles est entreprise séparément avec un échange de données pour chaque pas de temps (couplage indirect). La Figure I.22 illustre les deux approches de couplage pour la simulation dynamique des transferts hygrothermiques dans l'enveloppe et l'ambiance du bâtiment.

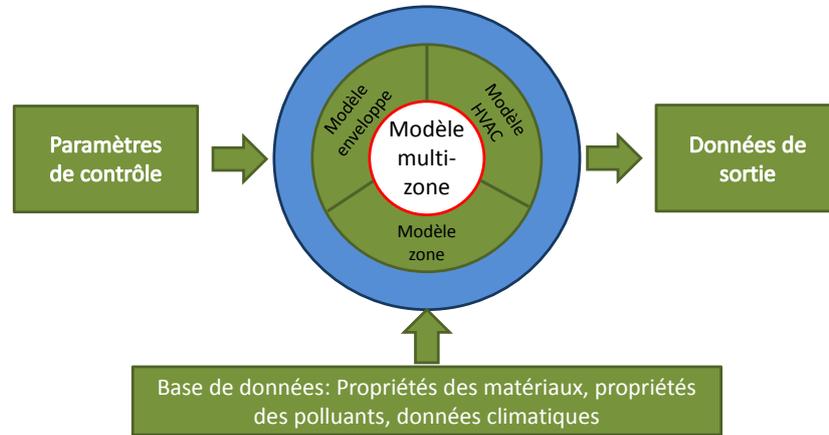


**Figure I.22 :** Stratégies de couplage dynamique entre les modèles de transferts hygrothermiques aux niveaux de l'enveloppe et l'ambiance du bâtiment

L'approche par couplage indirect est largement utilisée, particulièrement lors du couplage de codes déjà existants. Elle consiste à faire cohabiter deux logiciels existants, un pour la simulation dynamique de bâtiment et l'autre pour une modélisation précise du comportement hygrothermique au niveau de l'enveloppe. La démarche en question permet d'avoir une meilleure description des transferts thermique et hydrique au travers des parois hygroscopiques comme partie intégrante du bâtiment. Dans ce sens, la littérature fait état d'un certain nombre de travaux antérieurs parmi lesquels sont cités, ci-après, les plus importants.

(Tariku et al., 2010b) qui ont développés un environnement de simulation sous SimuLink HAMFitPlus, qui intègre à la fois un modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité et un modèle d'ambiance intérieure tenant compte des échanges hydriques et thermiques avec l'enveloppe, des systèmes de chauffage et de ventilation ainsi que du comportement des usagers.

Dans le cadre du programme CHAMPS à l'université de Syracuse, (Nicolai et al., 2007) ont comparé plusieurs méthodes de couplage (CHAMPS-BES) entre un modèle de transfert de chaleur, d'air, d'humidité et de polluants dans l'enveloppe et un modèle multizone de transport d'air et de polluants dans l'ambiance intérieure du bâtiment. Le schéma présenté dans la Figure I.23 illustre le système de couplage (CHAMPS-BES).



**Figure I.23:** Schéma du système de couplage CHAMPS-BES  
(Nicolai et al., 2007)

Le modèle multizone et le modèle de l'enveloppe ont été formulés mathématiquement par un système d'équations différentielles à dérivées partielles résolues par la méthode des volumes finis. Les méthodes testées ont été classées par rapport au choix du pas de temps de contrôle de la simulation : résolution des deux modèles (multizone et enveloppe) simultanément ou séparément. L'analyse des résultats a montré qu'un couplage faible entre les modèles CHAMPS et BES est plus efficace par rapport au temps de calcul, le degré de stabilité et de flexibilité.

(Steehan et al., 2010) ont procédé à l'intégration d'un modèle HAM en 1D dans un logiciel BES, en l'occurrence TRNSYS, pour la modélisation des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction. Ceci a pu être réalisé en couplant les équations du modèle HAM à celles de TRNSYS.

(Cóstola et al., 2009) ont utilisé d'autres programmes afin d'assurer le couplage HAM-BES. Ils ont proposé une procédure d'échange externe de données entre le modèle HAM implémenté dans le programme HAMFEM (Janssen et al., 2007a) et le modèle BES programmé dans ESP-r (Clarke, 2001).

Une autre étude a été réalisée par (Van Schijndel, 2009) avec la même procédure d'échange de données, en utilisant les environnements de Simulink/COMSOL pour la simulation dynamique des processus d'échanges et de transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans les bâtiments.

Le travail de (Spitz et al., 2013) peut être aussi cité. Dans leur étude, une validation expérimentale d'un modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité de bâtiment par rapport à des données expérimentales a été réalisée. La simulation a été effectuée par le biais d'un couplage entre le logiciel Energy plus et un modèle de transfert hygrothermique développé par les auteurs.

(Clarke, 2013) dans son étude a mis en évidence le rôle de la prise en compte du transfert hydrique dans la modélisation de la performance énergétique des bâtiments en utilisant le système ESP-r. L'analyse a été réalisée sur une application concernant le développement fongique à la surface intérieure de l'enveloppe.

En optant pour une autre méthode, (Berger et al., 2013) se sont intéressés à l'application des méthodes de réduction de modèle afin d'assurer un couplage entre un modèle de bâtiment et un modèle bidimensionnel de transfert couplé de chaleur et de masse dans l'enveloppe. Les résultats de simulation ont montré l'intérêt de l'application des méthodes de réduction de modèle pour la modélisation des transferts hygrothermique avec une bonne granularité (2D). Cet intérêt est particulièrement explicite au point de vue du temps de calcul.

La majorité de ces études citées ci-dessus ont été menées dans le cadre de l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie. Dans cette annexe, les degrés de finesse de la modélisation des transferts hygrothermiques, au niveau de l'ambiance et de l'enveloppe, ont été classés par quatre niveaux (Woloszyn and Rode, 2008a) et (Woloszyn and Rode, 2008b) :

- **Très fin** : Codes de mécanique des fluides (CFD) pour l'ambiance et modèles tridimensionnels pour l'enveloppe ;
- **Fin** : les ambiances sont subdivisées en multiples zones de calculs et modèles bidimensionnels pour le transfert HAM dans l'enveloppe ;
- **Intermédiaire** : chaque pièce est modélisée comme une seule zone et modèles unidimensionnels de l'enveloppe ;
- **Grossier** : l'ensemble du bâtiment est représenté par une zone unique, fonctions de transfert pour l'enveloppe.

Le Tableau I.7 résume la granularité typique utilisée dans l'annexe 41 pour la modélisation thermo-hydro-aéraulique des bâtiments ainsi que le positionnement dans cette classification des principaux travaux réalisés.

**Tableau I.7:** Classification des modèles thermo-hydro-aéraulique selon leur granularité (Woloszyn and Rode, 2008b)

Enveloppe	Ambiance			
	Simplifiée Mono-zone	Intermédiaire Multizone	Fine Zonale	Très fine CFD
<b>Simplifiée Fonction de transfert</b>	-	TRNSYS (Solar Energy Laboratory et al., 2010)	-	-
<b>Intermédiaire Modélisation 1D</b>	-	Tariku et al (Tariku et al., 2010) HAM-tool (Sacis Kalagasidis, 2004) Steetman et al (Steeman et al., 2010)	-	HAMlab (Van Schijndel, 2009)
<b>Fine Modélisation 2D</b>	Wufi-Plus (Holm et al., 2003)	Champs-BES (Nicolai et al., 2007)	-	ERRIGUIBLE et al (Erriguible et al., 2006)
<b>Très fine Modélisation 3D</b>	-	-	-	-

## I.6 Conclusion

L'étude réalisée dans ce chapitre a permis de dresser un état de l'art sur les risques causés par l'humidité en termes de dégradation de la qualité de l'air des ambiances habitables ainsi que la détérioration structurelle de l'enveloppe. Cet état de l'art a mis en évidence l'intérêt d'une bonne compréhension du comportement hygrothermique des matériaux poreux de construction afin de mieux prédire les risques de pathologies liées à l'humidité.

Pour cela, une partie du présent chapitre a été consacrée à la description du milieu poreux et ces principales grandeurs caractéristiques, ainsi que les phénomènes physiques intervenant dans le transfert et le stockage de chaleur et de masse dans les matériaux de construction.

Par la suite, dans le but de présenter l'avancement des travaux en matière de modélisation, une synthèse des différents modèles de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois de bâtiments a été exposé. Dans le même objet, les différentes approches d'intégration des modèles de transferts couplés de chaleur et de masse au niveau de la paroi dans la modélisation du comportement hygrothermique global du bâtiment ont été recensées. Ces outils de modélisation présentent certaines limites, particulièrement lors de la modélisation des transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe. En effet, les modèles HAM reposent sur plusieurs hypothèses simplificatrices. Parmi ces hypothèses, la non prise en compte de la thermodiffusion et des transferts d'air dans le bilan massique. En outre, pour éviter les problèmes de non linéarité lors de la résolution numérique, les données d'entrée sont

considérées constantes, par conséquent, la variation des propriétés hygrothermiques en fonction de l'état hydrique et thermique des matériaux n'est pas prise en compte. Ces hypothèses ont des répercussions sur la qualité de la prédiction des transferts à l'échelle de la paroi et à l'interface enveloppe du bâtiment et ambiances habitables.

Ainsi, à travers cette synthèse bibliographique, il a été mis en évidence la nécessité de développer des modèles performants de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois afin d'avoir une bonne représentation du comportement hygrothermique des bâtiments et par conséquent assurer une meilleure prédiction des pathologies liées à une présence excessive d'humidité dans le bâtiment. Dans ce sens, un travail de modélisation a été réalisé où une démarche d'intégration d'un modèle de paroi multicouche (2D ou 3D) dans un outil de simulation dynamique de bâtiment a été développé. Ce modèle HAM en question tient compte des échanges thermiques et massiques (air et humidité). Par ailleurs, la variation des propriétés hydriques et thermophysiques en fonction de l'état hygrothermique du matériau a été considérée. Le développement du modèle des transferts hygrothermiques dans les enveloppes fera l'objet du chapitre suivant intitulé : « Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments ».

# Chapitre II.

## Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments

### II.1 Introduction

Un bâtiment est le siège de différentes sollicitations dynamiques venant de l'extérieur (le rayonnement solaire, la pluie et la température) ou de l'intérieur (les différents systèmes de chauffage et de ventilation ainsi que les habitants eux même qui représentent une source de chaleur et d'humidité). Sous ces multiples sollicitations, l'enveloppe est soumise, alors, à des échanges et à des interactions à la fois complexes et simultanées, de flux de chaleur et de masse (d'air et d'humidité).

Afin de modéliser ces transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments, plusieurs travaux ont été menés ces dernières décennies. La majorité d'entre eux sont basés sur des approches de modélisation phénoménologiques inspirées des travaux de (Luikov, 1966). Celle-ci, considère le milieu poreux homogène, ce qui permet de bâtir les équations de transfert hygrothermique à partir des principes fondamentaux de la thermodynamique (Daïan, 2013). Les bilans énergétique et massique sont exprimés à l'aide de moteurs de transfert mesurables (Température, teneur en eau, pression de vapeur...) et des coefficients liés explicitement aux propriétés macroscopiques des matériaux (conductivité thermique, chaleur spécifique, perméabilité à la vapeur d'eau,...) déterminés expérimentalement.

Dans ce chapitre, un modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches de bâtiments est établi. Où la température, la pression totale et la pression de vapeur d'eau sont choisis respectivement, comme moteurs de transferts de chaleur, d'air et d'humidité. Le choix de ces moteurs de transferts, et plus particulièrement, la pression de vapeur d'eau pour la phase humide se justifie par leur caractère continu de ces moteurs permettant de traiter des problèmes des transferts hygrothermiques dans les parois multicouches. En effet, la pression de vapeur d'eau, contrairement à la teneur en eau, est une variable d'état qui ne dépend pas de la nature microstructurale du matériau, ce qui permet d'éviter les problèmes de discontinuité au niveau des interfaces entre couches de la paroi (Qin et al., 2008). De plus, la pression de vapeur d'eau est en relation directe avec l'humidité relative grandeur permettant de qualifier la qualité des ambiances habitables. Cela permet une interprétation facile des conditions aux limites hydriques qui sont généralement exprimées en termes d'humidité relative.

Dans l'élaboration du modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité, les paramètres d'entrée sont exprimés en fonction des propriétés thermiques et hydriques des matériaux qui peuvent être déterminées expérimentalement. Ces propriétés sont fortement dépendantes de l'état hygrothermique des matériaux.

Dans l'optique d'utiliser avec confiance ce modèle de prédiction des transferts hygrothermiques des validations, à la fois analytiques et expérimentales ont été, ensuite, réalisées. L'intérêt de la validation analytique est de vérifier la précision de la résolution numérique proposée par l'outil de simulation utilisé. Dans cette démarche, un cas d'étude de séchage de bois a été choisi. Concernant la confrontation expérimentale, un dispositif expérimental a été mis en place au laboratoire afin d'étudier le comportement hygrothermique de plusieurs configurations de parois multicouches à une petite échelle. Le banc expérimental a permis de suivre l'évolution de la température et de l'humidité relative tout au long de l'épaisseur de l'échantillon soumis à des conditions aux limites contrôlées.

Au final, une investigation liée au comportement hygrothermique selon le degré de sensibilité des propriétés des matériaux d'une paroi multicouche, est réalisée dans le but d'appréhender les facteurs les plus déterminants durant les processus de transfert.

## II.2 Modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments

### II.2.1 Hypothèses du modèle

Dans ce travail, le modèle des transferts couplés dans les matériaux poreux de construction (considérés comme un milieu contenant des proportions variables d'eau liquide, de vapeur

d'eau et d'air sec), est basé sur le modèle de (Luikov, 1966). Nous avons énuméré, ci-dessous, les principales hypothèses retenues dans le développement du modèle proposé :

- Un équilibre thermodynamique local (au niveau du pore) est supposé exister entre les deux phases gazeuse et liquide ;
- La phase liquide est constituée uniquement d'eau pure (les paramètres thermo-physiques retenus sont ceux de l'eau pure) ;
- Les fluides composant le milieu poreux sont supposés incompressibles et continus ;
- Le milieu poreux est considéré comme un milieu continu, homogène et isotrope ;
- La phase gazeuse obéit à la loi des gaz parfaits ;
- L'hystérèse et la réaction chimique entre phases ne sont pas prises en compte ;
- La variation du pouvoir de stockage d'humidité en fonction de la température est négligée ;
- Les transferts de chaleur par radiation sont négligés ;
- Le milieu solide est indéformable et non réactif ;
- L'effet gravitationnel est considéré très faible par rapport aux autres modes de transferts ;

## II.2.2 Equations gouvernantes des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité

La modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes des bâtiments est régie par l'établissement des équations de bilan massique et énergétique pour chaque phase en présence. Par conséquent, les bilans massiques de l'humidité (eau liquide, vapeur d'eau et d'air sec) ainsi que le bilan énergétique sont exprimés comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -div(j_l + j_v) \quad (\text{II.1})$$

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} = -div(j_a) \quad (\text{II.2})$$

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = -div(j_q) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$u$  [ $kg/m^3$ ] qui représente la teneur en eau totale (liquide et vapeur d'eau),

$u_a$  [ $kg/m^3$ ] la teneur en air sec,

$j_l$  [ $kg/m^2s$ ] la densité de flux massique de la phase liquide,

$j_v$  [ $kg/m^2s$ ] la densité de flux massique de la vapeur d'eau,

$j_a$  [ $kg/m^2s$ ] la densité de flux massique de l'air sec,

$j_q$  [ $J/(m^2 \cdot s)$ ] la densité de flux de chaleur,

$t$  [s] le temps,

$T$  [K] la température,

$C_p$  [J/kg · K] la chaleur spécifique,

$\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] la masse volumique sèche.

### II.2.2.1 Transfert multiphasique d'humidité

Dans les matériaux poreux insaturés, le transfert d'humidité se produit sous deux formes : liquide et vapeur d'eau. Le transfert d'eau liquide est induit par un gradient de pression capillaire, il est obtenu par l'application directe de la loi de Darcy. Le transport de la vapeur d'eau est un processus diffusionnel sous un gradient de pression de vapeur, régi par la loi de Fick.

Les équations (II.4) et (II.5) représentent respectivement les densités de flux massique des deux phases : eau liquide et vapeur d'eau. L'équation (II.6) exprime la densité de flux massique totale.

$$j_l = -k_l \nabla P_c - k_{fl} \nabla P \quad (\text{II.4})$$

$$j_v = -k_v \nabla P_v - k_{fv} \nabla P \quad (\text{II.5})$$

$$j_m = j_l + j_v = -k_l \nabla P_c - k_v \nabla P_v - k_f \nabla P \quad (\text{II.6})$$

Où :

$P_c$  [Pa] représente la pression capillaire,

$P_v$  [Pa] la pression de vapeur d'eau,

$k_l$  [kg/(m · s · Pa)] la conductivité hydraulique,

$k_v$  [kg/(m · s · Pa)] la perméabilité à la vapeur d'eau, et,

$k_f = k_{fl} + k_{fv}$  [kg/(m · s · Pa)] les coefficients d'infiltration liquide, vapeur d'eau et total.

En considérant l'hypothèse d'un équilibre thermodynamique local au niveau du pore entre la phase gazeuse et liquide, la loi de Kelvin est applicable (Nilsson, 2005), d'où :

$$P_c = \frac{RT \rho_e}{M} \ln \left( \frac{P_v}{P_{v_{sat}}} \right) \quad (\text{II.7})$$

Puis en utilisant la loi de Kelvin, le gradient de pression capillaire est transformé en une combinaison de gradient de pression de vapeur d'eau et un gradient de température avec un coefficient qui exprime la contribution d'une différence de température dans le transfert de l'eau liquide.

$$\nabla P_c = \left[ \frac{RT\rho_e}{M} \frac{1}{P_v} \right] \nabla P_v + \left[ \frac{RT\rho_e}{M} \left( \frac{\partial \ln \left( \frac{P_v}{P_{v_{sat}}} \right)}{\partial T} \right) + \frac{R\rho_e}{M} \ln \left( \frac{P_v}{P_{v_{sat}}} \right) \right] \nabla T \quad (\text{II.8})$$

Où :

$M$  [kg/mol] représente la masse molaire de l'eau,

$R$  [J/mol · K] la constante des gaz parfaits,

$\rho_e$  [kg/m<sup>3</sup>] la masse volumique de l'eau, et,

$P_{v_{sat}} = \exp \left( 23.5771 - \frac{4042.9}{T-37.58} \right)$  [Pa] la pression de vapeur saturante.

En introduisant l'équation (II.8) dans l'équation (II.4), on aura :

$$j_l = - \left[ k_l \frac{M}{RT\rho_e} \frac{1}{P_v} \right] \nabla P_v - \left[ k_l \left( \frac{RT\rho_e}{M} \left( \frac{\partial \ln \left( \frac{P_v}{P_{v_{sat}}} \right)}{\partial T} \right) + \frac{R\rho_e}{M} \ln \left( \frac{P_v}{P_{v_{sat}}} \right) \right) \right] \nabla T - k_{fl} \nabla P \quad (\text{II.9})$$

Donc la densité du flux massique de la phase liquide s'écrit sous la forme :

$$j_l = -k_l^* \nabla P_v - k_T \nabla T - k_{fl} \nabla P \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$k_l^* = k_l \frac{RT\rho_e}{M} \frac{1}{P_v}$  [kg/(m · s · Pa)] qui représente la conductivité de l'eau liquide due à un

gradient de pression de vapeur, et,  $k_T = k_l \left( \frac{RT\rho_e}{M} \left( \frac{\partial \ln \left( \frac{P_v}{P_{v_{sat}}} \right)}{\partial T} \right) + \frac{R\rho_e}{M} \ln \left( \frac{P_v}{P_{v_{sat}}} \right) \right)$  [kg/(m · s · K)] la

conductivité hydraulique due à un gradient de température. Ce terme ne représente pas une diffusion résultante d'un gradient de température. Il s'agit simplement d'un terme de diffusion parasite due au choix du moteur de transfert (le passage de  $P_c$  à  $P_v$ ) (Hans Janssen, 2011).

Au final, la densité du flux massique total est exprimée comme suit :

$$j_m = -k_m \nabla P_v - k_T \nabla T - k_f \nabla P \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$k_m = k_v + k_l^*$  [kg/(m · s · Pa)] qui représente la Perméabilité totale en humidité.

Donc, le bilan massique de la phase humide devient :

$$C_m \rho_s \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div} (k_m \nabla P_v + k_T \nabla T + k_f \nabla P) \quad (\text{II.12})$$

Où :

$C_m = (1/P_{v_{sat}}) \cdot (\partial \omega / \partial \varphi)$  [kg/kg · Pa] est la capacité de stockage hydrique du matériau, tandis que  $\varphi$  [%] représente l'humidité relative du matériau.

### II.2.2.2 Transfert de la phase gazeuse

En plus du transfert de l'eau liquide et de la vapeur d'eau sous des gradients de pressions capillaire et pression de vapeur d'eau, un transfert d'air sec et de vapeur d'eau se produit, dans le matériau poreux, par un processus d'infiltration dû à un gradient de pression totale  $\nabla P$ . Ce phénomène d'infiltration gazeuse est représenté par (Luikov, 1966) et (Remki et al., 2012) comme suit :

$$j_a + j_v = -k_f \nabla P \quad (\text{II.13})$$

D'un autre côté, pour formuler l'équation de bilan massique de la phase gazeuse, la vapeur d'eau et l'air sec sont combinés en utilisant les deux équations (II.14) et (II.15).

$$u_g = u_v + u_a = \varepsilon \frac{\rho_g}{\rho_s} (1 - S_l) \quad (\text{II.14})$$

$$\rho_g = \frac{PM}{RT} \quad (\text{II.15})$$

En combinant les équations (14) et (15) on aura :

$$u_g = \varepsilon \frac{\rho_g}{\rho_s} (1 - S_l) = \frac{PM}{\rho_s RT} \varepsilon (1 - S_l) \quad (\text{II.16})$$

Où :

$\varepsilon [-]$  traduit la porosité du milieu, et  $S_l [-]$ , le degré de saturation.

En procédant par une dérivation partielle de l'équation (II.16), on aura :

$$d \left( \frac{PM}{\rho_s RT} \varepsilon (1 - S_l) \right) = \left( \frac{M}{\rho_s RT} \varepsilon (1 - S_l) \right) dP - \left( \frac{PM}{\rho_s RT^2} \varepsilon (1 - S_l) \right) dT - \left( \frac{PM \varepsilon}{\rho_s RT} \right) dS_l \quad (\text{II.17})$$

Comme  $T^2 \ll \frac{M}{\rho_s RT} \varepsilon (1 - S_l)$  et  $T > S_l$  la contribution de ces deux derniers termes dans l'équation (II.17) sont négligés, donc :

$$d \left( \frac{PM}{\rho_s RT} \varepsilon (1 - S_l) \right) = \left( \frac{M}{\rho_s RT} \varepsilon (1 - S_l) \right) dP \quad (\text{II.18})$$

En introduisant l'équation (II.18) dans l'équation de bilan de la phase gazeuse, on aura :

$$C_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(k_f \nabla P) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$C_a = \frac{M}{\rho_s RT} \varepsilon (1 - S_l) [s^2/m^2]$  : La capacité de l'air humide.

### II.2.2.3 Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur dans les milieux poreux se produit sous trois formes (Crausse et al., 1996) : une conduction sous un gradient de température exprimée par la loi de Fourier, une advection de la chaleur sensible à travers les flux de liquide et de vapeur d'eau et un transfert de chaleur latente de changement de phase porté par la vapeur d'eau. Ainsi, la densité du flux de chaleur est exprimée comme suit :

$$j_q = -\lambda \nabla T + h_l j_l + h_v j_v \quad (\text{II.20})$$

$$j_q = -\lambda \nabla T + h_l j_m + L_v j_v \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$h_l = c_l (T - T_{ref}) \quad \text{et} \quad h_v = c_l (T - T_{ref}) + L_v = h_l + L_v \quad (\text{II.22})$$

Où :

$\lambda$  [ W/m.K ] représente la conductivité thermique,  
 $h_l, h_v$  [ J/kg ] les enthalpies massiques de l'eau liquide et de la vapeur d'eau,  
 $L_v$  [ J/kg ] la chaleur latente de vaporisation,  
 $c_l$  [ J/kg · K ] la capacité thermique massique,  
 $T_{ref}$  [ K ] la température de référence.

En remplaçant les densités de flux massique total et de vapeur d'eau exprimées dans les équations (5) et (11) respectivement, la forme finale de la densité du flux de chaleur est écrite comme suit :

$$j_q = -(\lambda + h_l k_T) \nabla T - h_l (k_m \nabla P_v + k_f \nabla P) + L_v j_v \quad (\text{II.23})$$

Introduisant l'expression finale du flux thermique, l'équation de bilan de la conservation d'énergie devient :

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \nabla T + \alpha \nabla P_v + \gamma \nabla P) + L_v C_m \sigma \frac{\partial P_v}{\partial t} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$\alpha = h_l k_m$  [ m<sup>2</sup>/s ] qui représente le coefficient de transfert thermique par advection dû au gradient de pression de vapeur d'eau,

$\gamma = h_l k_f$  [ m<sup>2</sup>/s ] le coefficient de transfert thermique par advection dû au gradient de pression totale, et,  $\sigma = \text{div}(j_v) / \text{div}(j_m)$  le ratio entre l'échange massique de la vapeur d'eau et l'échange massique total.

Par conséquent, les équations (II.12), (II.19) et (II.24) représentent le modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité régi par trois moteurs de transferts (la pression de vapeur d'eau pour la phase humide, la pression totale pour la phase gazeuse et la température

pour la chaleur). L'utilisation de ces moteurs de transfert ( $P_v, P, T$ ) permet de justifier l'hypothèse de continuité de ces grandeurs au niveau des interfaces entre les couches (cas des parois multicouches). En effet, la température, la pression de vapeur d'eau et la pression totale sont des variables d'état qui ne dépendent pas de la nature microstructurale des matériaux.

Finalement, les bilans massique et énergétique traduisant les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité pour les parois multicouches sont représentés dans l'équation (II.25). Le système d'équation en question, est un système d'équation aux dérivées partielles fortement couplées, avec des paramètres d'entrées non-linéaires, dépendant fortement de l'état hygrothermique du matériau.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{m_i} \rho_{s_i} \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}(k_{m_i} \nabla P_v + k_{T_i} \nabla T + k_{f_i} \nabla P) \\ C_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(k_f \nabla P) \\ C_{p_i} \rho_{s_i} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_i \nabla T + \alpha_i \nabla P_v + \gamma_i \nabla P) + L_v \rho_{s_i} \sigma_i C_{m_i} \frac{\partial P_v}{\partial t} \end{array} \right. \quad (\text{II.25})$$

Avec  $i = 0 : n$  représente la position de la couche dans une paroi multicouche.

### II.2.3 Interaction enveloppe - ambiance : Conditions initiales et aux limites

La justification des conditions aux limites au niveau des interfaces en contact direct avec l'ambiance est difficile à déterminer. Cette justification doit assurer le couplage entre les grandeurs microscopiques définies à l'intérieur du matériau et celles d'ordre macroscopique liées à l'écoulement de flux externe.

Dans ce modèle, les échanges convectifs de masse et de chaleur sont considérés au niveau des faces en contact avec les ambiances intérieures et extérieures. Concernant la pression totale, des conditions aux limites de type Dirichlet sont imposées.

Les trois équations (II.26), (II.27) et (II.28) résument les conditions aux limites présent en compte pour  $i = 0$  et  $i = n$  :

$$k_{m_{0,n}}(\omega) \nabla P_v + k_{T_{0,n}} \nabla T + k_{f_{0,n}} \nabla P = h_{m_{ext,int}} (P_{v_{ext,int}} - P_v) \quad (\text{II.26})$$

$$\begin{aligned} & \lambda_{0,n} \nabla T + \alpha_{0,n} \nabla P_v + \gamma_{0,n} \nabla P \\ & = h_{c_{ext,int}} (T_{ext,int} - T) + (1 - \sigma) L_v h_{m_{ext,int}} (P_{v_{ext,int}} - P_v) \end{aligned} \quad (\text{II.27})$$

$$P_0 = P_{ext} \quad \text{et} \quad P_n = P_{int} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

*ext* et *int* qui représentent respectivement les ambiances extérieure et intérieure par rapport à la paroi,

$h_m$  [kg/(m<sup>2</sup> · s · Pa)] le coefficient de transfert massique par convection, et,

$h_c$  [W/m<sup>2</sup> · K] le coefficient de transfert thermique par convection.

Les coefficients de transferts massique et thermique par convection dépendent de plusieurs paramètres (notamment la condition d'écoulement de l'air, la température, la géométrie du bâtiment...) ce qui rend leur détermination, complexe. Dans cette étude, le coefficient de transfert thermique par convection déterminé dans les travaux de (Schaube and Werner, 1986) est utilisé. Le coefficient de transfert massique par convection est déduit du coefficient de transfert thermique par convection en considérant l'analogie d'Illig (Illig, 1952) qui a été approuvée expérimentalement par (Schwarz, 1971).

$$h_m = 7 \cdot 10^{-9} h_c \quad (\text{II.29})$$

Les valeurs usuelles des coefficients de transferts massique et thermique pour les ambiances extérieure et intérieure sont résumées dans le Tableau II.1 (Qin, 2008).

**Tableau II.1.** Valeurs usuelles des coefficients de transfert thermique et massique par convection pour les surfaces extérieure et intérieure des parois.

Surface de la paroi de bâtiment	Coefficient de transfert par convection	
	Thermique $h_c$ [W/m <sup>2</sup> · K]	Massique $h_m$ [kg/(m <sup>2</sup> · s · Pa)]
Extérieure	17	$75 \times 10^{-9}$
Intérieure	8	$25 \times 10^{-9}$

Concernant les interfaces entre les couches successives, un contact parfait entre les différentes couches est supposé vérifié. Cette hypothèse justifie la continuité des moteurs de transferts choisis qui sont des variables d'état décrivant l'état thermodynamique des fluides. Par conséquent, ils ne sont pas tributaires du support solide et sa distribution porale.

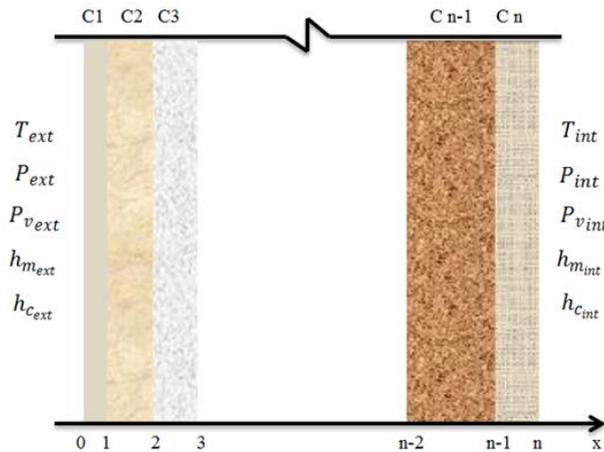
Donc, les conditions aux limites au niveau des interfaces entre les couches de l'enveloppe sont représentées comme suit pour  $i = 1, 2, \dots, n - 1$  :

$$P_{v_{ig}} = P_{v_{i+1d}} \quad T_{ig} = T_{i+1d} \quad P_{ig} = P_{i+1d} \quad (\text{II.30})$$

Les indices  $g$  et  $d$  représente respectivement les interfaces gauche et droite de la couche constituant la paroi.

Les conditions initiales sont résumées dans l'équation (II.31).

$$P_v(i, 0) = P_{v_{ini_i}} \quad P(i, 0) = P_{ini_i} \quad T(i, 0) = T_{ini_i} \quad (\text{II.31})$$



**Figure II.1** : Schéma général d'une paroi multicouche

## II.3 Modélisation numérique

Pour la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches, l'environnement COMSOL Multiphysics a été choisi. L'outil en question est largement utilisé dans la résolution numérique par des méthodes d'éléments finis de problèmes d'ingénierie et de recherche. Il est plus particulièrement adapté au traitement des problèmes multiphysiques, où plusieurs phénomènes physiques se conjuguent.

Dans ce travail, vu le caractère fortement couplé du système d'équations aux dérivées partielles décrivant le transfert de chaleur et de masse, ainsi que la dépendance des paramètres d'entrée de l'état hygrothermique des matériaux, la résolution numérique s'avère complexe. Le recours à un logiciel tel que COMSOL Multiphysics est, en effet, justifié. Ce dernier est conçu pour entreprendre la résolution des équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis en utilisant ses solveurs de problèmes instationnaires.

### II.3.1 Comparaison avec des solutions analytiques

Cette première validation consiste à comparer la résolution numérique du modèle élaboré à une solution analytique exacte. Le principal objectif de cette confrontation est de vérifier le degré de fiabilité de la résolution numérique proposée par l'outil de simulation utilisé.

Pour cela, la solution numérique obtenue moyennant l'utilisation de e COMSOL Multiphysics a été comparée à une solution analytique proposée par (Chang and Weng, 2000). Dans leur démarche, ces auteurs ont résolu analytiquement les équations de transferts couplés de chaleur et de masse. En effet, moyennant une transformation de Laplace, le systèmes d'équations aux dérivées partielles représentant le modèle a été réduit en une unique équation différentielle

ordinaire d'ordre quatre résolue analytiquement. La solution du problème a été obtenue par la transformée de Laplace inverse. A noter que cette solution analytique est rendue possible sous certaines hypothèses bien précises telles que la considération de paramètres d'entrée constants (système d'équations aux dérivées partielles linéaire).

Cette première validation a été réalisée sur une paroi monocouche et l'effet du gradient de pression totale n'a pas été considéré. Chang et al ont utilisé le potentiel en humidité comme moteur de transfert hydrique. La démarche a consisté en une transformation avec une analyse adimensionnelle du modèle qui a permis de déduire la forme finale du système d'équations aux dérivées partielles représentée comme suit :

$$\begin{cases} C\rho_s \frac{\partial \omega'}{\partial t} = \text{div}(D\nabla\omega' + D\varepsilon\nabla T) \\ C_p\rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda\nabla T + \alpha'\nabla\omega') - L_v\sigma\rho_s C \frac{\partial \omega'}{\partial t} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$\omega' = u/C\rho_s$  [°M] qui représente le potentiel d'humidité,

$C$  [kg/(kg.°M)] la capacité d'humidité pour un potentiel d'humidité,

$D = k_m C/C_m$  [kg/(m.s.°M)] le coefficient de diffusion d'humidité,

$\varepsilon = k_T/D$  [(°M)/K] le coefficient de thermogradient, et,

$\alpha' = \alpha C/C_m$  [m²Pa/(s.°M)] le coefficient de transfert thermique par convection dû au gradient de potentiel d'humidité.

Dans le but de comparer la résolution numérique du modèle de transfert hygrothermique élaboré avec la solution analytique proposée par Chang, les mêmes paramètres d'entrée et les conditions aux limites utilisés dans la littérature (Liu, 1991) ont été retenus dans la simulation. Le cas d'étude qui a servi à cette confrontation traite le phénomène de séchage d'une plaque de bois décrit dans les travaux de (Liu, 1991). La configuration étudiée est schématisée dans la figure 2 et les données d'entrée ont été résumées dans le Tableau II.2.

**Tableau II.2 : Paramètres de l'application**

Paramètre	Valeur	unit
$\rho_s$	370	[kg/m³]
D	$2.2 \times 10^{-8}$	[kg/m s °M]
C	0.01	[kg/kg°M]
$\varepsilon$	2	[°M/K]
$C_p$	2500	[j/kg · K]
$\lambda$	0.65	[W/m K]
$\sigma$	0.3	[-]
$L_v$	$2.5 \times 10^6$	[J/kg]

Des conditions aux limites de type flux imposés ont été considérées. Les transferts hygrothermiques aux interfaces paroi-ambiance s'opèrent par convection massique (de l'humidité) et par convection thermique.

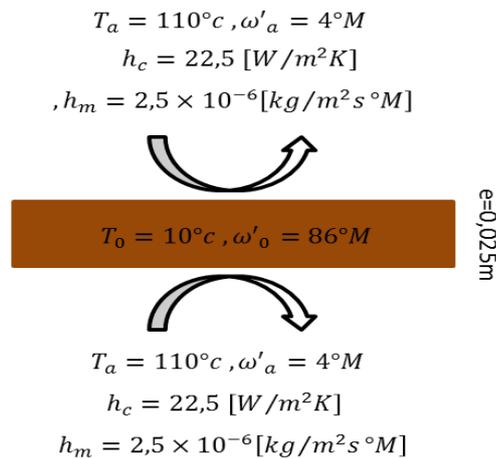
Les deux équations représentant les conditions aux limites sont écrites comme suit :

$$\begin{aligned} D(\nabla\omega' + \varepsilon\nabla T) &= h'_m(\omega'_a - \omega') \\ \lambda\nabla T + \alpha'\nabla\omega' &= h_c(T_a - T) + (1 - \sigma)L_v h_m(\omega'_a - \omega') \end{aligned} \quad (\text{II.33})$$

Où :

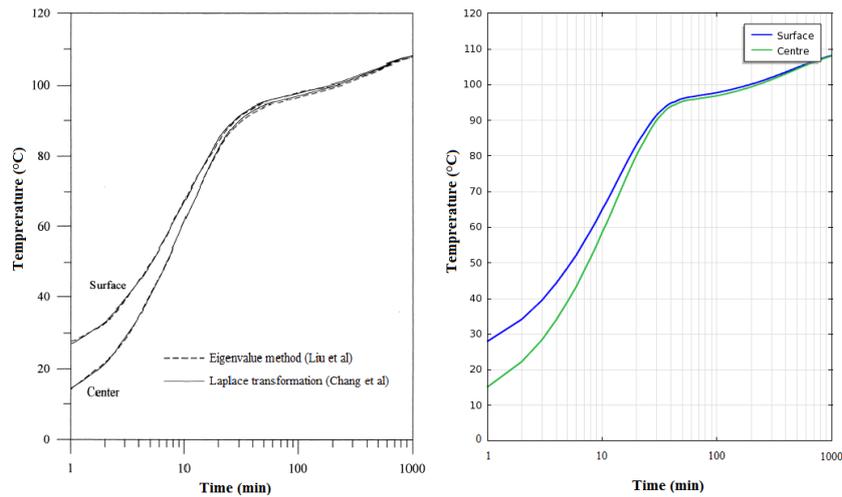
$\omega'_a$  [°M] et  $T_a$  [K] représentent respectivement le potentiel d'humidité et la température de l'ambiance.  $h_m$  [kg/m<sup>2</sup>.s.°M] représente un coefficient de transfert convectif massique et  $h_c$  [W/m<sup>2</sup>.K] un coefficient de transfert convectif thermique pour la chaleur.

Figure II.2 ci-dessous, résume les valeurs des conditions initiales et aux limites imposées lors de la simulation numérique.

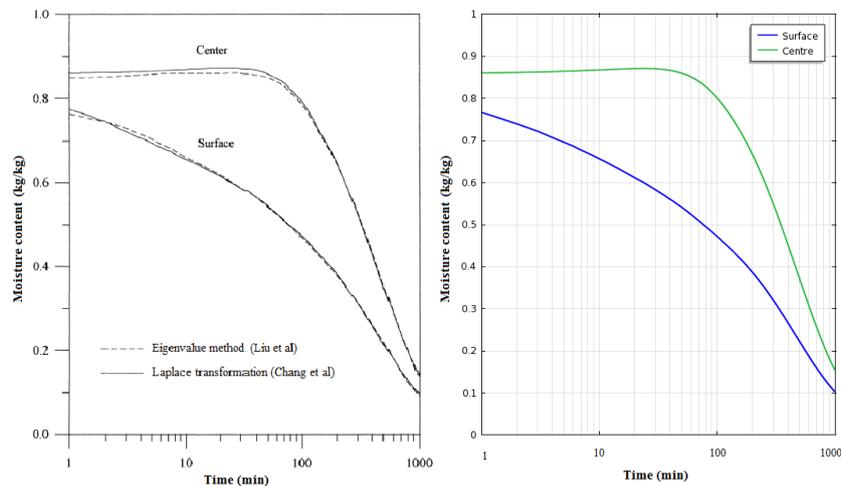


**Figure II.2 :** Conditions aux limites et initiales de la simulation

Les Figure II.3 et Figure II.4 représentent la confrontation entre les solutions numériques et analytiques relative à l'évolution au cours du temps de la température et de la teneur en eau au niveau de la surface et au milieu du matériau.



**Figure II.3 :** Confrontation entre la solution analytique (à gauche) et numérique (à droite) : évolution au cours du temps de la température à la surface et au centre du matériau



**Figure II.4 :** Confrontation entre la solution analytique (à gauche) et numérique (à droite) : évolution au cours du temps de la teneur en eau à la surface et au centre du matériau

Ces résultats montrent que la résolution numérique proposée par le modèle développé corrobore bien avec la solution analytique exacte. Cette bonne concordance permet de conclure, d'une part, que le modèle proposé prédit fidèlement les phénomènes de transferts hygrothermiques, et d'autre part que la résolution numérique proposée par COMSOL Multiphysics (qui va être utilisée dans la suite de ce travail), est fiable.

### II.3.2 Confrontation expérimentale à petite échelle

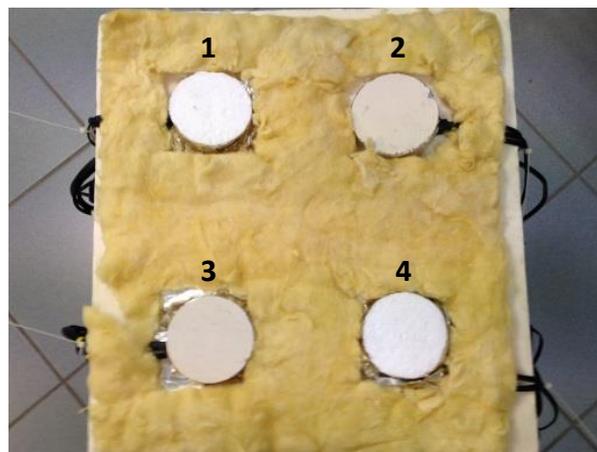
Cette partie est destinée à une autre façon de valider le modèle développé. Il s'agit, cette fois-ci en une confrontation entre les simulations numériques et les données expérimentales. La validation expérimentale a été réalisée sur quatre configurations d'échantillons cylindriques. Dans cette expérimentation, les matériaux testés sont constitués de la brique pleine en terre

cuite, de l'aggloméré, du plâtre et du polystyrène expansé. Les épaisseurs des échantillons ont été prises assez faibles dans le but d'optimiser le temps de l'essai. En effet, au vu de la cinétique du transfert hygrothermique, le transfert hydrique, risque d'être relativement plus lent que le transfert thermique. Le diamètre des échantillons est de 8cm. Les échantillons testés et leurs épaisseurs sont résumés dans le Tableau II.3.

**Tableau II.3:** Configurations des échantillons testés

Echantillon	Configuration
1	Brique (3cm) + Plâtre (1cm)
2	Brique (3cm) + Polystyrène (1cm)
3	Aggloméré (3cm) + Plâtre (1cm)
4	Aggloméré (3cm) + Polystyrène (1cm)

Les échantillons ont été isolés latéralement par une feuille d'aluminium pour favoriser un transfert hygrothermique unidirectionnel (Figure II.5).



**Figure II.5:** Isolation des échantillons

Le principe de l'essai consiste à soumettre, au niveau d'une interface séparant deux ambiances hygrothermiquement contrôlées, les échantillons préparés. Pour chaque ambiance, la température est réglée avec un bain thermostaté qui alimente un échangeur de chaleur tubulaire (serpentin en cuivre traversée par de l'eau à température contrôlée). Pour le contrôle de l'humidité relative, des solutions salines saturées ont été utilisées. La Figure II.6 et la Figure II.7 représente le dispositif expérimental utilisé dans sa configuration initiale (sans isolant), un isolant a été appliqué sur les deux ambiances afin d'assurer la stabilité des conditions aux limites imposés.



Figure II.6 : Dispositif expérimental

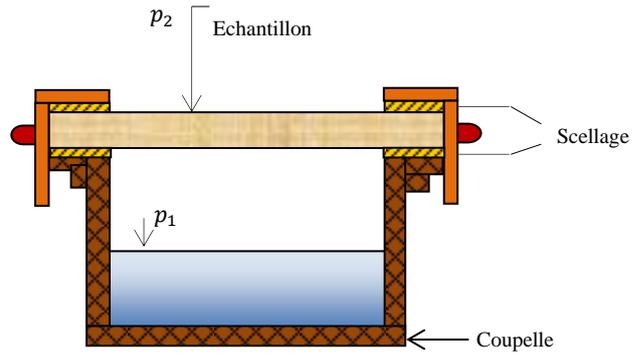


Figure II.7 : Zoom sur la coupelle placée dans le compartiment bas du dispositif

Les échantillons ont été soumis à des gradients constants de température et d'humidité relative. Le compartiment supérieur a été réglé à une température de 17°C (grâce à un des deux cryostats) et une humidité relative de 65% (grâce au bac contenant la solution saline saturée de nitrate d'ammonium). Le compartiment inférieur, quant à lui, a été fixé à la température de 33°C et à l'humidité relative de 35% (par le biais d'une solution saline saturée de chlorure de magnésium). Il est à noter que durant toute la durée de l'expérience, les variations moyennes enregistrées de la température et d'humidité relative au niveau des deux compartiments n'avaient pas dépassé, respectivement, 1°C et 2%, ce qui constitue des écarts acceptables.

Dans l'optique de suivre l'évolution des profils de température et de l'humidité relative dans les matériaux testés, des capteurs de température et d'hygrométrie ont été positionnés à différentes épaisseurs des échantillons. Ces capteurs ont été reliés directement à une centrale d'acquisition qui permet d'enregistrer, durant la période d'essai, la température et l'humidité relative à l'intérieur des matériaux testés pour des intervalles de temps réguliers de 5 minutes. Les Figure II.8 et Figure II.9 représentent les types de centrale d'acquisition et de capteurs de température et d'hygrométrie utilisés ainsi que leurs emplacements à différentes profondeurs dans les échantillons.

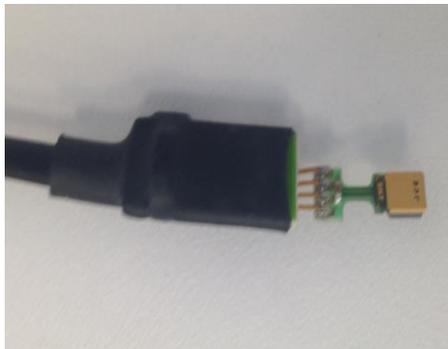
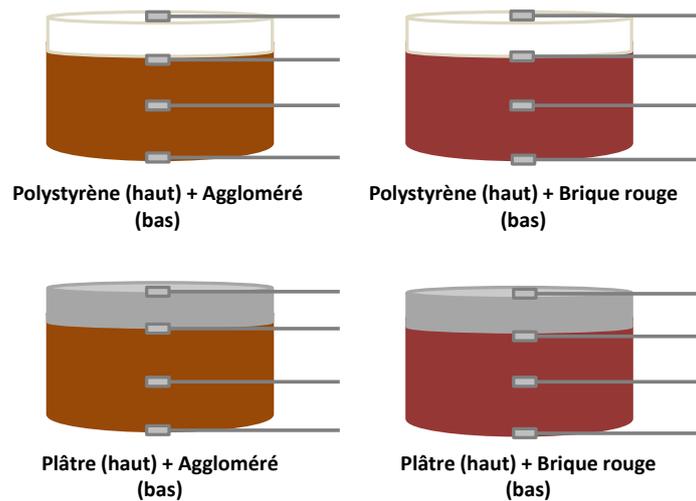


Figure II.8 : Centrale d'acquisition et capteur SHT75 de type Sensirion



**Figure II.9** : Positionnement des capteurs dans les échantillons testés

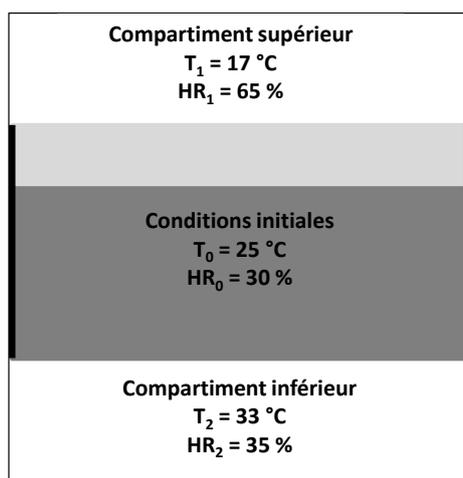
Vu la dimension des échantillons multicouches testés, il est important que les capteurs utilisés ne perturbent pas leur comportement hygrothermique. Pour cela, des capteurs (Sensirion de type SHT75) adaptés à ce type d'application sont utilisés (Qin et al., 2009), (Belarbi et al., 2008). Avec leur petite taille (profondeur de 3 mm et une largeur de 5 mm) une mesure stable et fiable est assurée. Les caractéristiques techniques des capteurs de température et d'hygrométrie SHT75 sont résumées dans le Tableau II.4

**Tableau II.4** : Caractéristiques techniques du capteur de température et d'hygrométrie SHT75

Caractéristiques techniques	
Précision d'humidité relative	1.8%
Précision de température	0.3°C
Résolution maximale	8 s
Plage de mesure d'humidité relative	0 to 100% HR
Plage de mesure de température	-40 to 125°C

### II.3.2.1 Résultats et discussion :

Afin de reproduire le comportement hygrothermique des configurations testées, une simulation numérique a été réalisée en utilisant le modèle de transferts couplés de chaleur d'air et d'humidité développé dans ce chapitre. Lors de la simulation numérique, les conditions initiales et aux limites ont été choisies à l'identiques aux des configurations expérimentales (voir Figure II.10 ci-dessous).



**Figure II.10:** Conditions aux limites des simulations

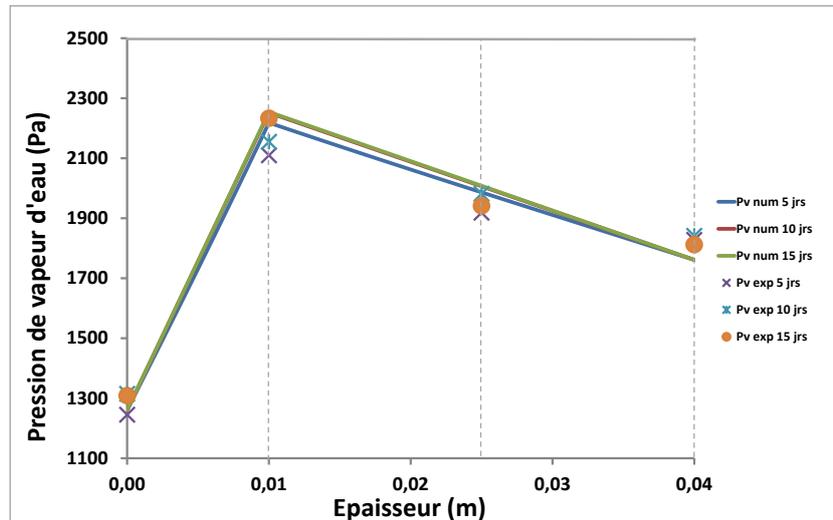
Dans le but de mieux reproduire numériquement le comportement hygrothermique des échantillons testés, une campagne de caractérisation des principales propriétés intrinsèques permettant de déduire les données d'entrée du modèle numérique proposé a été entreprise. Dans cette partie, on se limite à résumer dans le Tableau II.5 les principales propriétés des matériaux utilisés lors de cette expérience. Une étude plus détaillée de la caractérisation hygrothermique des matériaux de construction est présentée dans le chapitre suivant.

**Tableau II.5 :** Propriétés hydriques et thermiques des matériaux utilisés dans l'expérimentation dans les conditions sèches

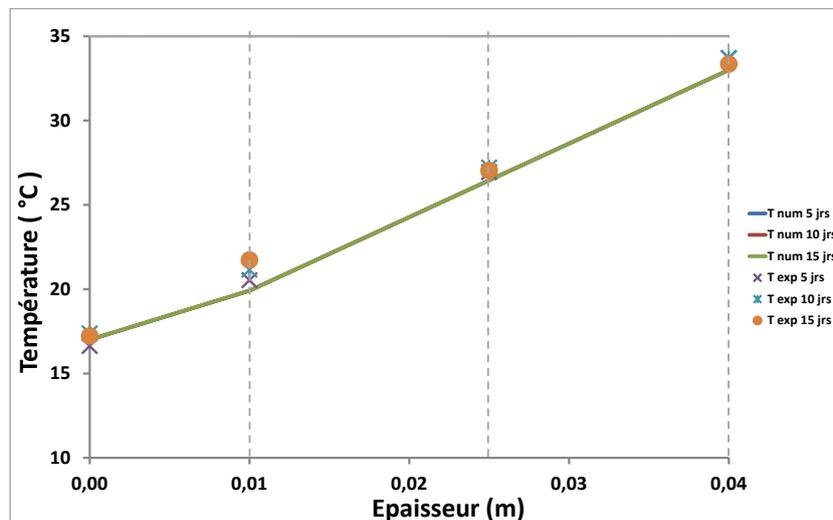
Propriétés	Aggloméré	Brique	Plâtre	Polystyrène
$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ](sec)	562	1650	1721	30.4
$C_p$ [j/kg · K](sec)	1794	850	852	1500
$\lambda$ [W/m · K](sec)	0.85	0.610	0.310	0.042
$k_m$ [kg/(m · s · Pa)]	$1.28 \times 10^{-11}$	$1.86 \times 10^{-12}$	$2.53 \times 10^{-12}$	$1.07 \times 10^{-12}$

La comparaison des distributions de la température et de la pression de vapeur d'eau au niveau des configurations multicouches étudiées, à la fois par l'expérimentation et par la simulation numérique, sont présentées respectivement dans les Figure II.11-Figure II.14 ci-après. Les traits continus correspondent aux résultats de la simulation numérique et les points représentent les données expérimentales.

La différence moyenne entre les grandeurs mesurées et prédites a été exprimée par l'intermédiaire de l'erreur quadratique moyenne (Zarr et al., 1995). Les erreurs moyennes pour chaque configuration sont présentées sur les figures relatives aux profils hydriques et thermiques.



(a) Profils de pression de vapeur d'eau ( $\delta_{RMS} = 4.99\%$ )

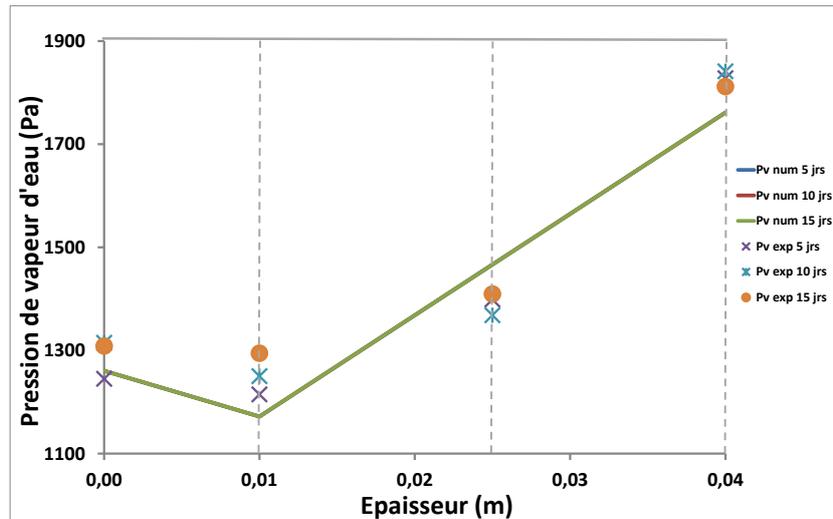


(b) Profils de température ( $\delta_{RMS} = 0.30\%$ )

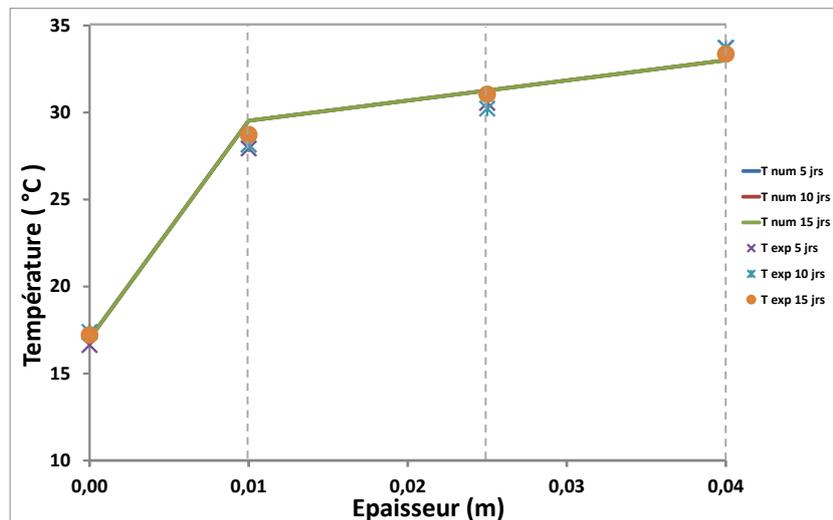
**Figure II.11:** Comparaison entre la simulation numérique et les données expérimentales pour la configuration 1 (plâtre + brique)

En analysant les Figure II.11-Figure II.14, il est évidemment relevé que la cinétique de transfert de chaleur est plus rapide relativement à celle des échanges hydriques. En effet, l'état d'équilibre est atteint après seulement une centaine d'heures, ce qui n'est pas le cas pour le transfert hydrique. De plus, les profils de température et de pression de vapeur d'eau changent d'allure pour les quatre échantillons en raison de la différence des propriétés intrinsèques de chaque matériau selon les configurations étudiées, notamment pour la capacité de stockage d'humidité. A titre d'exemple, les deux combinaisons de brique-plâtre et brique -polystyrène, présentent des distributions hygrothermiques complètement différentes, le plâtre favorise l'absorption de la vapeur d'eau ce qui explique la valeur élevée de la pression de vapeur d'eau (Figure II.11-(a)). Cependant, dans la configuration 2 (brique + polystyrène) une cinétique relativement rapide du transfert hydrique est constatée, cela est expliqué par l'importance de la valeur de la perméabilité à la vapeur d'eau du polystyrène qui favorise un phénomène dominant de la migration de l'humidité. De cette façon, la performance thermique de cet

isolant est dégradée à cause du transfert hydrique, cela peut être observé sur le profil de la température avec une légère augmentation des valeurs de températures (Figure II.12-(b)).



(a) Profils de pression de vapeur d'eau ( $\delta_{RMS} = 4.91\%$ )



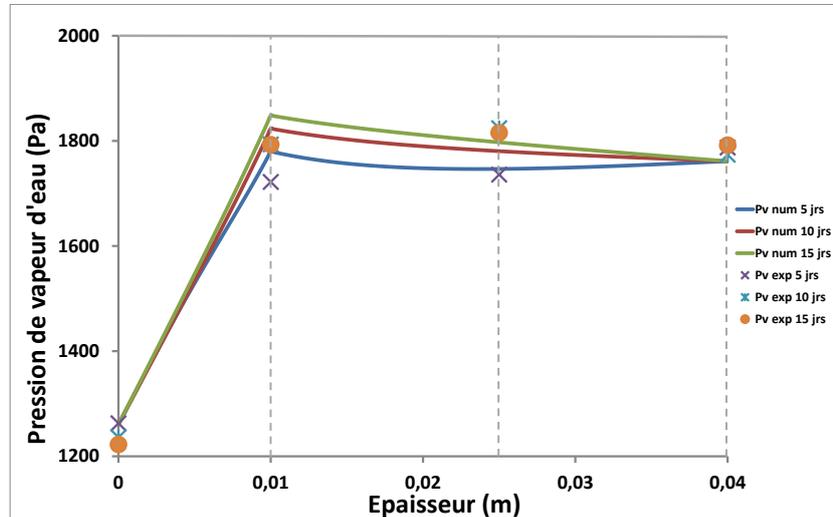
(b) Profils de température ( $\delta_{RMS} = 0.27\%$ )

**Figure II.12:** Comparaison entre la simulation numérique et les données expérimentales pour la configuration 2 (polystyrène + brique)

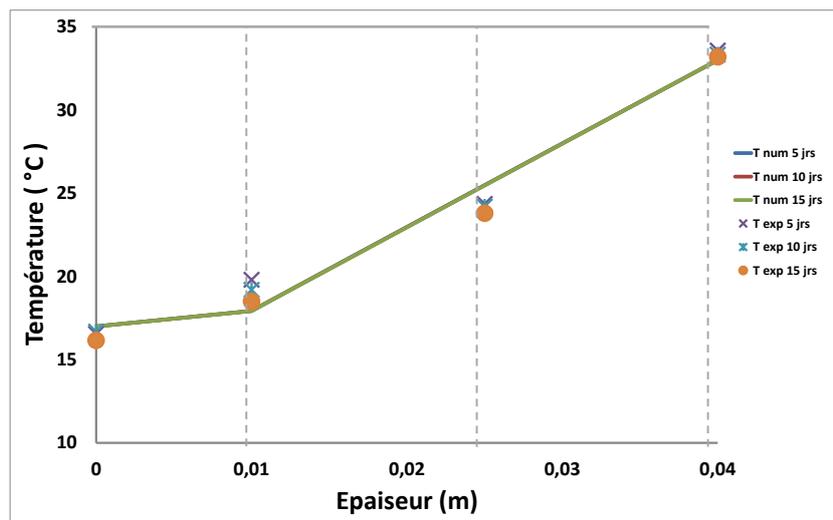
Concernant la combinaison du même isolant (polystyrène) avec de l'aggloméré, une bonne concordance du transfert hygrothermique est notée. Cela peut s'expliquer par la similitude des propriétés thermiques des deux matériaux.

En outre, en comparant les résultats expérimentaux obtenus avec les simulations effectuées, une bonne concordance est observée entre les profils de température pour les quatre configurations étudiées. Cette corrélation est illustrée par les faibles erreurs quadratiques moyennes entre les données numériques et expérimentales, où une erreur maximale de  $\delta_{RMS} = 0.27\%$  (polystyrène + brique). Pour les profils de température est obtenue. Pour les profils de pression de vapeur d'eau, les erreurs quadratiques sont relativement grandes,

avec une erreur maximale de  $\delta_{RMS} = 4.91\%$  (polystyrène + brique). Une meilleure concordance entre la prédiction numérique et les résultats expérimentaux est observée pour la configuration de matériaux constituée de polystyrène et de l'aggloméré (Figure II.13 et Figure II.14).



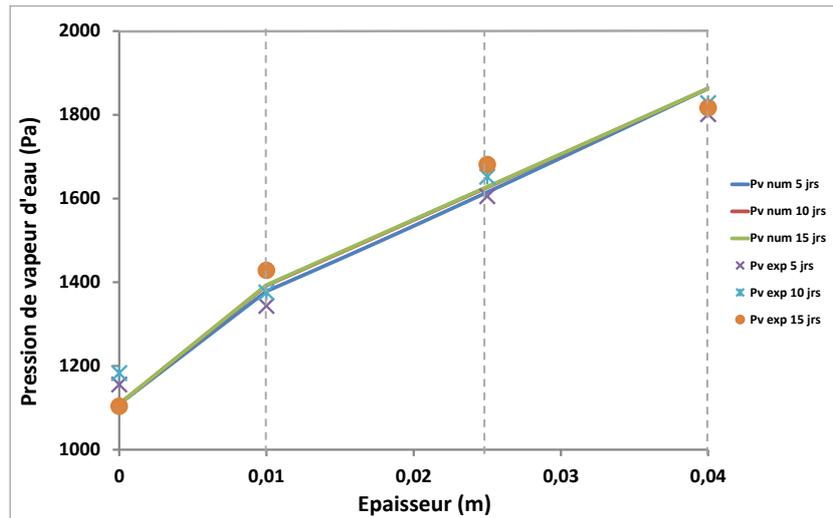
(a) Profils de pression de vapeur d'eau ( $\delta_{RMS} = 2.09\%$ )



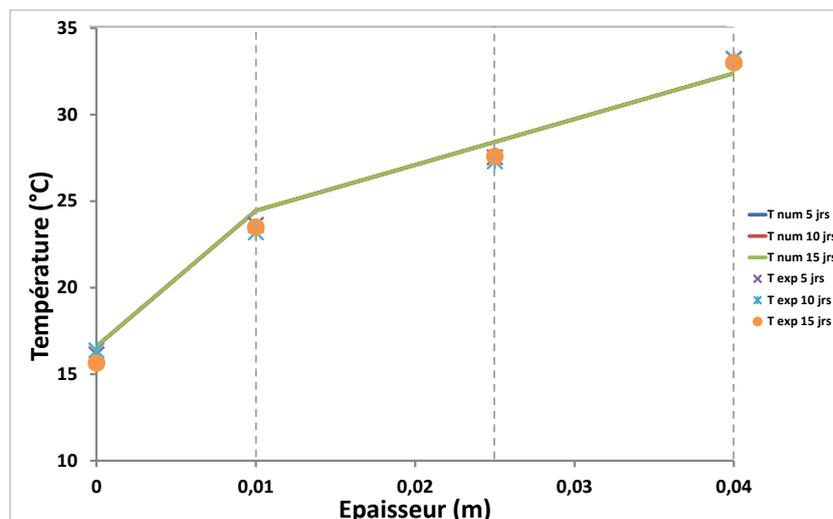
(b) Profils de température ( $\delta_{RMS} = 0.34\%$ )

**Figure II.13:** Comparaison entre la simulation numérique et les données expérimentales pour la configuration 3 (plâtre + aggloméré)

Ces erreurs peuvent parvenir soit, du processus expérimental, plus particulièrement l'implémentation des capteurs à l'intérieur du matériau lui-même (erreur sur la position) ou à l'interface entre deux matériaux différents, ce qui peut perturber leurs comportements hygrothermiques. Une autre source d'erreur, proviendrait des données d'entrées du modèle de transfert hygrothermique. Une faible variation dans ces données se répercute d'une façon sensible sur le résultat de la prédiction du comportement hygrothermique du matériau (Ferroukhi et al., 2014).



(a) Profils de pression de vapeur d'eau ( $\delta_{RMS} = 2.98\%$ )



(b) Profils de température ( $\delta_{RMS} = 0.28\%$ )

**Figure II.14:** Comparaison entre la simulation numérique et les données expérimentales pour la configuration 1 (polystyrène + aggloméré)

## II.4 Sensibilité du modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité vis-à-vis de la variation des propriétés hygrothermiques des matériaux

Dans ce chapitre, le modèle élaboré des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments est basé sur une description phénoménologique des transferts hygrothermique à une échelle macroscopique. Ce type de modélisation fait appel à des données d'entrée déterminées expérimentalement. Par conséquent, une bonne prédiction du comportement hygrothermique au niveau de la paroi est fortement tributaire du degré de précision des paramètres d'entrée du modèle déterminés expérimentalement.

D'un autre côté, dans le cas des parois multicouches, le choix de l'isolant est primordial afin d'assurer un confort hygrothermique dans l'ambiance habitable. Cependant, il existe plusieurs matériaux isolant avec des propriétés hygrothermiques différentes (données d'entrée), ce qui rend le choix du type d'isolant plus délicat.

Dans cette section, une étude de sensibilité du modèle de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité développé vis-à-vis de la précision de mesure des propriétés hygrothermiques des matériaux est entreprise. L'objectif de celle-ci est d'identifier les paramètres les plus influents sur la réponse hygrothermique des enveloppes de bâtiments.

#### II.4.1 Démarche de l'analyse de sensibilité

Une étude de sensibilité a été effectuée aux variabilités des paramètres d'entrée du modèle sur la prédiction du comportement hygrothermique des parois constituant l'enveloppe du bâtiment. Basée sur une méthode d'analyse locale, qui évalue quantitativement la réponse du modèle par rapport à une variation autour d'une donnée d'entrée. Une comparaison des résultats d'une simulation donnée par rapport à des résultats d'une simulation de référence a été entreprise. Cette comparaison est représentée par un indice de sensibilité qui est l'écart relatif des variations des champs de sortie aux valeurs de référence. L'écart relatif est calculé comme suit :

$$\delta_r = \frac{|x_{sim} - x_{ref}|}{x_{ref}} \times 100 \quad (\text{II.34})$$

Avec :  $\delta_r$  [%] représentant l'écart relatif,  $x_{sim}$  la valeur obtenue avec une variation et  $x_{ref}$  la valeur de référence sans variation.

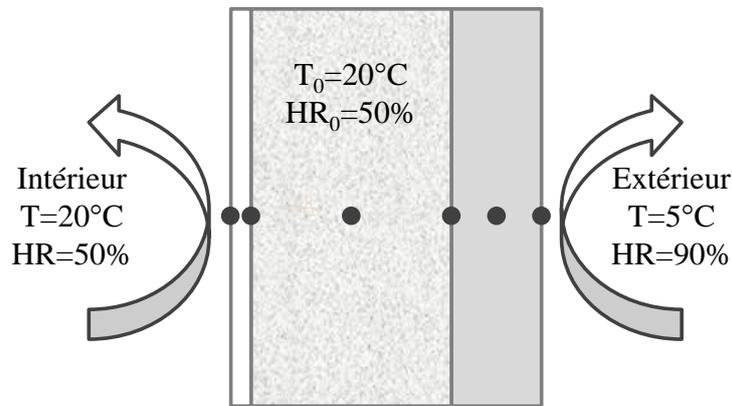
Dans cette étude, les principales propriétés hygrothermiques ont été considérées, notamment la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la perméabilité totale à l'humidité et la capacité de stockage d'humidité. Ce choix s'explique par leur degré de sensibilité sur l'état hygrothermique du matériau. Puisqu'elles traduisent l'importance des phénomènes de diffusion de la vapeur d'eau, du transfert thermique par conduction et le pouvoir tampon hygroscopique des matériaux.

Une variation de  $\pm 10\%$  est prise en compte, celle-ci représente une grandeur moyenne des incertitudes de mesures expérimentales qui peuvent découler soit des techniques de laboratoires proprement dites, soit de la spécificité des différentes méthodes de caractérisation choisies ou encore de la précision des capteurs.

#### II.4.2 Cas d'une paroi multicouche

Dans le cas d'étude que nous avons réalisé, la configuration retenue correspond à celle d'une paroi multicouche réaliste constituée de la façon suivante : de l'extérieur vers l'intérieur, nous

trouvons, un isolant en polystyrène ( $e = 9\text{cm}$ ), un mur en parpaing ( $e = 20\text{cm}$ ) et pour finir une couche intérieure d'enduit en plâtre ( $e = 2\text{cm}$ ). La composition et l'épaisseur de la paroi, ainsi que les conditions aux limites sont illustrées dans la Figure II.15.



**Figure II.15:** Configuration de la paroi étudiée

Les propriétés des matériaux constituant la paroi étudiée varient en fonction de l'état hydrique des matériaux, elles sont résumées dans le Tableau II.6.

**Tableau II.6 :** Propriétés des matériaux constituant les couches de la paroi simulée

Propriétés	Plâtre	Parpaing	Polystyrène
$\rho_s$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ](sec)	1353	863	20.4
$C_p$ [ $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ](sec)	852	1952	1385
$\lambda$ [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ](sec)	0.112	0.96	0.042
$C_m$ [ $\text{kg}/\text{kg} \cdot \text{Pa}$ ]	$C_{m_1}(\omega)$	$C_{m_2}(\omega)$	$C_{m_3}(\omega)$
$k_m$ [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ]	$2.53 \times 10^{-11}$	$1.17 \times 10^{-11}$	$1.87 \times 10^{-12}$

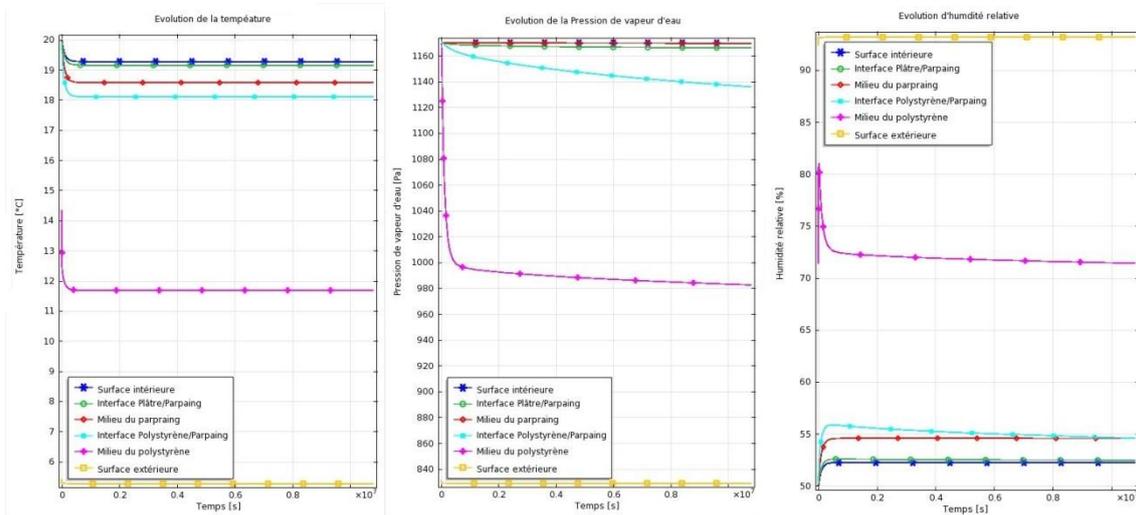
Dans le but d'étudier l'impact de l'isolant sur le comportement hygrothermique global de la paroi, la variation des données d'entrée est réalisée que sur la couche de l'isolant. Les cas de simulation réalisés sont définis dans le Tableau II.7.

**Tableau II.7 :** Cas de variation réalisés

Propriété	Simulation de référence	Variation de $\Delta=+10\%$	Variation de $\Delta=-10\%$
Conductivité thermique	$\lambda$	$1.10 \times \lambda$	$0.90 \times \lambda$
Perméabilité à l'humidité	$K_m$	$1.10 \times K_m$	$0.90 \times K_m$
Chaleur spécifique	$C_p$	$1.10 \times C_p$	$0.90 \times C_p$
Capacité de stockage d'humidité	$C_m$	$1.10 \times C_m$	$0.90 \times C_m$

## II.4.3 Analyse des résultats

La durée totale des simulations est de 3000 heures avec un pas de temps de 10 minutes. Les évolutions de la température, de la pression de vapeur d'eau ainsi que de l'humidité relative pour la simulation de référence sont représentées dans la Figure II.16.

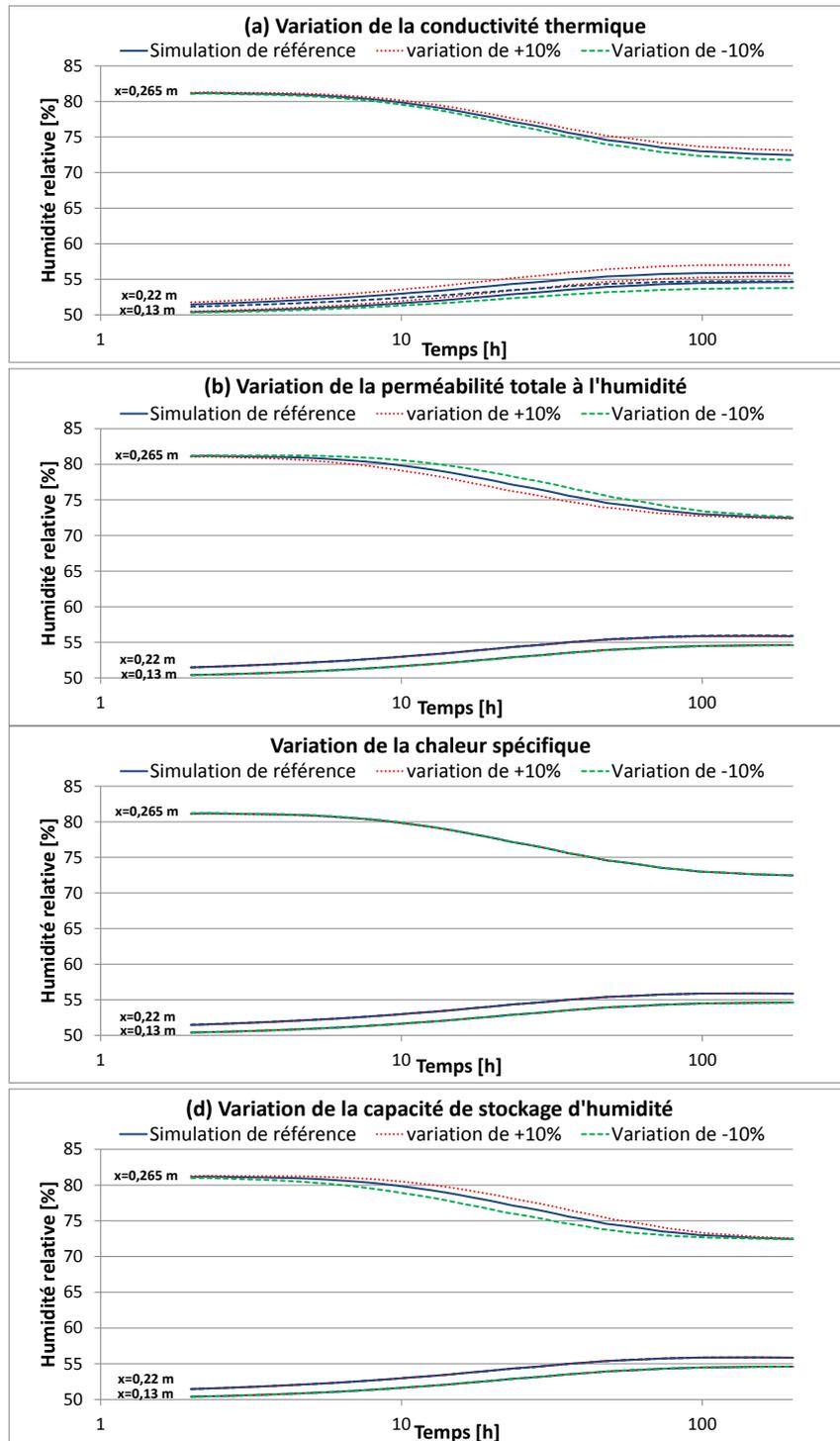


**Figure II.16 :** Evolution temporelle de la température, pression de vapeur d'eau et d'humidité relative

La Figure II.16 montre que le régime permanent est atteint après environ 100h pour le transfert thermique. En revanche, pour le transfert hydrique dont la cinétique est relativement lente, le régime permanent est atteint après 1000h de simulation (particulièrement au niveau du polystyrène et l'interface polystyrène/parpaing).

Pour procéder à une étude de variation significative, l'analyse de sensibilité est réalisée sur la phase transitoire des simulations (1000h). En effet, réaliser une étude de sensibilité dans un cas où le temps consacré au régime permanent est très long risque de faire apparaître une stagnation des valeurs (manque d'évolution dans le temps). Par conséquent, les écarts observés dans la phase transitoire n'auront plus d'effet sur l'analyse de sensibilité.

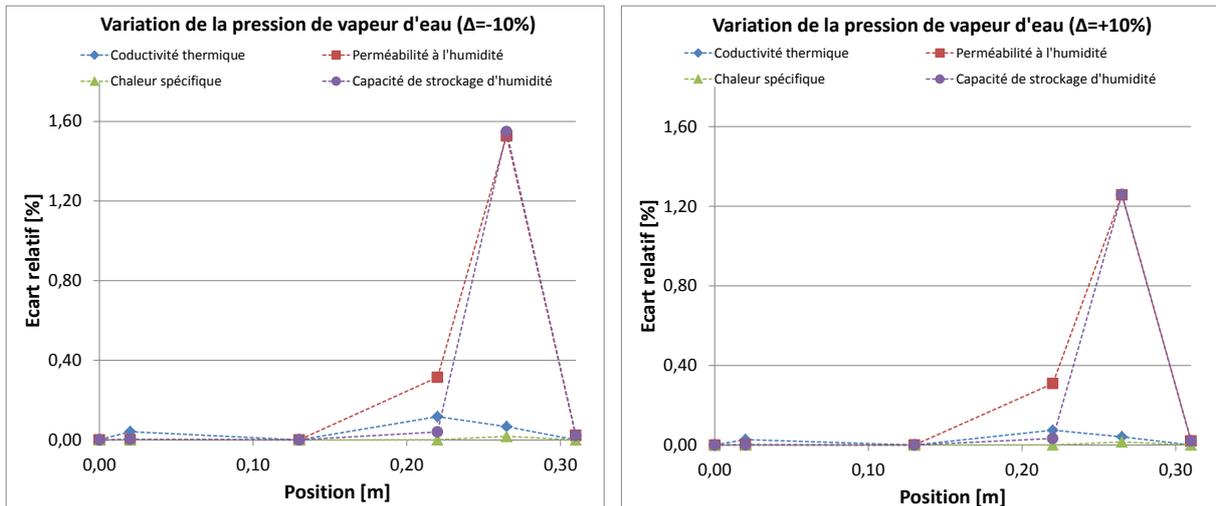
Les résultats de l'impact des variations des propriétés d'entrée sur les profils d'humidité relative sont représentés sur la Figure II.17. L'évolution de l'humidité relative est présentée à la fois aux centres respectifs du polystyrène et du parpaing, mais également au niveau de l'interface de ces deux matériaux (les zones où le transfert hygrothermique est bien illustré, voir Figure II.16).



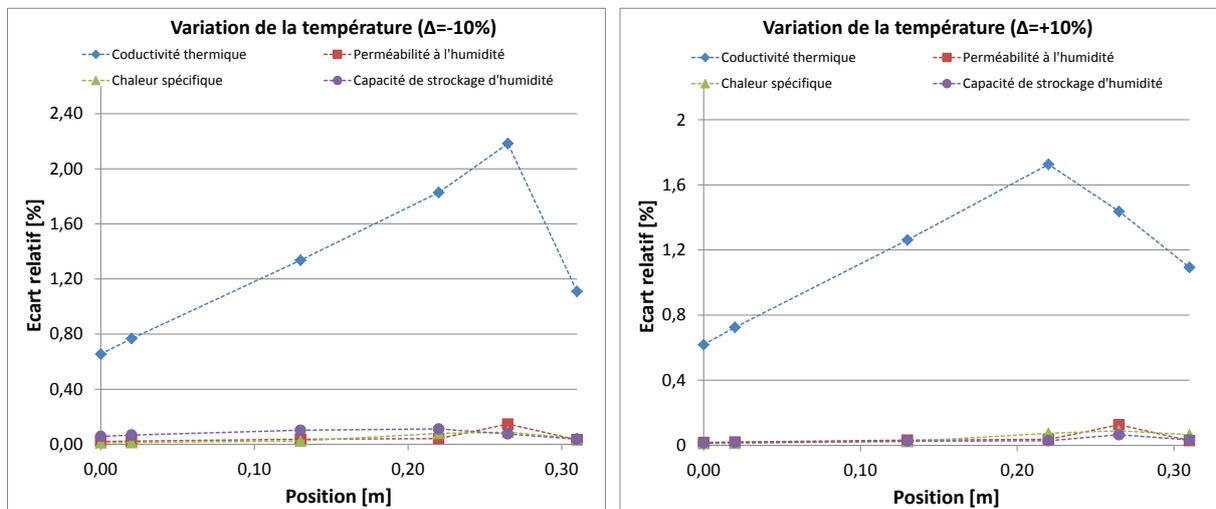
**Figure II.17 :** Impact de la variation des propriétés hygrothermiques sur l'évolution temporelle d'humidité relative

Au premier abord, une variation temporelle des champs de sorties (humidité relative) engendrée par la variation des propriétés hygrothermiques est remarquée, en revanche l'allure des courbes demeure la même par rapport à la référence. L'analyse des résultats montre que la conductivité thermique a un impact sur toute l'épaisseur de la paroi, ce qui n'est pas le cas pour les propriétés hydriques qui n'ont un effet que sur le matériau isolant. Soulignons également que la variation de la chaleur spécifique n'a pas d'influence sur les champs

d'humidité relative au niveau de la paroi. Dans la Figure II.17, les résultats présentent une analyse qualitative de l'étude de sensibilité réalisée. Pour mieux illustrer l'impact de la variation des propriétés de l'isolant sur le comportement hygrothermique global de la paroi, les écarts relatifs moyens par rapport au cas de référence pour les champs de sortie (pression de vapeur d'eau, température et humidité relative) sont présentés dans les Figure II.18, Figure II.19 et Figure II.20.



**Figure II.18 :** Ecarts relatifs moyens des champs de pression de vapeur d'eau



**Figure II.19 :** Ecarts relatifs moyens des champs de température

L'analyse des résultats montre que les champs de pression de vapeur d'eau (Figure II.18) sont sensibles à la variation des propriétés hydrique (perméabilité à l'humidité et la capacité de stockage d'humidité). La variation de la pression de vapeur d'eau est plus nettement observée au niveau de l'isolant, puis elle devient moins importante au fur et à mesure que l'on progresse vers l'intérieur de la paroi. Cela peut être expliqué par la cinétique lente du transfert d'humidité qui n'engendre pas un changement significatif de l'état hydrique sur toute la paroi même après que nous ayons atteint le régime permanent. La conductivité a un effet

relativement faible sur la variation de la pression de vapeur d'eau, particulièrement au niveau de l'interface polystyrène/parpaing, avec un écart relative moyen de 0.2%.

Pour le transfert thermique, la Figure II.19 montre bien que la conductivité thermique à une grande influence sur les profils de température. Il est au maximum au niveau de l'isolant un écart relatif moyen de 2.2% et il diminue linéairement en allant vers l'intérieur de la paroi où l'écart relatif est de 0.7% (surface intérieure). Les autres propriétés hygrothermiques étudiées n'ont pas d'un impact significatif sur le transfert thermique.

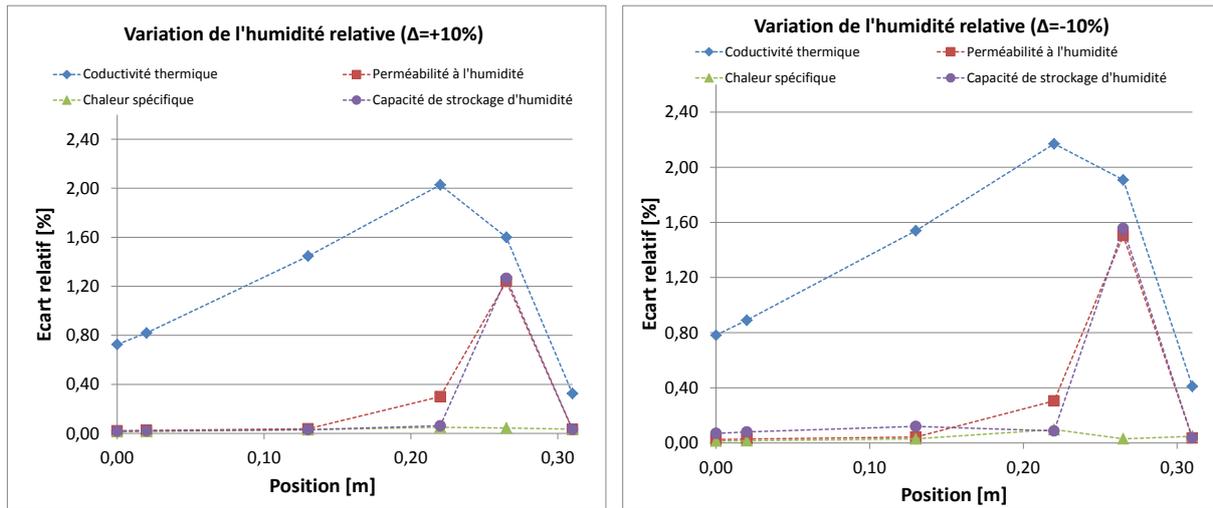


Figure II.20 : Ecarts relatifs moyens des champs de l'humidité relative

Concernant l'humidité relative qui est une variable dépendante à la fois de la pression de vapeur d'eau et de température, la Figure II.20 illustre bien le degré d'influence de chaque propriété hydrique et thermique sur cette grandeur. La conductivité thermique est le paramètre le plus influent avec un écart relatif maximal de 2.1% au niveau de l'interface polystyrène/parpaing. Les propriétés hydrique (perméabilité à l'humidité et la capacité de stockage d'humidité) ont un impact local, juste au niveau de l'isolant, avec un écart relatif plus ou moins identique de 1.6% ( $\Delta=-10\%$ ) et de 1.2% ( $\Delta=+10\%$ ). La variation de la chaleur spécifique n'a pas un impact important sur le transfert hygrothermique.

Il est à noter que les résultats obtenus sur ce cas d'étude retenu, ne peuvent être généralisés. Néanmoins cette analyse de sensibilité permet de donner une idée concernant les paramètres les plus influents sur les transferts hygrothermiques dans les enveloppes de bâtiments. Dans ce sens l'analyse de sensibilité réalisée consolide les résultats obtenue dans l'étude de Ferroukhi et al. (Ferroukhi et al., 2014) avec une autre configuration de paroi multicouche sous des conditions aux limites différentes.

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches a été développé. Ce modèle est fondé sur des moteurs de transferts qui assurent la continuité au niveau des interfaces entre les couches d'une paroi. Les moteurs de transferts choisis sont des variables d'état (pression de vapeur d'eau, pression totale et température) qui ne sont pas tributaires du support solide du matériau ou de la morphologie de son espace poreux.

Le modèle de transfert hygrothermique a été implémenté dans un outil de modélisation multiphasique : COMSOL Multiphysics. La résolution numérique proposée par ce dernier a été confrontée à une solution analytique issue de la littérature et concernant le cas du séchage de bois. Les résultats ont donné une bonne concordance entre les deux solutions analytiques issues de la littérature et numérique proposée par l'outil de simulation.

Un banc expérimental a été mis en place au laboratoire dans le but d'étudier le comportement hygrothermique de plusieurs configurations multicouches de matériaux de construction poreux. L'évolution des transferts thermique et hydrique au niveau des échantillons a été suivie tout au long de l'expérience, et le contrôle rigoureux des conditions aux limites imposées également vérifié.

Une comparaison des profils de température et de pression de vapeur d'eau issus de la simulation numérique avec ceux obtenus expérimentalement pour les quatre configurations testées a été entreprise. Les résultats ont montré une bonne concordance entre les grandeurs mesurées et celles prédites. Ces bons résultats illustrent les avantages du modèle de transfert hygrothermique proposé, avec des données d'entrées accessibles et évaluables expérimentalement grâce à des essais normalisés.

Finalement, une étude de sensibilités, sur une paroi multicouche, des paramètres d'entrée du modèle de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité sur la prédiction des profils de température, de pression de vapeur et d'humidité relative a été réalisée. Les données d'entrée étudiées sont les propriétés hygrothermiques des matériaux, notamment la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la perméabilité à la vapeur d'eau et la capacité de stockage d'humidité. Cette étude a permis de conclure que ces paramètres ont une grande incidence sur le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiment. Par conséquent, une bonne maîtrise des techniques de caractérisation expérimentale des propriétés hygrothermiques des matériaux de construction s'avère nécessaire pour assurer une bonne prédiction des transferts hygrothermiques dans les enveloppes de bâtiments. Pour cela, une étude de caractérisation expérimentale complète des propriétés hygrothermiques des matériaux de construction fera l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre III.

## Caractérisation expérimentale des matériaux de construction : Propriétés physiques et hygrothermiques

### III.1 Introduction

Nous avons présenté dans le précédent chapitre le modèle de transfert hygrothermique que nous avons développé. Nous avons montré la pertinence de ce modèle à travers sa prise en compte des différents mécanismes physiques. Nous avons mis l'accent sur la formulation des équations régissant ce modèle qui fait intervenir des paramètres d'entrée qui sont déterminés expérimentalement. Il est important de mentionner, en vertu du caractère lent des transferts, l'existence de peu de travaux, dans le domaine du génie civil, sur la caractérisation expérimentale des transferts d'humidité et donc l'indisponibilité de bases de données fiables sur le comportement intrinsèque des matériaux de construction vis-à-vis des transferts hydriques. Pour pallier à ce manque, il nous a paru important de développer des méthodes théoriques et expérimentales permettant de remonter à ces grandeurs caractéristiques des matériaux.

Lors de cette phase, essentiellement expérimentale, nous présenterons la démarche que nous avons mise en place au laboratoire afin de collecter des informations nécessaires quant à la modélisation des transferts hygrothermiques dans les parois du bâtiment. Il sera présenté les plateformes utilisées pour la détermination expérimentale de ces paramètres d'entrée du modèle. Ces essais en laboratoire ont été effectués pour des conditions variées de transfert : isotherme – non-isotherme et pour différents matériaux de construction choisis par rapport à

leurs propriétés microstructurale. Dans ce chapitre, l'accent sera mis sur la campagne de caractérisation expérimentale des propriétés physiques et hygrothermiques qui a permis d'évaluer par des mesures au laboratoire leurs évolutions en fonction de l'état thermique et hydrique des matériaux de construction. Ces valeurs des propriétés ont été déterminées via des essais normalisés.

Parmi les multiples grandeurs mesurées, on y trouve la porosité, la conductivité thermique, la chaleur massique, ou encore l'isotherme d'adsorption et de désorption ainsi que la perméabilité à la vapeur d'eau pour ce qui relève des transferts hydriques. Aussi, une bonne prédiction des transferts hygrothermiques dans les matériaux de construction est fortement liée à une évaluation précise des propriétés thermique et hydrique et leurs évolutions en fonction de, la température et la teneur en eau des matériaux. En effet, une petite variation des paramètres d'entrée peut affecter la qualité de la prédiction du comportement hygrothermique dans les enveloppes de bâtiment, qui a un impact direct sur l'évaluation des risques causés par l'humidité.

## III.2 Matériaux étudiés

Les matériaux de construction diffèrent sur plusieurs aspects, notamment les caractéristiques géométriques, mécaniques, hygrothermiques et microstructurales. Dans ce chapitre, la campagne expérimentale de caractérisation des propriétés physiques et hygrothermiques a été réalisée sur quatre matériaux bien distincts (voir Figure III.1 ci-dessous) : la brique, le plâtre, le bois aggloméré et enfin le parpaing.



**Figure III.1** : Matériaux étudiés

Les matériaux étudiés, représentent des matériaux très utilisés dans les bâtiments anciens (principalement entre la période 1945-1975), et font l'objet de la problématique abordée dans le projet HUMIBATex (ANR 2013), support financier du présent travail doctoral. D'un autre côté, les matériaux choisis ont des caractéristiques thermophysiques et hydriques différentes, ce qui permet à travers cette étude, de cerner les caractéristiques les plus influentes sur le comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiments.

### III.3 Propriétés physiques

#### III.3.1 Porosité par intrusion de mercure

La porosimétrie par intrusion (injection) de mercure est un moyen d'investigation de la structure méso-poreuse et macroporeuse des matériaux. Cette technique s'applique aux matériaux dont les pores accessibles, ou les espaces inter-granulaires sont compris dans un domaine qui peut s'étendre de 1.5 nm à 63 $\mu$ m.

La porosimétrie à mercure fournit des informations quantitatives sur la structure poreuse des matériaux (AFGC, 2007) notamment:

- la porosité accessible au mercure (en %), il s'agit du rapport entre le volume des vides mesuré et le volume total apparent du matériau (la somme des volumes des solides et vides).
- Le volume envahi par le mercure en fonction de la pression de mesure ou du rayon des pores accessibles.
- La distribution des volumes poreux en fonction des dimensions des pores (distribution porale).
- Le rayon moyen des pores sur l'ensemble de la distribution (en nm), et le rayon critique déterminé à partir de la courbe d'intrusion de mercure.

#### III.3.2 Principe de l'essai

Dans le cadre de ce travail, c'est le porosimètre à mercure Micrometrics-Autopore III 9420 qui a été utilisé (Figure III.2). Ce dispositif a été choisi car il permet de couvrir une large gamme de pore allant de 0.003 $\mu$ m à 360 $\mu$ m de diamètre.



**Figure III.2:** Porosimètre à mercure Micrometrics-Autopore III 9420

Le principe de l'essai consiste à introduire progressivement, du mercure sous pression, dans la structure poreuse de l'échantillon de matériau (initialement sec), jusqu'à atteindre l'équilibre. Afin de balayer tous les gammes de pore dans le matériau, plusieurs paliers de pression sont imposés. Ainsi, pour chaque palier de pression, le volume de mercure injecté est mesuré. Le principe de l'essai et le protocole sont largement détaillés dans les travaux de (Daïan, 2013).

A partir de ces informations (pression et volume de mercure injecté) et en se basant sur le caractère non mouillant du mercure, le rayon et la classe de pore correspondants à ce palier de pression peuvent être déterminés. Le calcul du rayon des pores (supposés cylindriques) est basé sur l'équation de Washburn comme suit :

$$r_p = - \frac{2\sigma_{Hg} \cos\theta}{P_{Hg}} \quad \text{(III.1)}$$

Où :

$r_p$  [m] est le diamètre du pore,

$P_{Hg}$  [Pa] la pression exercée sur le mercure,

$\sigma_{Hg}$  [N/m] la tension superficielle de mercure ( $\sigma_{Hg} = 0.480 \text{ N.m}^{-10}$  est la valeur couramment utilisée), enfin,

$\theta$  l'angle de contact entre la surface solide et le mercure ( $\theta = 130^\circ$  souvent recommandé pour des températures entre 20 à 25°C).

### III.3.3 Résultats et analyse

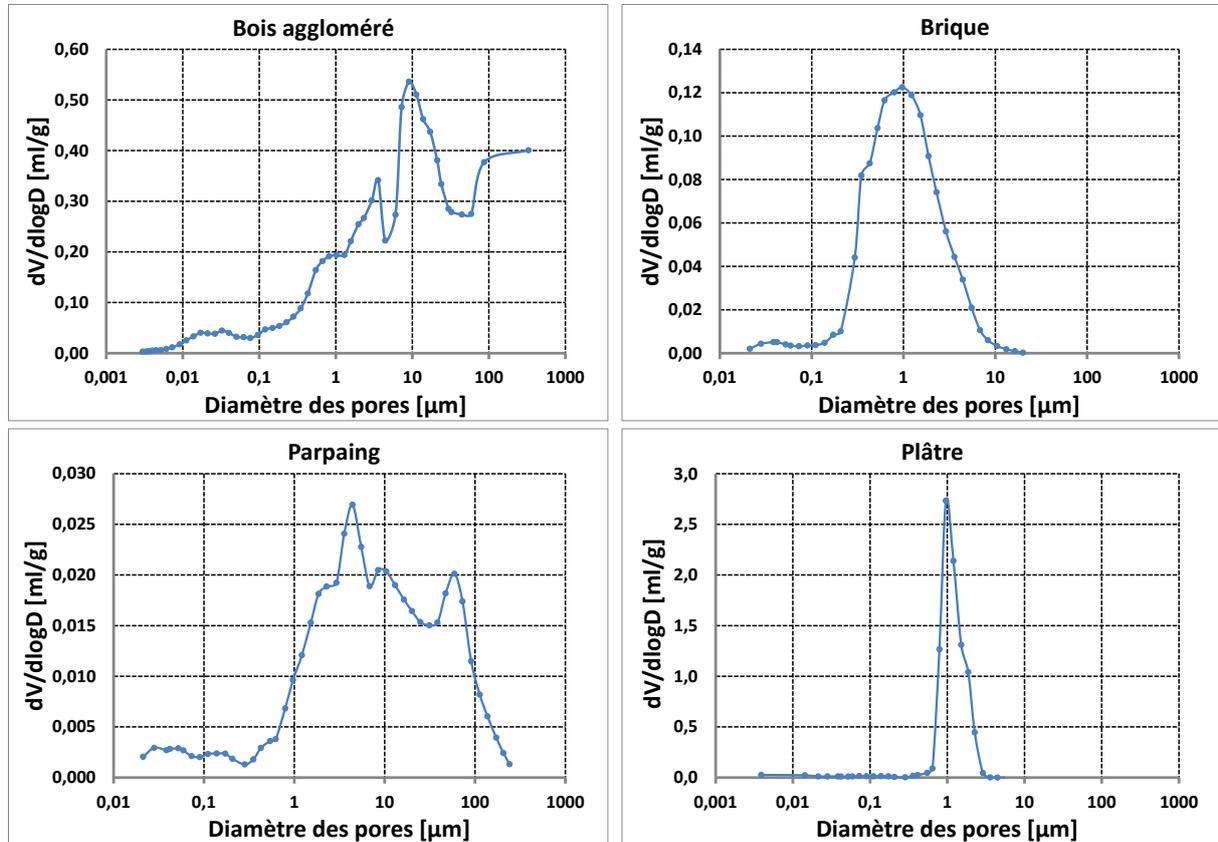
Des essais de porosité par intrusion de mercure ont été réalisés sur les quatre matériaux de construction cités précédemment (bois aggloméré, brique, parpaing et plâtre). La distribution cumulée des diamètres des pores sont représentées dans la Figure III.3 ci-après.

Les courbes de la distribution de la taille des pores montrent que pour les matériaux relativement homogènes comme la brique et le plâtre, la distribution porale est monomodale. Pour le plâtre, la taille des pores est comprise entre 0.7  $\mu\text{m}$  et 3  $\mu\text{m}$  avec un diamètre critique de 0.95  $\mu\text{m}$ . Pour la brique, la plage de taille des pores est plus large que celle du plâtre, elle est entre 0.3  $\mu\text{m}$  et 6.8  $\mu\text{m}$  avec un diamètre critique est de 0.90  $\mu\text{m}$ .

Concernant le bois aggloméré et le parpaing, qui représentent des matériaux hétérogènes composites, la distribution porale est bimodale. Dans ce genre de matériaux, deux types de porosités peuvent se manifester. La première correspond aux espaces entre particules et la deuxième est la porosité entre les grains composant le matériau.

Bien que la détermination de la porosité par intrusion de mercure est largement utilisée, l'application de cette technique à de nombreuses limitations notamment la sous-estimation du volume des classes de pores les plus fines (effet bouteille d'ancre) (Daïan, 1986). Cependant,

malgré ses imperfections, cette méthode reste l'une des seules à pouvoir analyser des diamètres d'entrée de pores de quelques nanomètres à quelques centaines de micromètres. De plus, cette technique d'intrusion permet d'apporter des informations sur la connectivité du réseau poreux, donc sur les phénomènes de transport notamment le transfert hydrique.



**Figure III.3 :** Distribution de la taille des pores obtenue par intrusion au mercure pour le bois aggloméré, la brique, le parpaing et le plâtre

## III.4 Propriétés du transfert hydrique

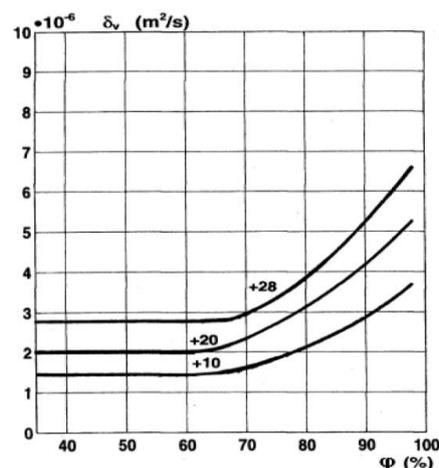
### III.4.1 Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau représente une propriété incontournable dans la caractérisation hydrique des matériaux de construction. Elle fournit des informations sur la diffusion de la vapeur d'eau dans un matériau. Cette grandeur est appelée coefficient de diffusion d'humidité lorsque le moteur de transfert hydrique utilisé est la teneur en eau au lieu de la pression de vapeur d'eau.

Dans les modèles de prédiction des transferts hygrothermique, la perméabilité à la vapeur d'eau est un paramètre d'entrée très important. Pour cela, plusieurs travaux dans la littérature se sont intéressés à l'évaluation de cette propriété pour différents matériaux de construction.

Parmi ces travaux, nous trouvons l'étude de (Belarbi et al., 2006) qui ont développé une méthode d'évaluation du coefficient de diffusion d'humidité ainsi que l'isotherme d'adsorption à l'intérieur des matériaux de construction. Basée sur des mesures gravimétriques et sur l'écriture des équations de bilan massique ; le coefficient de diffusion d'humidité est évalué. Dans une autre étude, (Raji et al., 2009) ont confirmé que pour le bois, la perméabilité à la vapeur d'eau dépend fortement de la teneur en eau du matériau. En outre, (Issaadi et al., 2014) ont étudié l'évolution de la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux cimentaires en fonction de leur âge, les résultats ont montré que cette grandeur diminue avec l'âge pour ce type de matériaux. Dans le même sens, (Talukdar et al., 2007) ont conclu que l'influence de l'humidité relative est peu observée pour les matériaux non-hygroscopiques.

En plus de l'humidité relative, la température est un autre facteur influent sur la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux de construction. Dans ce sens, plusieurs travaux ont été réalisés dans la littérature. (Galbraith et al., 2000) montrent que la température a un impact significatif sur la perméabilité à la vapeur d'eau pour le contre-plaqué en bois, particulièrement pour les grandes valeurs d'humidité relative. Une autre étude menée par (Hedenblad, 1996) sur le béton cellulaire confirme la dépendance de la perméabilité à la vapeur d'eau par rapport à la température (Figure III.4).



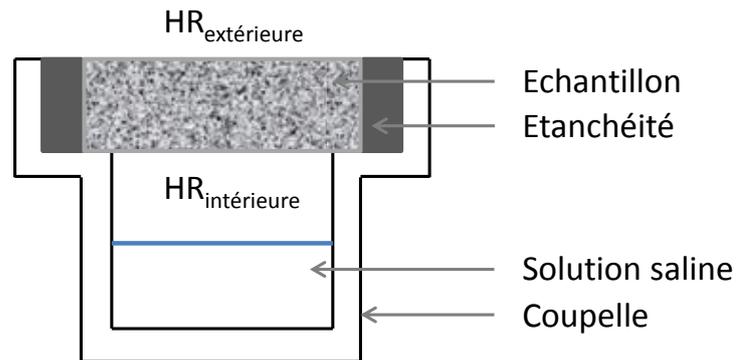
**Figure III.4:** Illustration de l'impact de la température sur l'évolution de la perméabilité à la vapeur d'eau pour un béton cellulaire (Hedenblad, 1996)

Dans la partie qui suit, nous avons réalisé une investigation de l'influence de la température sur la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux choisis.

#### III.4.1.1 Mode opératoire

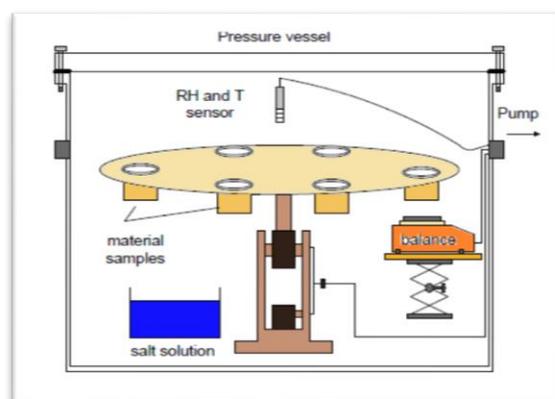
La caractérisation de la diffusion de la vapeur d'eau dans les matériaux de construction est généralement évaluée expérimentalement suivant les normes NF EN 12086 et Pr EN ISO 12572 (ASTM, 2005) par le biais de la méthode de la coupelle. Le principe de la méthode consiste à imposer, à une température constante, un gradient fixe de pression de vapeur d'eau

entre deux faces d'un échantillon. Afin d'assurer une bonne analyse des résultats obtenus, le caractère unidimensionnel du phénomène physique est privilégié par le choix d'éprouvettes cylindriques et axisymétriques. L'éprouvette est disposée dans une coupelle, l'étanchéité, entre les parois de la coupelle et le matériau, est assuré avec un gel de silicone (voir Figure III.5). L'ambiance intérieure de la coupelle est régulée avec une solution saline. L'ensemble est disposé dans une enceinte climatique contrôlée en termes de température et d'humidité. Par la suite un suivi de masse est réalisé jusqu'à atteindre l'état d'équilibre caractérisé par la constance de la masse.



**Figure III.5 :** Schéma descriptif de la coupelle

Dans le présent travail, le dispositif GINTRONIC GraviTest (Figure III.6) est utilisé pour la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau en se basant sur le principe de la coupelle. L'avantage de cet appareil est l'automatisation de l'essai notamment pour le suivi de la masse. Le dispositif, avec une capacité de six coupelles, permet de tester plusieurs échantillons à la fois. Afin de vérifier la précision de la balance durant l'essai, il est préférable de limiter le nombre d'échantillons à cinq et garder une coupelle témoin. L'ensemble des coupelles est disposé dans une chambre climatique régulée en température et en hygrométrie moyennant un générateur d'humidité. La taille des échantillons cylindriques testés est de 8 cm de diamètre avec une épaisseur qui varie entre 1 et 3 cm.



**Figure III.6 :** Dispositif GINTRONIC-GraviTest et son principe de fonctionnement

Le suivi de la masse des échantillons est assuré automatiquement jusqu'à la vérification du critère de stabilité imposé. Ce critère correspond au taux de variation massique de l'échantillon sur un ensemble de mesures successives, il est exprimé par la relation suivante :

$$\Delta m = \frac{m_{i+1} - m_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (\text{III.2})$$

Avec  $\Delta m$  [kg/s] représentant le taux de variation massique et  $m_{i+1}, m_i$  [kg] étant respectivement les masses mesurées à deux temps successives  $t_{i+1}, t_i$  [s].

Théoriquement, La perméabilité à la vapeur d'eau est déduite de la loi diffusionnelle de Fick décrite dans le chapitre précédent comme suit :

$$k_v = j_v \cdot \frac{e}{\Delta P_v} \quad (\text{III.3})$$

Où,  $e$  [m] est l'épaisseur de l'échantillon et  $\Delta P_v$  [Pa] le gradient de la pression de vapeur d'eau imposé.

La densité de flux de vapeur d'eau est déterminée par l'équation (III.4):

$$j_v = \frac{G}{A} \quad (\text{III.4})$$

Avec  $A$  [m<sup>2</sup>] représentant la surface de l'échantillon,  $G$  [kg/s] est le débit de vapeur d'eau qui est déterminé grâce à la droite donnant l'évolution de la masse au cours du temps pendant la phase transitoire.

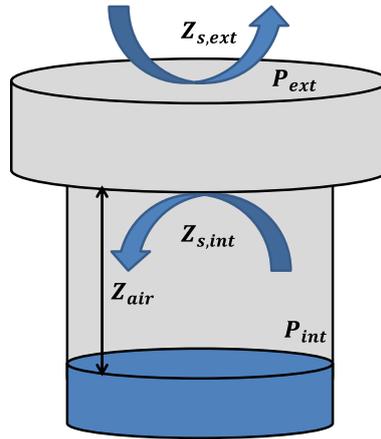
Dans la pratique, la perméabilité à la vapeur d'eau donnée par le dispositif GINTRONIC GraviTest ne correspond pas à celle déterminée par l'équation (III.3). En effet, l'équation (III.3) est valable que dans le cas où un mélange parfait de l'air humide est considéré sur les deux faces de l'échantillon. Cependant, il est difficile d'atteindre expérimentalement ce type de conditions aux limites. De ce fait, une correction de la perméabilité à la vapeur d'eau est réalisée en aval par l'appareil de mesure. Cette correction est effectuée afin de prendre en considération les résistances hydriques des couches limites inférieure et supérieure de l'échantillon ainsi que la couche d'air à l'intérieure de la coupelle séparant la solution saline et le matériau. La Figure III.7 résume les résistances présent en compte dans la correction de la perméabilité à la vapeur d'eau.

Finalement, la perméabilité à la vapeur d'eau corrigée est calculée selon l'équation (III.5) suivante :

$$k_{v,corr} = \frac{e}{\frac{\Delta P_v}{j_v} - (Z_{air} + Z_{s,int} + Z_{s,ext})} \quad (\text{III.5})$$

Où:

$k_{v,corr}$  [ $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$ ] est la perméabilité à la vapeur d'eau réelle,  $Z_{air} = d/\delta_a$  [ $s/m$ ] la résistance à la vapeur d'eau dans la couche d'air séparant la solution saline et le matériau, avec  $d$  [ $m$ ] l'épaisseur de la couche d'air et  $\delta_a$  [ $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$ ] la perméabilité de la vapeur d'eau dans l'air.  $Z_{s,int/ext} = 1/h_{m,int/ext}$  [ $s/m$ ] représente la résistance à la diffusion surfacique de la vapeur d'eau avec  $h_m$  [ $kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$ ] le coefficient de transfert massique par convection.



**Figure III.7** : Représentation des résistances à la vapeur d'eau introduites dans la méthode de la coupelle

#### III.4.1.2 Perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux testés

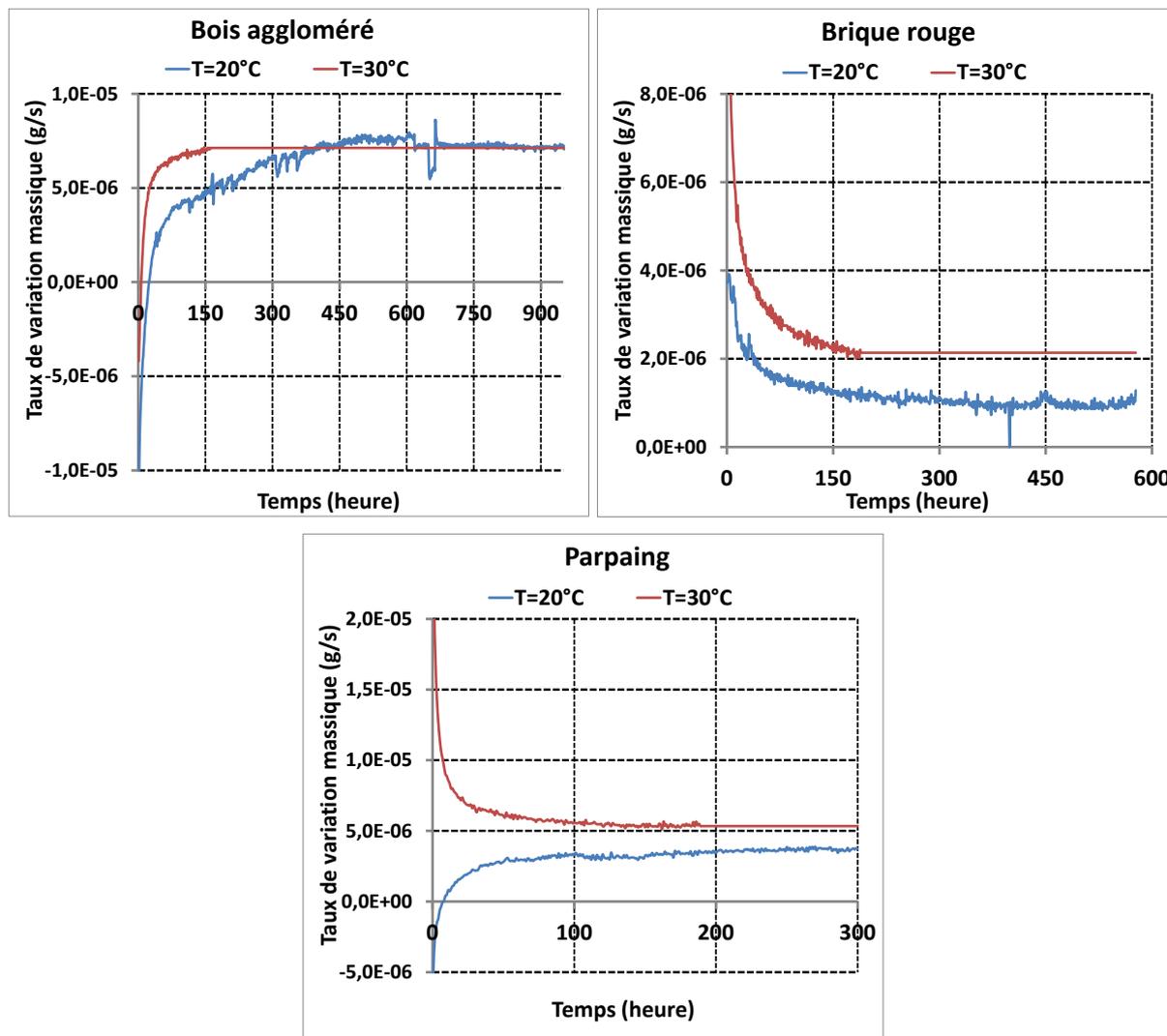
Dans le contexte de ce travail qui s'intéresse à l'évaluation des désordres causés par l'humidité, cette partie se focalise sur l'évaluation de la perméabilité à la vapeur d'eau dite humide (wet cup). Pour cela des conditions de série C (50%-95%), selon les normes NF EN 12086 et Pr EN ISO 12572, sont imposées entre les deux surfaces de l'échantillon. Ce type de conditions aux limites consiste à réguler la chambre climatique à une humidité relative de 50% et l'intérieur de la coupelle à 95%. La solution saline saturée utilisée est une solution de nitrate de potassium ( $KNO_3$ ).

Pour étudier l'impact de la température sur la perméabilité à la vapeur d'eau, les essais sont réalisés pour deux températures différentes : 20°C et 30°C.

Avant de commencer l'essai, les matériaux testés sont pré-conditionnés dans une enceinte climatique à une température de 23°C et une humidité relative de 50%. Par la suite, durant l'essai, les échantillons sont régulièrement pesés jusqu'à atteindre le critère de stabilité qui est fixé à  $\pm 5\%$  de variation massique pour cinq mesures successives. Le suivi du flux massique des échantillons testés est représenté dans la Figure III.8.

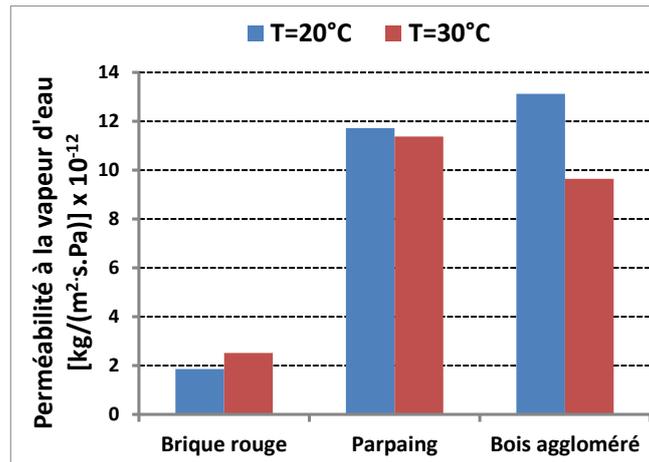
Le temps de l'essai est différent d'un matériau à un autre. En effet, à une température de 20°C, le critère de stabilité est atteint après 300 heures pour le parpaing, 600 heures pour la brique et environ 900 heures pour le bois aggloméré. Quand les essais sont réalisés à une température de 30°C, le temps de l'essai est relativement moins important. Cela est constaté

pour tous les matériaux testés. Ce comportement peut être expliqué par l'état initial des matériaux avant le pré conditionnement ainsi que par la nature du matériau et sa capacité de stockage d'humidité.



**Figure III.8 :** Evolution de la masse des échantillons testés au cours du temps

Afin d'assurer une répétabilité des résultats, trois échantillons de chaque matériau ont été testés. Les perméabilités à la vapeur d'eau moyennes pour les matériaux étudiés sont résumées dans la Figure III.9.



**FigureIII.9** : Evaluation de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de la température pour la brique, le parpaing et le bois aggloméré

L'analyse des résultats montre que l'influence de la température varie d'un matériau à un autre. Pour la brique, la perméabilité à la vapeur d'eau augmente avec la hausse de température, l'écart relatif entre la perméabilité à la vapeur d'eau à 20°C et celle obtenue à 30°C est de 35% ce qui n'est pas négligeable. Pour le parpaing et le bois aggloméré, le comportement inverse est constaté, car la perméabilité à la vapeur d'eau diminue avec la hausse de la température. Pour le bois aggloméré, la baisse de la perméabilité à la vapeur d'eau pour une température de 30°C est de l'ordre de 30% par rapport à celle de 20°C. Concernant le parpaing, l'impact de la température sur la perméabilité à la vapeur d'eau est moins flagrant avec une différence de seulement 5%.

Cette différence de comportement selon les matériaux testés, par rapport à la sensibilité de la perméabilité à la vapeur d'eau vis-à-vis de la variation de la température, est fortement liée à la nature de ces derniers et leur composition micro structurale. En effet, la perméabilité à la vapeur d'eau mesurée par la méthode de la coupelle inclut à la fois la diffusion moléculaire de la vapeur d'eau et le processus effusif qui se déclenche essentiellement dans les pores microscopiques (Roels, 2002). Par conséquent, pour les taux d'humidités relatives importants, l'effet de la température est attribué à l'augmentation du transfert liquide, particulièrement pour les matériaux peu hygroscopiques comme la brique. Pour le bois aggloméré, la cinétique du transfert hydrique est relativement lente à 30°C par rapport à 20°C (FigureIII.9), cela est probablement dû au comportement hydrique du matériau qui a une forte adsorption notamment pour les humidités relatives élevées.

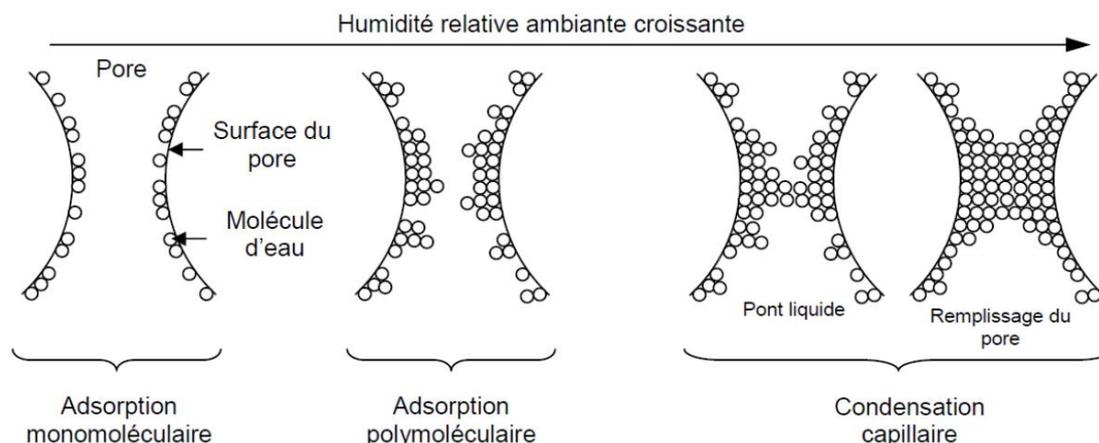
#### III.4.2 Isotherme d'adsorption et de désorption d'eau

Le contact d'un matériau poreux avec l'air ambiant engendre un échange d'humidité entre les deux milieux. En effet, une hausse de l'humidité relative de l'air à la surface du matériau provoque une augmentation de la masse apparente de celui-ci. Cette prise de masse est due au

phénomène d'adsorption physique. Réciproquement, une baisse de l'humidité relative de l'air environnant entraîne une perte de masse apparente, due au phénomène de désorption.

Ces deux phénomènes d'adsorption et de désorption d'eau sont représentés par les courbes associées qui traduisent l'évolution de la teneur en eau d'un matériau en fonction de la valeur de l'humidité relative de l'air en équilibre à une température constante.

Généralement, selon le mode de fixation de l'eau à l'échelle microstructurales, les isothermes d'adsorption et de désorption d'eau présentent trois zones distinctes (Figure III.10) :



**Figure III.10 :** Représentation schématique de l'adsorption physique d'eau dans un pore (Collet, 2004)

- **Zone 1 :** Adsorption mono-moléculaire

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

- **Zone 2 :** Adsorption poly-moléculaire

Cette zone commence quand toute la surface du pore est saturée, les molécules d'eau sont adsorbées sur la monocouche moléculaire d'eau initiale. L'isotherme est généralement linéaire dans cette zone.

- **Zone 3 :** Condensation capillaire

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

### III.4.2.1 Métrologie

Face à la lenteur de la méthode gravimétrique traditionnelle basée sur les solutions salines saturées selon la norme ISO-12571 2000, plusieurs dispositifs expérimentaux d'évaluation des isothermes d'adsorption/désorption ont été développés ces dernières années afin d'automatiser l'essai de base et optimiser la durée de l'expérience.

Le mode de fonctionnement de ces dispositifs expérimentaux est basé sur deux méthodes principales :

Une méthode gravimétrique basée sur le suivi de la masse apparente d'un matériau en fonction de l'humidité relative de l'ambiance. L'échantillon est conditionné dans un environnement fermé à une température et une humidité relative constantes. Pour chaque humidité relative, l'échantillon est pesé à un intervalle régulier de temps jusqu'à ce qu'un état d'équilibre soit atteint. Pour tracer la totalité de la courbe d'isotherme, le procédé décrit précédemment est répété pour différentes humidités relatives.

La deuxième méthode est une méthode volumétrique qui consiste à mesurer le volume de vapeur d'eau adsorbé ou désorbé par un matériau. L'échantillon est placé dans un volume contrôlé, une quantité de vapeur d'eau est injectée jusqu'à atteindre la pression voulue. Par la suite, quand l'état d'équilibre est atteint, le volume de vapeur d'eau adsorbée par le matériau est déterminé.

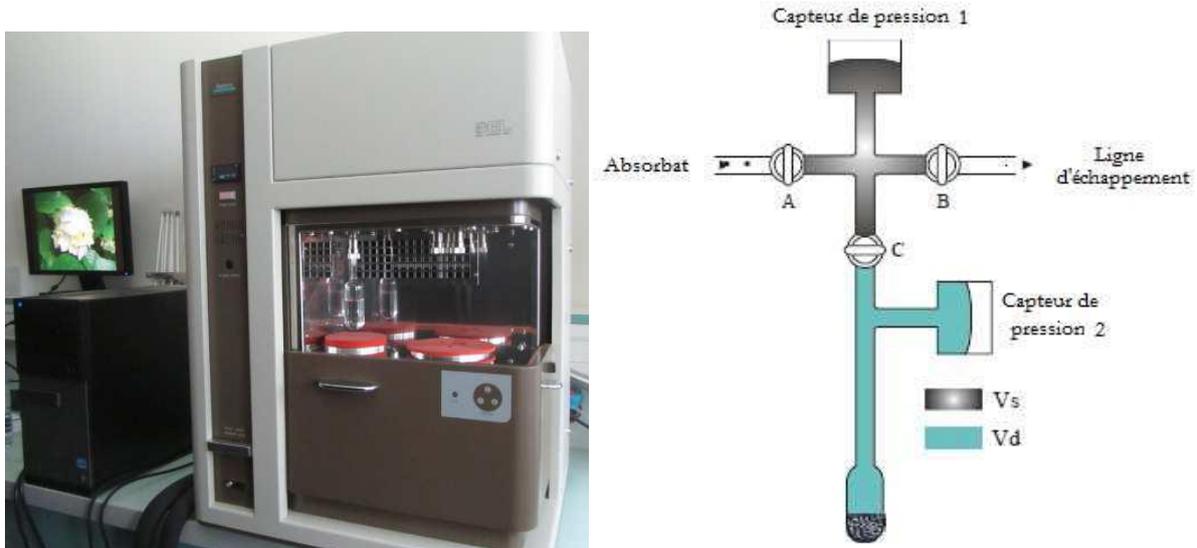
Dans cette partie, les deux méthodes décrites précédemment sont réalisées en utilisant deux dispositifs expérimentaux différents : le BELSORP-aqua 3 pour la méthode volumétrique et le VSA (Vapor Sorption Analyzer) pour la méthode gravimétrique.

#### III.4.2.1.1 Méthode volumétrique : BELSORP-aqua3

Le BELSORP-aqua 3 est un dispositif de mesure automatique de la variation du volume de la vapeur adsorbée ou libérée par un matériau moyennant l'utilisation du nombre de moles du gaz.

Après la mise en place de l'échantillon dans la cellule, celui-ci est séché à 40°C pendant 24 h, puis l'ensemble du dispositif est conditionné à la température voulue pour l'essai. Par la suite, le volume initial de la cellule est mesuré en procédant à une injection d'Hélium. Après la détente du gaz dans la cellule, ce dernier adsorbe progressivement une partie du gaz injecté. Quand le régime permanent est atteint, la pression au niveau de la cellule est mesurée, puis la quantité du gaz non adsorbé est déterminée à partir de la loi des gaz parfait. Au final, la connaissance des températures, pressions et volumes permet de déduire la masse d'eau adsorbée par l'échantillon et de remonter ainsi à la variation de sa teneur en eau. Dans le cas de la désorption, le même processus est appliqué en commençant l'essai avec un échantillon saturé. Pour une courbe d'isotherme d'adsorption/désorption complète, différentes pressions de vapeur qui correspondent à différentes humidités relatives sont balayées.

Il est important de noter que, l'utilisation du dispositif BELSORP-aqua3 (Figure III.11), permet de réduire nettement la durée totale de l'essai (une à deux semaines en moyenne) par rapport à la méthode gravimétrique classique utilisant les solutions salines saturées qui rappelant le dure en moyenne 2 années pour un matériau type béton de 5 mm d'épaisseur (Trabelsi, 2010) et (Abahri, 2012). En revanche, la taille des échantillons présente un désavantage. En effet, la quantité de l'échantillon testé est de l'ordre du mg ce qui n'est pas toujours représentatif, particulièrement pour les matériaux hétérogènes comme le béton.

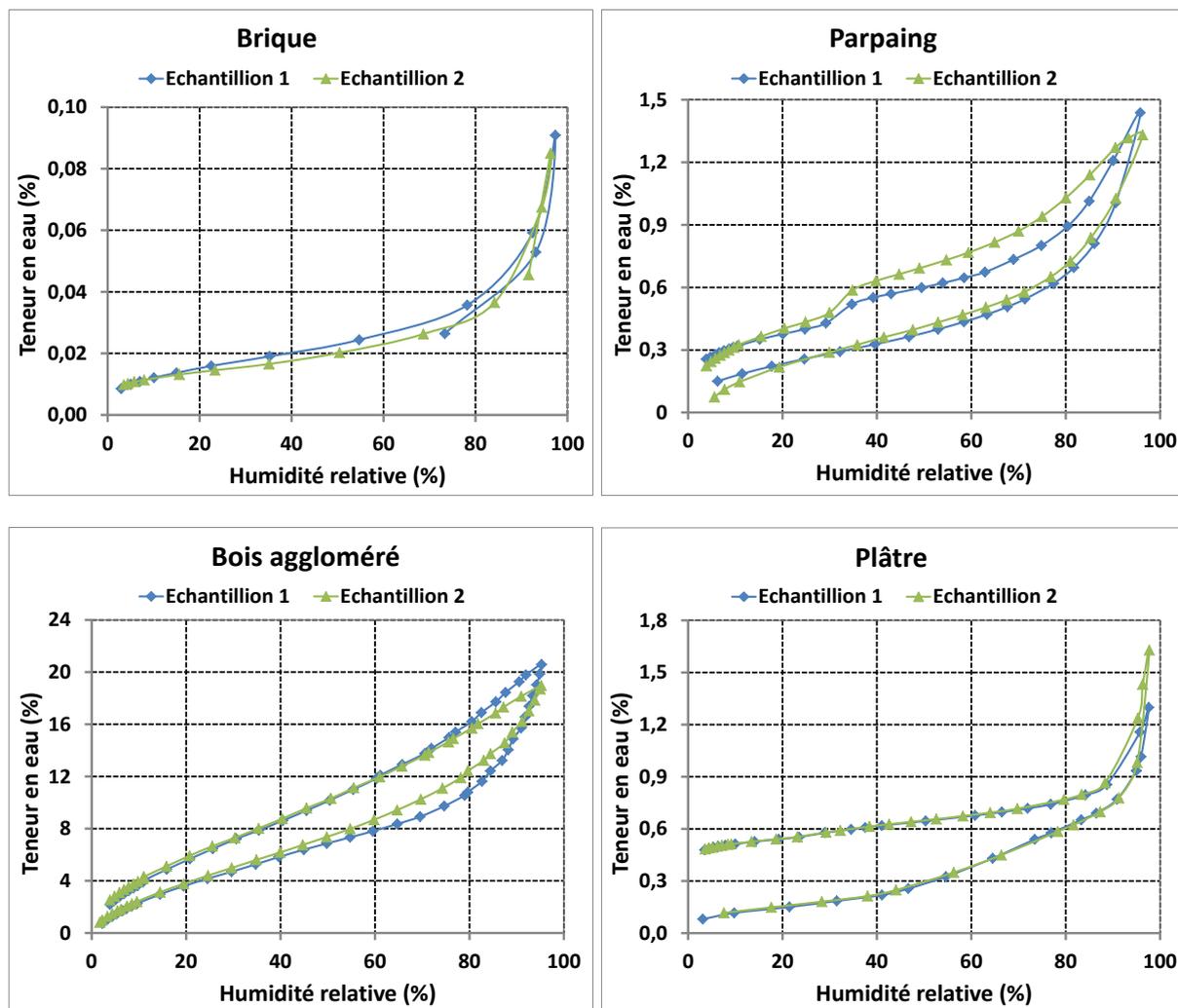


**Figure III.11** : BELSORP aqua3 (à gauche) et son principe de fonctionnement (à droite)

#### III.4.2.1.1.1 Analyse des résultats

Pour les matériaux étudiés (Brique, parpaing, plâtre et bois aggloméré), les essais d'isothermes d'adsorption/désorption ont été réalisés à une température constante de 20°C. Dans le but d'assurer une répétabilité des résultats, deux essais ont été réalisés pour chaque matériau testé.

La Figure III.12 représente les courbes d'isotherme d'adsorption/désorption obtenues par la méthode volumétrique pour les matériaux étudiés.



**Figure III.12 :** Courbes d'isotherme d'adsorption et de désorption pour les matériaux testés : Brique, parpaing, bois aggloméré et plâtre

Les résultats présentent une bonne répétabilité, particulièrement pour le plâtre et la brique qui sont des matériaux homogènes. Pour le parpaing et le bois aggloméré, une légère différence est remarquée entre les deux échantillons testés pour chaque matériau. Cela est expliqué par l'hétérogénéité de ces deux matériaux qui peut induire à des courbes d'isotherme d'adsorption/désorption relativement différentes.

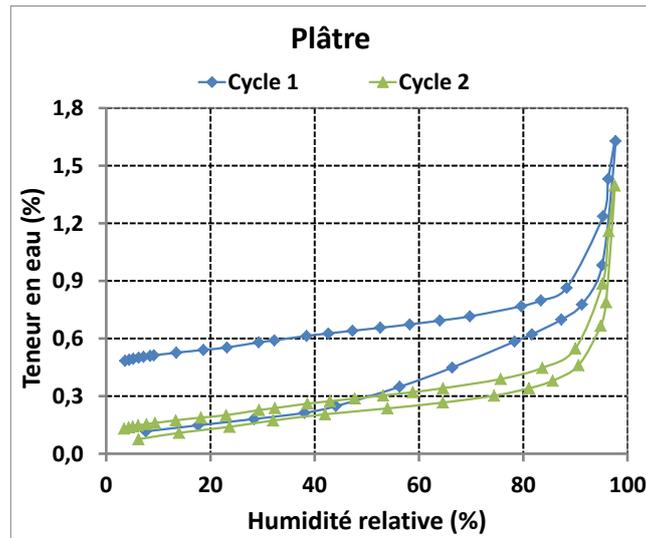
La courbe d'isotherme d'adsorption/désorption de la brique montre que ce matériau a une adsorption très faible c'est pourquoi il est qualifié de matériau hydrophobe dans la zone hygroscopique. En effet, l'adsorption est très faible pour une humidité relative entre 0% et 80%. Quand l'humidité relative dépasse les 80%, nous constatons une hausse subite de la quantité d'eau adsorbée avec une teneur en eau du matériau de 0.1% ; ce qui reste négligeable par rapport aux autres matériaux étudiés. Dans la phase de désorption, le même comportement est observé, où une grande partie de la quantité d'eau adsorbée est libérée. Cela est confirmé par l'enveloppe d'hystérésis qui est très mince.

Comme la brique, le parpaing a une très faible adsorption avec une teneur en eau maximale de 1.5% pour une humidité relative de 95%. En revanche, même pour les faibles humidités relatives, l'adsorption augmente proportionnellement avec l'humidité relative. Pour la partie de désorption, le décalage est nettement constaté par rapport à la courbe d'adsorption. L'hystérésis est plus importante comparée à celle obtenue pour la brique. Cela peut être expliqué par la nature hétérogène du parpaing et sa structure micro structurelle complexe qui provoquent un piégeage des molécules d'eau à l'intérieur du matériau.

Pour le bois aggloméré, un comportement différent est noté par rapport aux deux matériaux précédents. L'adsorption est relativement plus importante, la teneur en eau du matériau augmente proportionnellement avec l'humidité relative jusqu'à atteindre les 20% pour les hautes humidités relatives. L'enveloppe d'hystérésis est bien observée avec un décalage moyen de l'ordre de 5% entre les courbes d'adsorption et de désorption. Cela est aussi expliqué par la nature du bois aggloméré qui est fabriqué à base de fibres et particules de bois rassemblées entre elles l'aide d'un liant sous pression.

La courbe d'isotherme d'adsorption/désorption du plâtre donne un résultat relativement différent. L'adsorption maximale est du même ordre que celle du parpaing. Une faible adsorption qui atteint 0.6% de teneur en eau pour une humidité relative de 80%, est d'abord observée, puis s'ensuit une augmentation brutale atteignant 1.3% lorsque l'humidité relative atteint 95%. Durant la phase de désorption, un grand déphasage est constaté par rapport à la phase d'adsorption même dans le cas d'humidités relatives basses. L'écart peut atteindre les 0.6% de teneur en eau (l'adsorption maximale est de 1.3%). Ce comportement peut être dû à la nature chimique du plâtre qui provoque, en plus d'une adsorption physique, une adsorption chimique. En effet, la molécule qui constitue la poudre de plâtre (Sulfate de Calcium semi hydraté) réagit rapidement avec l'eau pour donner un matériau relativement dur après séchage. Cependant, une partie de la poudre de plâtre peut ne pas être en contact avec l'eau lors de la fabrication, ce qui mène à une réaction ultérieure de cette poudre avec l'eau notamment durant l'adsorption d'eau dans un environnement humide. Pour vérifier ce phénomène, un autre essai d'adsorption/désorption du plâtre a été réalisé avec deux cycles d'humidification/séchage.

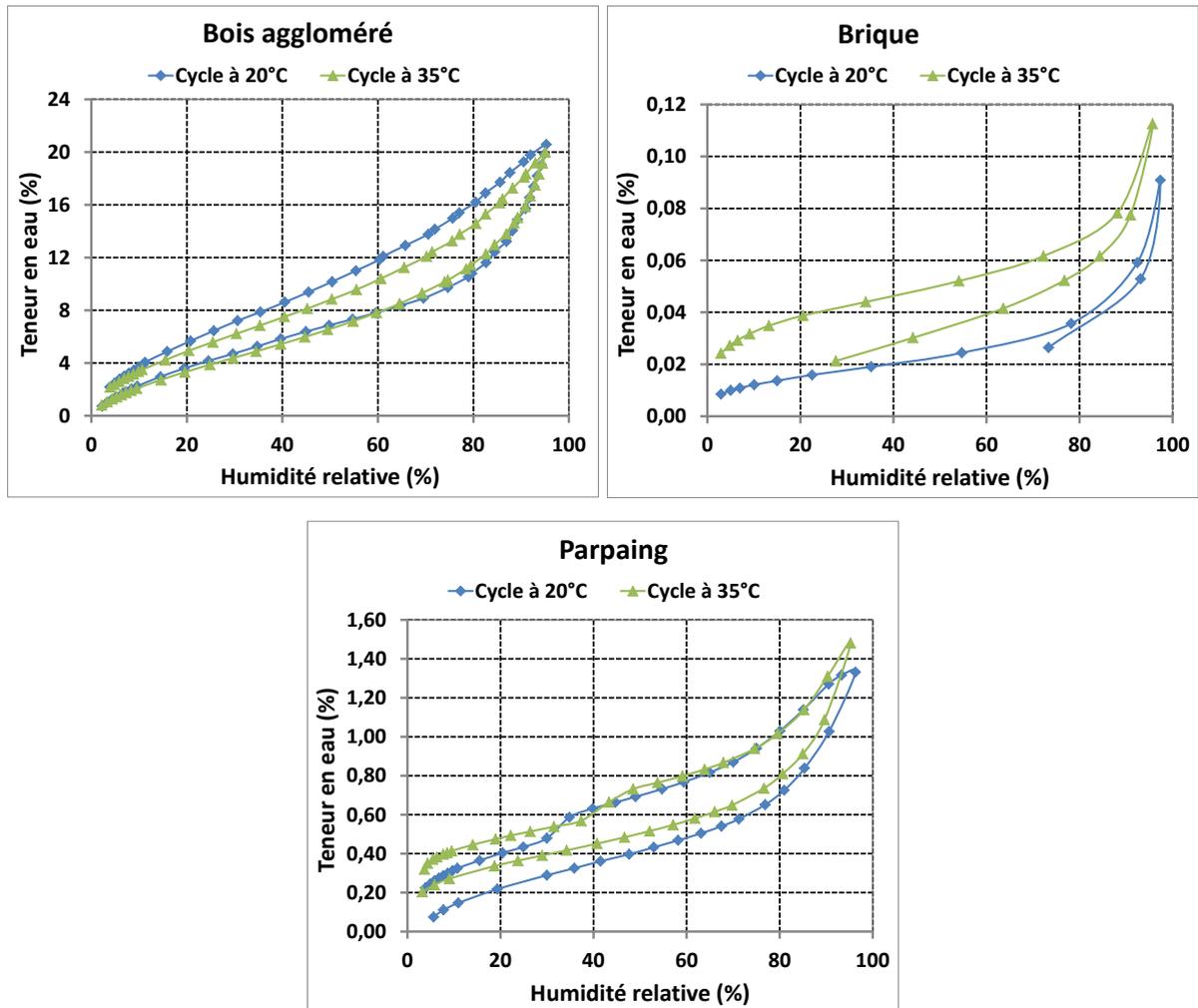
La Figure III.13 illustre la courbe d'isotherme d'adsorption/désorption du plâtre avec deux cycles. La différence entre les deux enveloppes d'hystérésis entre le premier et le deuxième cycle est nettement observée. Le déphasage entre les deux courbes d'adsorption et de désorption est de 0.3% pour le premier cycle et de 0.01% pour le deuxième cycle. Cela confirme l'explication donnée auparavant.



**Figure III.13 :** Deux cycles d'adsorption/désorption pour le plâtre

Dans la littérature, il existe peu de travaux qui traitent l'impact de la température sur l'isotherme d'adsorption/désorption des matériaux de construction. Dans le but d'étudier l'action de la température sur le comportement hydrique des matériaux étudiés, des essais d'isotherme d'adsorption/désorption ont été réalisés pour une température de 35°C afin de comparer les résultats obtenus avec ceux obtenus précédemment sous une température de 20°C. La Figure III.14 représente une comparaison des isothermes d'adsorption/désorption réalisée sous deux températures différentes (20°C et 35°C). Les essais ont été réalisés pour le bois aggloméré, la brique et le parpaing.

L'analyse des résultats montre bien que l'effet de la température sur le comportement hydrique est différent selon la nature du matériau et sa structure poreuse. En effet, pour la brique, bien que les taux d'adsorption soient très faibles, une adsorption relativement plus importante est observée pour la température de 35°C. Concernant le bois aggloméré, l'adsorption à 20°C et 35°C sont similaires. En revanche, une hystérésis plus faible est constatée pour la température de 35°C. Pour le parpaing, le comportement inverse que celui du bois aggloméré est noté, l'adsorption est légèrement plus importante pour la température de 35°C alors que la désorption sont du même ordre pour les deux températures, par conséquent une hystérésis moins importante pour la température de 35°C. Ces comportements sont contraires à ceux adoptés dans la littérature qui suppose la loi d'Arrhenius valide pour tous les matériaux.



**Figure III.14 :** Courbes d’isotherme d’adsorption/désorption en fonction de la température pour le bois aggloméré, la brique et le parpaing

#### III.4.2.2 Méthode gravimétrique : Vapor Sorption Analyzer (VSA)

Le VSA (Figure III.15) est constitué principalement de deux cellules où l’échantillon est positionné pour l’essai, une balance d’une précision de  $\pm 0.1$  mg, des capteurs pour le contrôle hygrothermique aux niveaux des cellules. Le mode de fonctionnement de cet appareil consiste à conditionner l’échantillon sous une humidité précise, à une température constante, et où plusieurs paliers d’humidités relatives sont testés. Pour chaque palier, une acquisition automatique de la masse est effectuée jusqu’à l’équilibre qui est fixé en amont par un critère de variation dans le temps de plusieurs pesées consécutives.

Pour les essais réalisés dans le cadre de ce travail, le critère de stabilité est fixé à une variation de masse de 0.01% pour cinq pesés consécutives avec au maximum 24 heures par palier. La plage d’humidités balayée s’étend de 3% à 95% avec un pas de 10% pour chaque palier. La taille des échantillons est relativement plus grande par rapport au BELSORP-aqua3 (un cylindre de 40 mm de diamètre et 6 mm d’épaisseur).



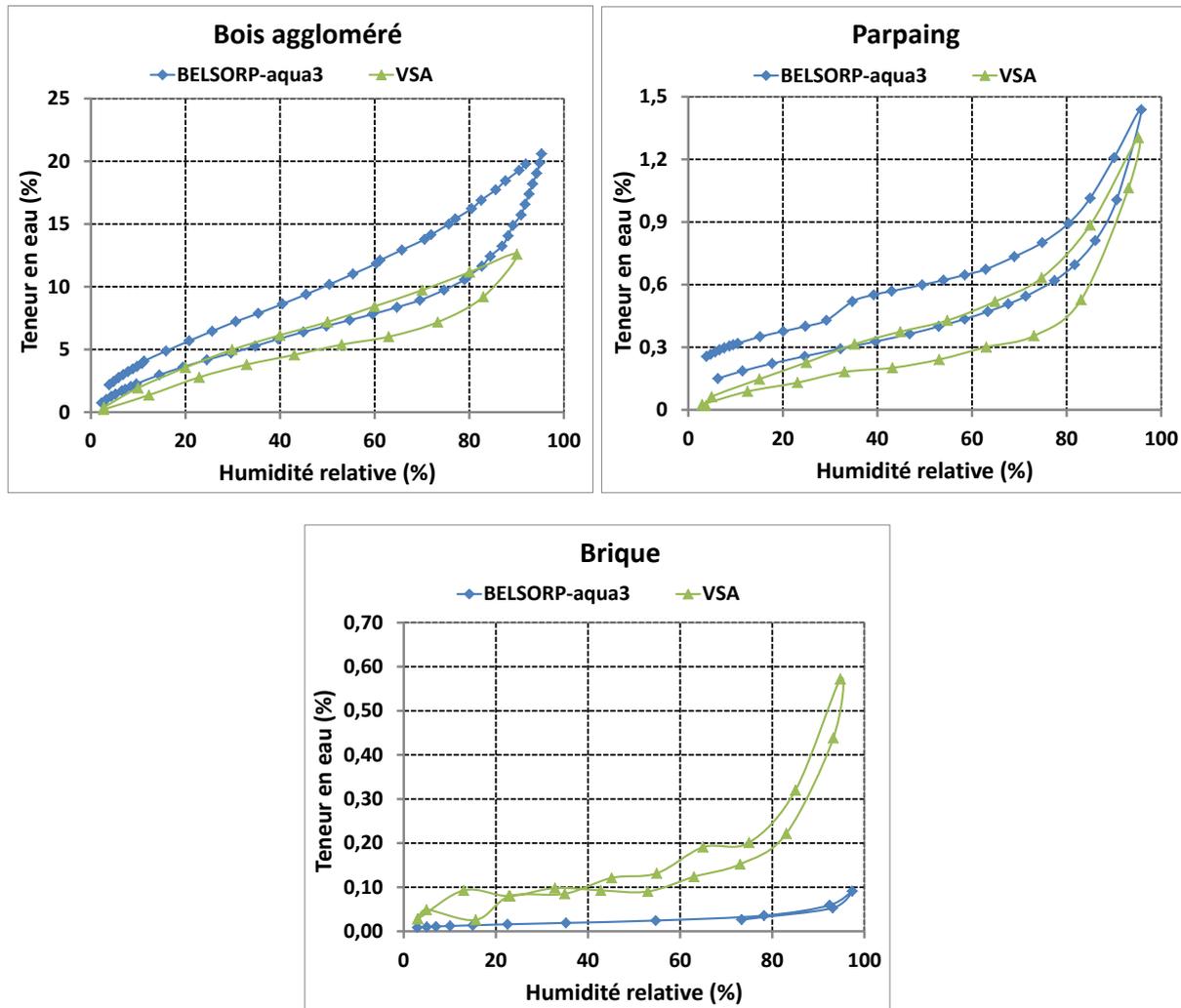
**Figure III.15** : Photo du dispositif VSA « Vapor Sorption Analyzer »

#### III.4.2.2.1 *Comparaison entre les deux méthodes : Volumétrie et gravimétrie*

Les deux méthodes d'évaluation des courbes d'isotherme d'adsorption/désorption utilisées dans cette partie sont basées sur deux principes différents. La Figure III.16 représente une comparaison entre les isothermes d'adsorption/désorption obtenues avec le VSA et ceux obtenus avec le BELSORP-aqua3. La comparaison est réalisée pour le bois aggloméré, la brique et le parpaing.

Pour le parpaing et l'aggloméré, les résultats des isothermes d'adsorption/désorption issus du VSA ont des valeurs inférieures par rapport à ceux obtenus avec le BELSORP-aqua3. Cela peut se justifier, en plus de l'hétérogénéité des deux matériaux, par la limite supérieure des humidités relatives que peut atteindre chaque appareil, notamment pour le bois aggloméré où l'humidité relative maximale est de 90%, qui est inférieure à celle atteinte avec le BELSORP-aqua3 (95%). Une autre explication qui peut être avancée de ce décalage, concerne le critère d'équilibre imposé par le VSA. En effet, pour certains matériaux l'équilibre de masse demande beaucoup de temps (plus de 24h), par conséquent, l'appareil passe à un autre palier d'humidité relative sans que la condition de stabilité soit vérifiée.

Concernant la brique, l'isotherme d'adsorption/désorption obtenu par le VSA est supérieure à celui obtenue par le BELSORP-aqua3. Cependant, vu le caractère hydrophobe de la brique et son adsorption très faible, la variation du poids de l'échantillon restera peu significative. Cela rend l'hypothèse d'une erreur de mesure du VSA très probable, sachant que la précision de sa balance est de  $\pm 0.1$  mg.



**Figure III.16 :** Comparaison des isothermes d'adsorption/désorption obtenues par deux méthodes différentes : gravimétrique et volumétrique

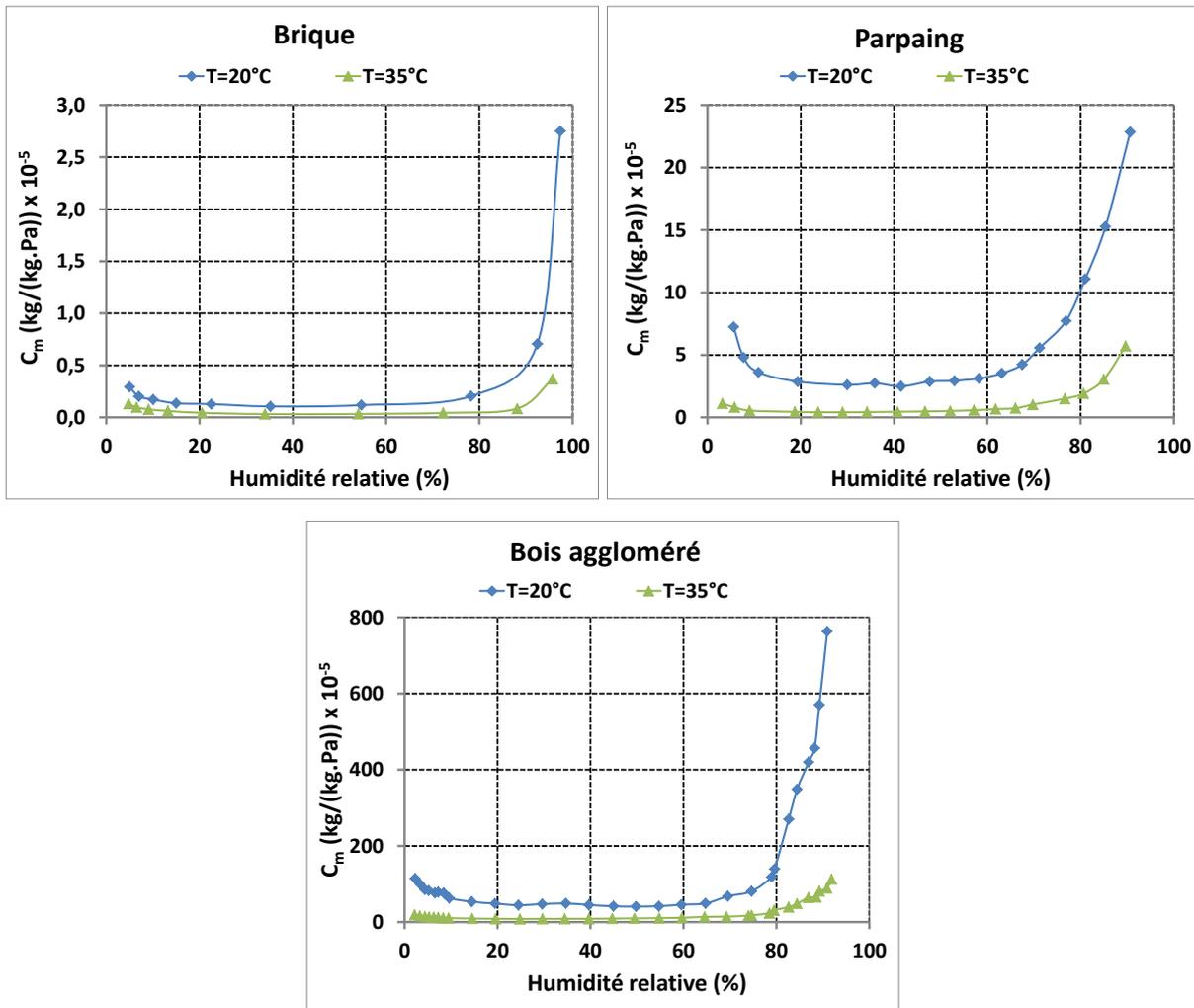
En conclusion, la détermination des isothermes d'adsorption/désorption est fortement dépendante de la méthode expérimentale utilisée, et, particulièrement de l'estimation de l'équilibre thermodynamique pour chacun des points de la courbe. Les courbes d'isothermes d'adsorption/désorption obtenues avec le BELSORP-aqua3 sont utilisées pour les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, notamment la validation expérimentale du modèle de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité entreprise dans le chapitre précédent.

### III.4.3 Evaluation de la capacité de stockage d'humidité

Dans le modèle de transfert couplé de chaleur d'air et d'humidité proposé dans le chapitre II, le comportement hydrique d'un matériau ainsi que sa capacité à stocker de l'eau, se traduit par la pente de la courbe d'isotherme d'adsorption d'eau. En effet, la capacité de stockage d'humidité est formulée comme suit :

$$C_m = \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \frac{1}{P_{vsat}(T)} \quad \text{(III.6)}$$

Il est à constater que ce paramètre d'entrée est fortement dépendant, à la fois de l'humidité relative et de la température. Dans le but d'évaluer l'impact de ces deux variables (T et HR) sur la capacité de stockage d'humidité des matériaux testés, la variation de ce coefficient est déterminée en fonction de l'humidité relative pour les deux températures que nous avons testées dans la partie précédente. Les résultats sont présentés dans la Figure III.17 pour la brique, le parpaing et le bois aggloméré.



**Figure III.17 :** Capacités de stockage d'humidité à  $20^\circ\text{C}$  et  $35^\circ\text{C}$  pour la brique, le parpaing et le bois aggloméré

La comparaison entre les trois matériaux testés confirme bien que la nature hygroscopique du matériau a un effet significatif sur la valeur de la capacité de stockage d'humidité. En effet, la brique qui a une faible adsorption a une capacité de stockage d'humidité moyenne de  $0.5 \times 10^{-5}$   $[\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{Pa})]$  alors qu'elle est de l'ordre de  $170 \times 10^{-5}$   $[\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{Pa})]$  pour le bois aggloméré.

L'analyse de l'évolution de la capacité de stockage d'humidité en fonction de l'humidité relative montre que ce paramètre ne varie pas pour les humidités inférieures à 80%. Par contre, pour les hautes humidités relatives (supérieure à 80%), une hausse importante est remarquée. Ce même comportement est observé pour les trois matériaux testés.

Les résultats montrent aussi, pour les trois matériaux étudiés, l'incidence de la variation de la température sur les valeurs de la capacité de stockage d'humidité. En effet, pour la même humidité relative, la capacité de stockage d'humidité diminue avec la hausse de la température. Cela est dû à la variation du degré d'adsorption d'eau en fonction de la température, discutée dans le paragraphe précédent. Aussi, la pression de vapeur saturante varie fortement avec la température.

Ces résultats ont permis de mettre en exergue la nécessité de la prise en compte de la variation de la capacité de stockage d'humidité lors de la modélisation des transferts hygrothermique, particulièrement pour les zones à fortes hygrométrie.

#### III.4.4 Courbe de rétention d'eau isotherme

La courbe de rétention d'eau est un moyen conceptuel qui permet d'appréhender le comportement hydrique d'un milieu poreux, particulièrement dans les zones super-hygroscopique. Cette courbe caractérise la capacité d'un matériau à stocker de l'eau liquide pour une température constante. Elle exprime la variation de la teneur en eau d'un matériau en fonction de la succion appliquée ou existante dans le milieu.

##### III.4.4.1 Dispositif expérimental et mode opératoire

La capacité de rétention d'eau d'un matériau est fortement liée à sa nature micro structurelle, notamment la taille et la distribution porale et la surface spécifique des grains ainsi que la composition chimique de la solution interstitielle.

La notion de rétention d'eau est généralement utilisée dans la caractérisation des sols. Il existe plusieurs méthodes expérimentales pour la détermination de la courbe de rétention d'eau. La pluparts de ces procédés sont basés soit sur la création d'une dépression d'eau par l'intermédiaire d'une plaque poreuse, soit en appliquant une surpression d'air sur l'échantillon (Klute, 1986), (Carter, 1993) et (Burke et al., 1986).

Dans ce travail, un extracteur à membrane est utilisé, son principe de fonctionnement est basé sur la méthode par presse à membrane. L'outil en question est un extracteur à 100 bars modèle 1020 de Soil-Moisture Equipment Corp (voir Figure III.18). Les membranes utilisées sont fabriquées en lames de cellulose avec une épaisseur de 20 $\mu$ m et un rayon de pore de 2.4nm.

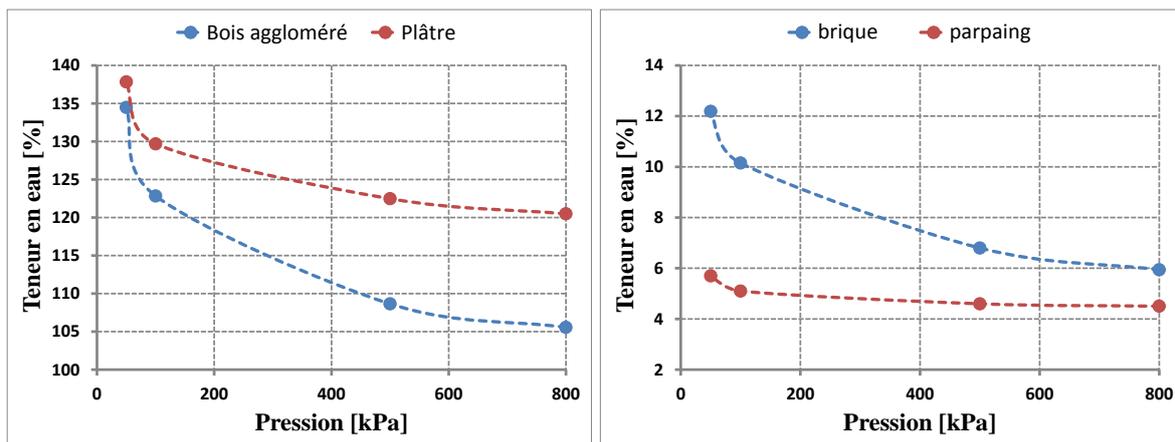


**Figure III.18 :** Extracteur à membrane (modèle 10120 de Soil-Moisture Equipmnet Corp)

Le protocole expérimental consiste à mettre l'échantillon saturé (la taille de l'échantillon est de 1 à 3 cm) sur la membrane de cellulose qui est préalablement humidifiée pour assurer un contact parfait avec le matériau. Par la suite, une pression est imposée à l'intérieur de l'extracteur qui provoque une évacuation d'eau. Le suivi de la variation d'eau est effectué jusqu'à l'équilibre. Quand l'état stationnaire est atteint, le matériau est pesé afin de déterminer la teneur en eau correspondante à la pression appliquée. Pour tracer la courbe de rétention d'eau, l'essai est réalisé pour plusieurs pressions différentes entre 0.5 bar et 8 bar.

#### III.4.4.2 Résultats et analyse

Les courbes de rétention d'eau exprimant l'évolution de la teneur en eau à l'équilibre de chaque matériau en fonction de la pression capillaire appliquée sont représentées dans la Figure III.19 ci-dessous.



**Figure III.19 :** Courbes de rétention d'eau pour les matériaux testés : aggloméré et plâtre (à gauche), brique et parpaing (à droite)

Les résultats montrent que la teneur en eau diminue avec l'augmentation de la pression capillaire appliquée. Ce comportement est observé pour les quatre matériaux testés avec des cinétiques de baisses de teneur en eau différentes. Cela est dû à la nature même du matériau et

à sa structure poreuse. En effet, en comparant le bois aggloméré et le plâtre qui ont une capacité d'adsorption relativement importante, les courbes illustrent bien l'impact de la microstructure sur la rétention d'eau. Le plâtre a une capacité de stockage de l'eau plus importante que celle du bois aggloméré, cela peut se justifier par sa porosité qui est nettement moins importante que celle du bois aggloméré.

La brique, malgré un faible taux d'adsorption d'eau, a une capacité de stockage d'eau, dans les zones super hygroscopiques, supérieure à celle du parpaing. Cela peut s'expliquer aussi par la nature micro-structurale car la porosité de la brique est légèrement plus importante que celle du parpaing. Les mêmes constatations et les mêmes phénomènes sont relevés sur les courbes des isothermes de d'adsorption de ces matériaux

#### III.4.4.3 Relation entre la succion et l'humidité relative

Pour une humidité relative donnée, une pression capillaire correspondante est imposée aux échantillons. En effet, la relation entre l'humidité relative ambiante et la succion correspondante ne dépend pas du type de matériau. Elle est définie dans l'équation (III.7) par la loi de Kelvin sous une hypothèse d'un équilibre thermodynamique local au niveau du pore entre les deux phases liquide et gazeuse.

$$P_c = P_a - P_l = \frac{RT}{gM} \ln(\varphi) \quad \text{(III.7)}$$

Où :

$P_c$ [Pa]	représente la pression capillaire,
$P_a$ [Pa]	la pression de l'air,
$P_l$ [Pa]	la pression de l'eau liquide,
$\varphi$ [%]	l'humidité relative ambiante,
$T$ [K]	la température thermodynamique,
$g$ [ $m/s^2$ ]	l'accélération de la pesanteur ( $g = 9.81 m/s^2$ ),
$M$ [ $g/mol$ ]	la masse molaire de l'eau ( $M = 18.016 g/mol$ ), et enfin,
$R$ [ $J/(mol \cdot K)$ ]	la constante molaire des gaz parfaits ( $R = 8.31 J/(mol \cdot K)$ ).

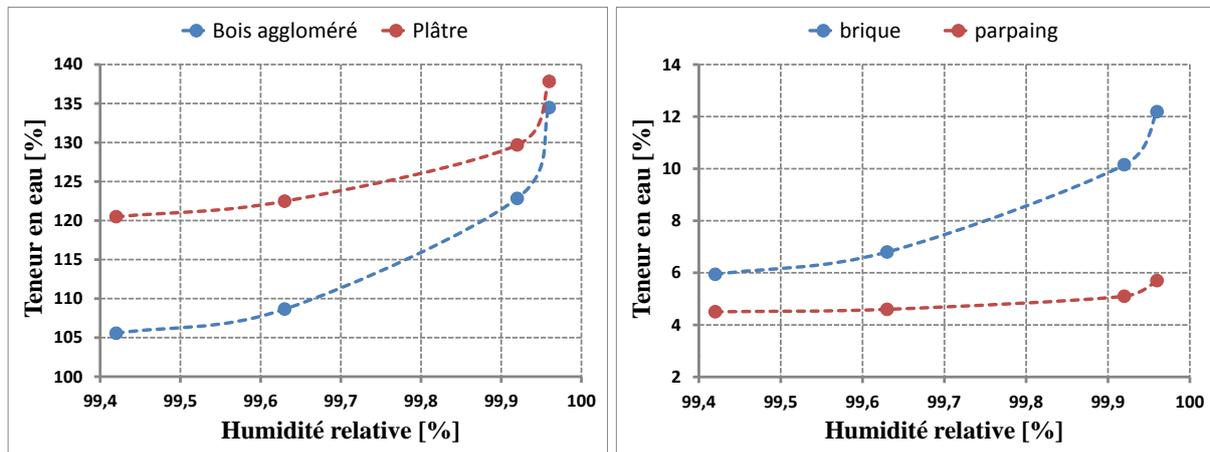
Dans ce travail, les résultats des essais de rétention d'eau sont utilisés pour compléter les courbes d'isotherme d'adsorption d'eau dans les zones super hygroscopique. En effet, les essais de détermination des isothermes d'adsorption et de désorption ne permettent pas la mesure des capacités de stockage d'humidité des échantillons pour des hygrométries élevées (généralement entre 93% et 100%). Pour cela, les courbes de rétention d'eau (évolution de la teneur en eau de l'échantillon en fonction de la succion imposée) et la relation entre la pression capillaire et l'humidité relative sont utilisées pour avoir une relation entre l'humidité relative et la teneur en eau correspondante dans les zones super hygroscopique. Le Tableau III.1 donne des valeurs de la succion et les hautes humidités relatives correspondantes issues de la loi de Kelvin.

**Tableau III.1:** Relation entre la succion et l'humidité relative  
(loi de Kelvin)

Succion [kPa]	Humidité relative [%]
0	100
10	99.99
<b>50</b>	<b>99.96</b>
<b>100</b>	<b>99.92</b>
300	99.78
<b>500</b>	<b>99.63</b>
<b>800</b>	<b>99.42</b>
1600	98.84
3500	97.49
6000	95.74

La Figure III.20 présente les teneurs en eau des matériaux testés pour des hautes humidités relatives dans la zone super hygroscopique.

La comparaison des résultats obtenus avec les courbes d'isothermes d'adsorption et de désorption montrent bien que dans la zone super hygroscopique où le transfert d'eau liquide est prépondérant, les teneurs en eau augmentent brusquement pour les quatre matériaux testés. En effet, pour le bois aggloméré, la teneur en eau correspondant à une humidité relative de 95%, est de 25%. Cependant pour les humidités relatives au voisinage de 100%, la teneur en eau peut atteindre les 120%. Les mêmes observations sont enregistrées pour les autres matériaux avec des teneurs en eau maximales différentes, cela dépend de la nature même du matériau et de sa structure poreuse.



**Figure III.20 :** Evolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative dans la zone super-hygroscopique

## III.5 Propriétés du transfert thermique

### III.5.1 Conductivité thermique

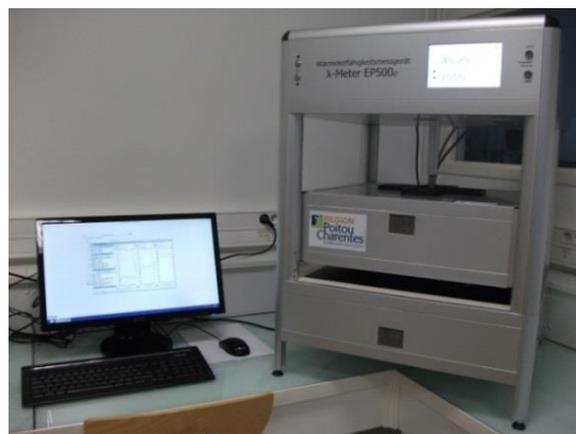
Dans le domaine du bâtiment, la conductivité thermique des matériaux de construction est parmi les propriétés les plus influentes sur le comportement hygrothermique du bâtiment. En effet, cette grandeur caractérise le comportement du matériau lors du transfert thermique par conduction. Ce dernier est généralement le phénomène le plus dominant dans le transfert de chaleur dans les enveloppes de bâtiments.

Il existe plusieurs techniques pour évaluer expérimentalement la conductivité thermique. Cependant, la variation de la cinétique du transfert thermique en fonction de l'état hydrique du matériau rend la détermination de cette propriété plus complexe (Kari et al., 1992) et (Traoré, 2011).

Les méthodes expérimentales directes de détermination de la conductivité thermique peuvent être classifiées selon les deux critères de mesure suivants :

- Mesure en régime stationnaire ou instationnaire. Parmi les méthodes les plus connues en régime permanent, la plaque chaude gardée. Pour la mesure de la conductivité thermique en régime transitoire, les méthodes « flash » et de « sonde à choc » sont les plus utilisées (Kaermerlen, 2009).
- Mesure absolue ou relative. une méthode est dite relative lorsqu'on détermine la conductivité thermique par comparaison avec un autre matériau dont cette valeur est connue (éprouvette de référence).

Dans ce travail, le Lambda-meter Ep 5000e (Figure III.21) est utilisé. L'appareil en question fonctionne avec le principe de la plaque chaude gardée en accord avec les normes ISO 8302 DIN EN 1946-2 DIN EN 12667 and ASTM C177 (DIN 52612).



**Figure III.21** : Lambda-meter Ep 5000e

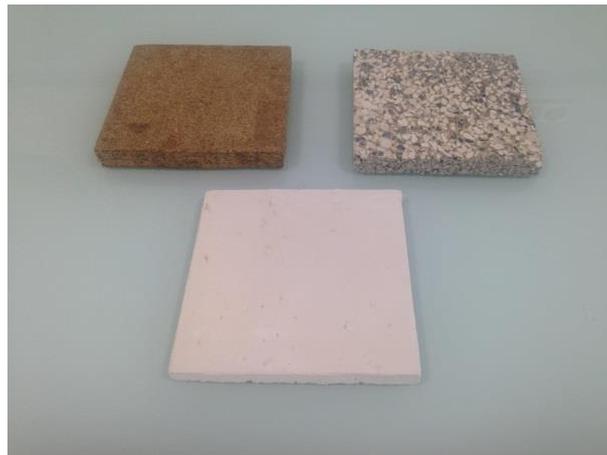
Le Lambda-meter EP5000e mesure l'épaisseur de l'échantillon ( $e$  [m]) et sa surface ( $A$  [m<sup>2</sup>]), la différence de température entre les deux côtés de l'échantillon ( $\Delta T$  [K]) ainsi que le flux

thermique unidirectionnel ( $Q$  [W]) qui travers l'échantillon, qui est équivalent à la puissance électrique de chauffage ( $P = U \cdot I$  [W]). Finalement la conductivité thermique est calculée à partir de la relation suivante :

$$\lambda = \frac{Q \cdot e}{\Delta T \cdot A} = \frac{U \cdot I \cdot e}{\Delta T \cdot A} \quad \text{(III.8)}$$

Le but de cet essai est de mesurer l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau du matériau. Pour cela, des mesures de conductivité thermique sont réalisées pour des plages différentes de teneur en eau. Il est à noter que les mesures sont effectuées sous un gradient de température de 15°C en fixant la face chaude de l'appareil à 23°C.

La détermination de la conductivité thermique avec le Lambda-meter Ep 5000e nécessite une bonne préparation des échantillons. La taille minimale de l'échantillon est de 15x15 mm<sup>2</sup> avec des faces bien planes pour éviter un mauvais contact entre la plaque et l'échantillon qui pourrait engendrer une perturbation dans la mesure. La Figure III.22 représente les échantillons testés.

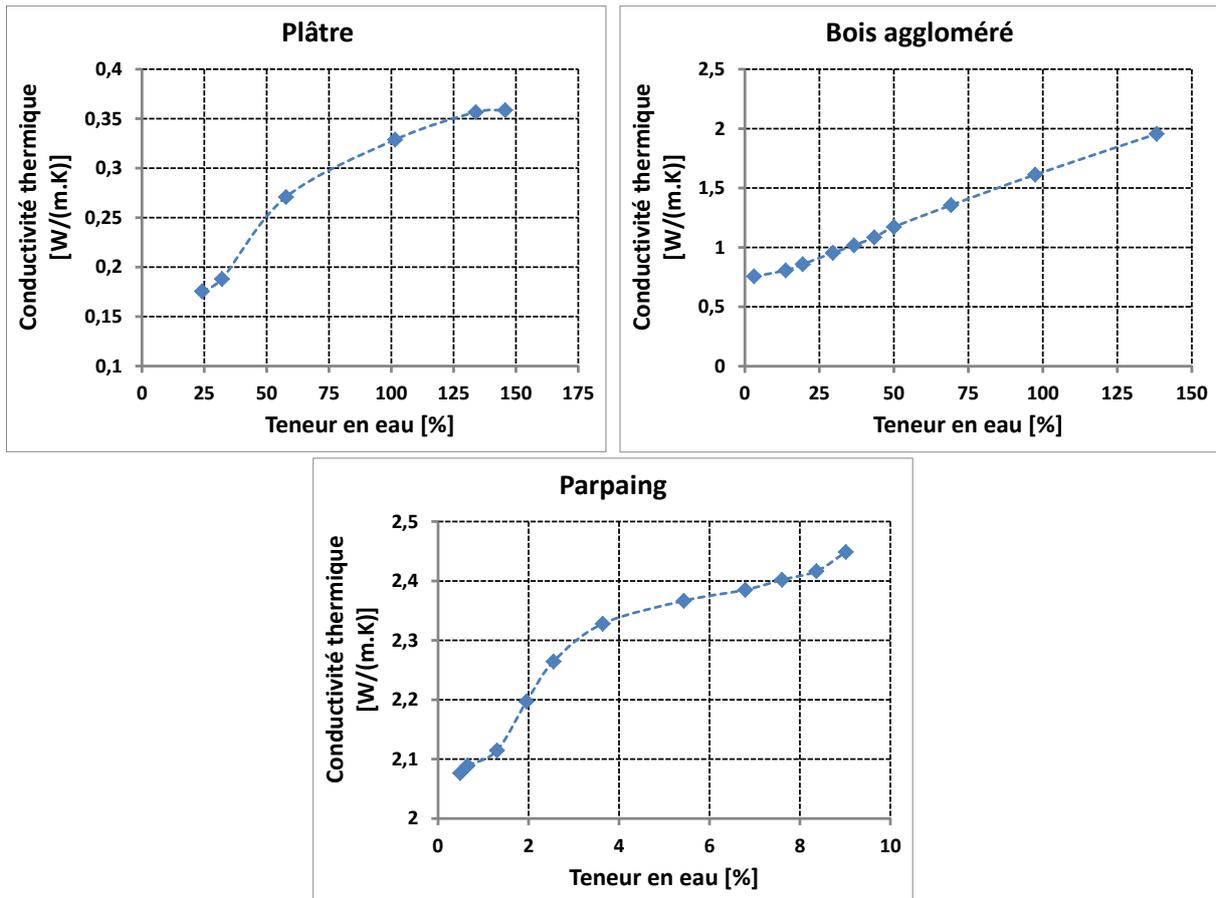


**Figure III.22 :** Echantillons testés (bois aggloméré, parpaing et plâtre)

Les matériaux testés subissent une étape de pré conditionnement qui consiste en premier lieu, à saturer les échantillons en eau, puis celui-ci est séché progressivement jusqu'à atteindre un séchage complet (la durée du séchage dépend du matériau testé et sa capacité de stockage d'humidité). Durant ce procédé, des mesures de conductivité thermique ont été réalisées en enveloppant l'échantillon dans un film extensible. Cela permet d'éviter toute évaporation de l'eau lors de la mesure. Au final une mesure à l'état sec est rigoureusement effectuée.

### III.5.2 Résultats et analyse

L'évolution de la conductivité thermique en fonction de l'état hydrique du matériau est représentée dans la Figure III.23 pour le plâtre, le bois aggloméré et le parpaing.



**Figure III.23 :** Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau pour le plâtre, le bois aggloméré et le parpaing

La comparaison des conductivités thermiques obtenues pour les trois matériaux testés montre que le parpaing est relativement le moins résistant au transfert thermique tandis que le plâtre reste le plus résistant (isolant).

Pour les trois matériaux, les résultats illustrent bien les effets notables de l'état hydrique sur les valeurs des conductivités thermiques. En effet, pour le bois aggloméré la conductivité thermique augmente de 0.76, pour une teneur en eau à 3.11%, et de 1.95 pour une teneur en eau à 138%, soit une augmentation de 158%. Pour le plâtre qui est un matériau hygroscopique, la hausse de la conductivité thermique peut atteindre 105%. En revanche, pour un matériau qui a une faible capacité de stockage d'humidité, la hausse peut atteindre 20%. Ces résultats mettent en évidence la nécessité de la prise en compte de la variation de la conductivité thermique en fonction de l'état hydrique des matériaux lors de la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments et les erreurs qui peuvent être engendrées dans le cas où les valeurs sèches des conductivités sont considérées (cas que l'on rencontre dans les logiciels de simulation thermiques dynamiques utilisés, Pleiades –Comfie - TRNSYS – Energie Plus, en bureau d'études notamment et par certaine communauté de la thermique du bâtiment en recherche).

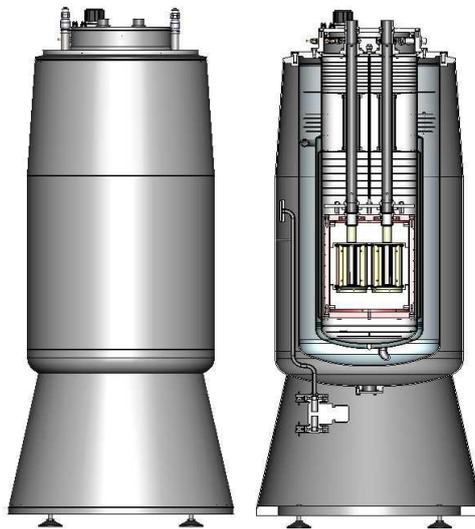
### III.5.3 Chaleur spécifique

Comme la conductivité thermique, la chaleur spécifique est une donnée importante pour la caractérisation du transfert de chaleur dans les matériaux de construction. Elle fournit l'information sur la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré, la température d'un matériau.

L'enthalpie d'un système étant une grandeur extensive, la chaleur spécifique d'un matériau poreux est exprimée en fonction de celle des phases qui le constituent, notamment la phase solide et humide. L'étude réalisée dans cette partie s'intéresse à évaluer la variation de la chaleur spécifique des matériaux de construction, en fonction de la teneur en eau.

### III.5.4 Dispositif expérimental et mode opératoire

Il existe plusieurs procédés pour déterminer expérimentalement la chaleur spécifique d'un matériau. Dans le cadre de ce travail, le calorimètre à flux de chaleur (Figure III.24) basé sur le principe de CALVET est utilisé au laboratoire. En effet, le calorimètre CALVET est un appareil différentiel, il est équipé par deux thermopiles 3D qui entourent respectivement une cellule de mesure dans laquelle l'échantillon à étudier est placé, et une cellule de référence contenant un produit inerte thermiquement. Ce type de thermocouples couvre l'intégralité de la zone où le phénomène thermique se produit, ce qui permet d'intégrer la totalité du flux de chaleur produit lors du phénomène d'échange thermique.



**Figure III.24** : Calorimètre CALVET BT 2.15

Un cryostat est relié au calorimètre pour réguler sa température intérieure. Une canalisation de pompage est aussi connectée au calorimètre afin d'assurer la mise sous vide de l'enceinte calorimétrique. La Figure III.25 présente le dispositif expérimental utilisé.

L'expérimentation est réalisée à basse température. Avant de commencer l'essai, un conditionnement du calorimètre est effectué par la mise sous vide de l'enceinte calorimétrique puis l'injection de l'azote afin d'éviter tout risque de condensation. La température intérieure est réglée à  $-30^{\circ}\text{C}$  en utilisant un cryostat. Par la suite, en procédant à une augmentation de la température, la quantité de chaleur échangée par l'échantillon est mesurée par le biais d'un fluxmètre qui permet de remonter à la chaleur spécifique du matériau testé.

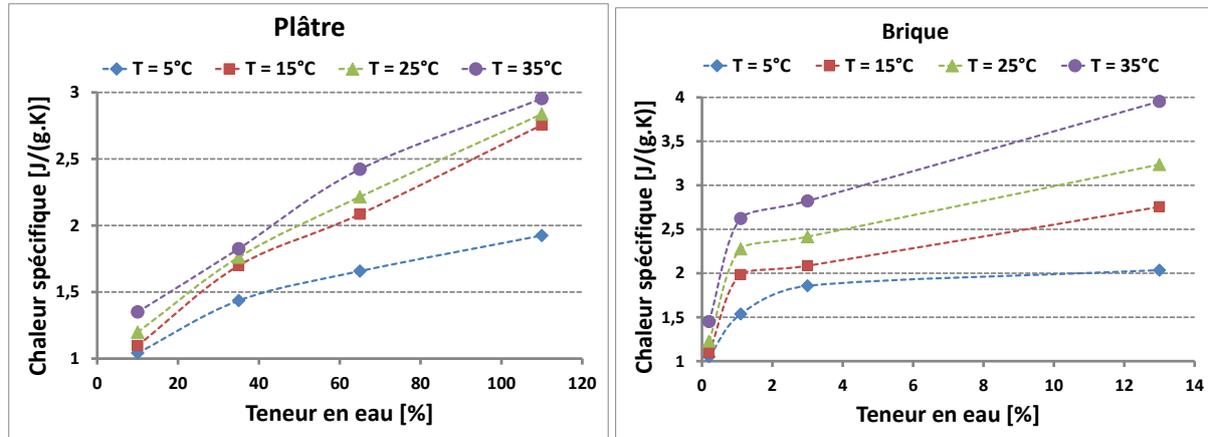
Dans le but de suivre l'évolution de la chaleur spécifique en fonction de la teneur en eau du matériau, plusieurs mesures ont été réalisées sur le même échantillon avec des teneurs en eau différentes. Pour le premier essai, l'échantillon est saturé d'eau. Par la suite, en procédant à un séchage progressif de l'échantillon, plusieurs essais sont réalisés pour des teneurs en eau différentes. Au final, un essai à l'état sec est réalisé.



**Figure III.25 :** Dispositif de mesure de la chaleur spécifique

### III.5.5 Résultats et analyse

Le suivi de l'évolution de la chaleur spécifique en fonction de la teneur en eau du matériau est représenté dans la Figure III.26 pour la brique et le plâtre.



**Figure III.26 :** évolution de la chaleur spécifique en fonction de l'état hydrique du matériau

Les résultats montrent que la chaleur spécifique augmente avec la hausse de la température. Cette augmentation est caractérisée par une pente qui dépend de la nature du matériau. En effet, entre 15°C et 35 °C, la chaleur spécifique augmente de 10% pour le plâtre ( $C_p(15^\circ\text{C}) = 1.044 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$  et  $C_p(35^\circ\text{C}) = 1.150 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$ ). Pour la brique, la hausse de la chaleur spécifique est de 5%, elle est moins importante que celle du plâtre ( $C_p(15^\circ\text{C}) = 0.747 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$  et  $C_p(35^\circ\text{C}) = 0.782 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$ ).

Concernant la variation de la chaleur spécifique en fonction de l'état hydrique du matériau, les résultats montrent que la teneur en eau a un effet significatif sur la valeur de la chaleur spécifique. Pour le plâtre, une hausse moyenne de 146% est observée entre un état relativement sec ( $\omega = 10\%$ ) et l'état saturé. Le même constat est noté pour la brique avec une hausse moins importante de l'ordre de 51% entre l'état sec et l'état saturé (à 20°C :  $C_p(\omega = 0.2\%) = 0.766 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$  et  $C_p(\omega = 13\%) = 1.158 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$ ). En effet, la chaleur spécifique d'air est de  $1.042 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$  alors que celle de l'eau est de  $4.185 \text{ [J/(g} \cdot \text{K)]}$ , donc quand la teneur en eau augmente dans le matériau, la proportion d'air diminue et par conséquent la chaleur spécifique du matériau augmente.

## III.6 Conclusion

Dans ce chapitre une campagne expérimentale de caractérisation des propriétés physiques, hydrique et thermo physiques de plusieurs matériaux de construction (le plâtre, la brique, le parpaing et le bois aggloméré) a été réalisée. Nous avons évalué l'impact de l'état thermique et hydrique des matériaux testés, sur la variation des valeurs de leurs propriétés intrinsèques.

Pour les propriétés physiques, la distribution de la taille des pores des matériaux a été évaluée par le biais de la méthode de porosité par intrusion de mercure. Cet essai a permis de fournir des informations sur la microstructure des matériaux qui constitue une caractéristique importante pour une meilleure compréhension du comportement hygrothermique des matériaux.

De plus, les principales propriétés caractérisant le transfert hydrique ont été mesurées, notamment les isothermes d'adsorption et de désorption, les courbes de rétention d'eau ainsi que la perméabilité à la vapeur d'eau.

Les courbes d'isothermes d'adsorption et de désorption ainsi que le phénomène d'hystérésis ont été évalués expérimentalement en utilisant deux méthodes différentes. Une volumétrie, en utilisant le Belsorp aqua3, et l'autre gravimétrie par le biais du VSA. Cette démarche a permis de faire une étude comparative sur les deux méthodes. Par ailleurs, l'effet de la température sur les isothermes d'adsorption et de désorption a été analysé. Les résultats ont montré que l'amplitude de cet effet diffère d'un matériau à un autre.

Par la suite, pour mieux comprendre le comportement hydrique des matériaux testés dans les conditions super hygroscopiques, les courbes de rétention d'eau ont été déterminées. Les données obtenues ont permis d'évaluer l'évolution de la teneur en eau des matériaux pour des taux d'humidités relatives très élevées, et ainsi fournir les informations manquantes dans les courbes d'isothermes d'adsorption et de désorption.

En s'intéressant aux propriétés thermiques, le suivi de l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau du matériau a été réalisé. Pour cela le dispositif Lambda-meter Ep 5000<sup>e</sup>, qui repose sur le principe de la plaque chaude gardée, a été utilisé. Dans le même sens, la variation de la chaleur spécifique selon l'état hydrique du matériau a été évaluée. Le Calorimètre CALVET BT 2.15 a été utilisé pour cet essai. Les résultats obtenus ont montrés que la teneur en eau du matériau a un effet non négligeable sur les valeurs des propriétés thermiques.

L'ensemble des propriétés hydriques et thermophysiques déterminées dans ce travail permettent d'enrichir la base de données, plus particulièrement pour des matériaux utilisés dans les anciennes constructions tels que la brique, le parpaing et le bois aggloméré.

Aussi, les caractéristiques hygrothermiques des matériaux sollicités expérimentalement sont utilisées comme des données d'entrée pour les modèles de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments.

La variation non négligeable de ces propriétés en fonction de la teneur en eau et de la température du matériau, illustre l'intérêt de cette étude qui montre l'importance de la prise en compte de l'évolution des propriétés thermophysiques et hydriques des matériaux en fonction de l'état hygrothermique des matériaux afin d'avoir une prédiction plus précise des transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois de bâtiments.

# Chapitre IV.

## Modélisation du comportement hygrothermique des enveloppes hygroscopiques dans les bâtiments multizones : Approche de co- simulation dynamique

### IV.1 Introduction

Pour mieux prédire le comportement hygrothermique d'un bâtiment, il est primordial de prendre en compte non seulement les différents phénomènes de transferts thermiques et hydriques se produisant dans l'enveloppe, mais également les interactions avec l'ambiance habitable ainsi que l'environnement extérieur.

Parmi les différents outils de modélisation, et logiciels de simulation, certains sont bien reconnus pour l'étude thermique et hygrométrique du bâtiment à l'instar de TRNSYS, Energie plus ou encore Open Modelica. Néanmoins, la modélisation fine des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois, reste généralement mal appréhendée. Soulignons, que la modélisation incomplète des transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe, influe directement sur la précision de la simulation du comportement thermique et hydrique global du bâtiment.

La nature non linéaire du système d'équations fortement couplés traduisant les transferts hygrothermiques, rendent la modélisation complexe et difficile à mettre en œuvre avec

notamment des niveaux de discrétisation élevés. En effet, au niveau de certains composants de l'enveloppe comme les ponts thermiques, une modélisation intermédiaire en 1D s'avère non appropriée notamment pour traiter les risques de dégradations liés à la présence excessive de l'humidité.

Afin de s'affranchir de cette problématique, une plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES (HAM : Heat, Air and Moisture transfer, BES : Building Energie Simulation) est développée dans ce chapitre. Dans cet outil, TRNSYS est utilisé pour la modélisation thermique dynamique du bâtiment et COMSOL pour la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans l'enveloppe.

La démarche de co-simulation dynamique HAM-BES adoptée permet d'un côté, une interaction dynamique lors de la modélisation des transferts hygrothermiques dans l'enveloppe et l'ambiance du bâtiment. D'un autre côté, cette approche assure une modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse au niveau de la paroi avec un niveau de discrétisation élevé (2D et 3D). Cela permet de traiter avec une bonne précision les points singuliers de l'enveloppe où des phénomènes de transferts hygrothermiques multidirectionnels se produisent.

Dans le but de vérifier le bon fonctionnement de la plateforme de co-simulation HAM-BES, plusieurs validations ont été réalisées. La première consiste à des confrontations par rapport à une solution analytique et des données expérimentales réalisées dans le cadre de l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie. Une autre validation expérimentale est réalisée au niveau du laboratoire en utilisant un dispositif expérimental à une échelle intermédiaire qui permet d'analyser expérimentalement le comportement hygrothermique d'une partie de paroi ( $1 \text{ m}^2$ ) sous différentes sollicitations contrôlées.

Par la suite des cas d'étude ont été réalisés dans le but d'analyser l'effet des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans l'enveloppe sur le comportement hygrothermique des ambiances habitables et la prédiction des consommations énergétiques des bâtiments. Par ailleurs, l'impact de l'interaction dynamique HAM-BES sur la prédiction du comportement hygrothermique dans l'enveloppe est étudié dans ce travail.

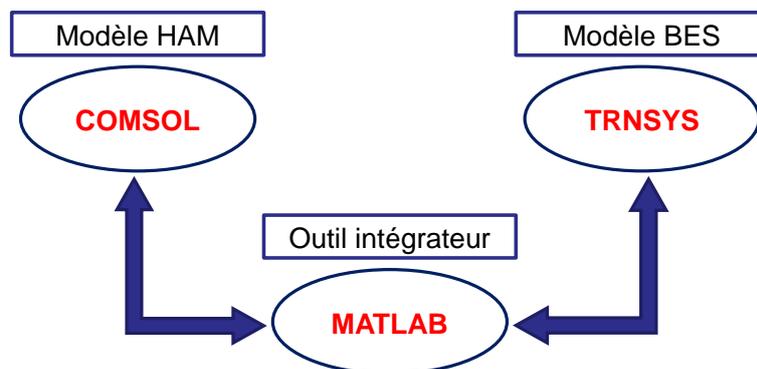
Dans le même sens, un cas d'étude a été entrepris dans le but de réaliser une étude comparative sur les systèmes de ventilation et leurs efficacités à réduire les risques liés à l'humidité dans les maisons individuelles.

## IV.2 Intégration du modèle de paroi des transferts « HAM » dans un code de simulation dynamique de bâtiment : plateforme de co-simulation HAM-BES

### IV.2.1 Choix des outils de modélisation

La plupart des modèles thermo-hydro-aéraulique des bâtiments proposent une granularité intermédiaire (modélisation multizone pour l'ambiance et 1D pour l'enveloppe). Cependant, une modélisation thermo-hydro-aéraulique à granularité intermédiaire, particulièrement pour l'enveloppe, s'avère insuffisante pour une évaluation précise des désordres causés par l'humidité au niveau du bâtiment.

Dans le présent travail, une plateforme de co-simulation HAM-BES a été développée. Cette plateforme consiste à couplé dynamiquement un modèle de transfert hygrothermique de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches (HAM) avec un modèle thermique du bâtiment (BES). Le couplage concerne la cohabitation entre COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, outil de simulation par éléments finis pour les transferts thermohydriques à travers l'enveloppe, et TRNSYS, outil de simulation thermique dynamique global pour le bâtiment et les systèmes dynamiques. La liaison entre les deux outils en question est assurée par MATLAB qui est considéré comme un outil intégrateur. Cela permet de résoudre simultanément les équations de conservation des bilans massique et thermique au niveau de l'ambiance et de l'enveloppe du bâtiment. La Figure IV.1 illustre les outils utilisés dans la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES développée.



**Figure IV.1** : Principe de la plateforme de co-simulation HAM-BES et les outils utilisés

Le logiciel de simulation dynamique du bâtiment TRNSYS est choisi car il représente un outil de modélisation approuvé par plusieurs organismes et laboratoires de recherche dans le domaine du bâtiment. En effet, son architecture modulaire flexible permet d'étendre l'étude thermohydrique à une étude thermo-hydro-aéraulique. Cela est possible par l'intégration de modules de ventilation comme Contam (Solar Energy Laboratory et al., 2010a).

Pour la modélisation des transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe, COMSOL Multiphysics est choisi dans le but d'assurer une simulation avec une granularité fine (2D), voire très fine (3D) notamment pour des composants d'enveloppe impliquant des flux hygrothermiques multidirectionnels comme les ponts thermiques. Par conséquent, la qualité de la prédiction des risques liés à la présence excessive de l'humidité peut être considérablement améliorée.

## IV.2.2 Mise en œuvre de la co-simulation dynamique HAM-BES

Comme il a été mentionné précédemment, la liaison entre les deux outils de simulation hygrothermique du bâtiment (TRNSYS et COMSOL) est assurée par le biais de MATLAB.

La connexion COMSOL/MATLAB est assurée à travers l'interface LiveLink basée sur un système client/serveur où Matlab représente le client. Les commandes de Matlab font appel au serveur de COMSOL (Comsol Multiphysics 2012). Ainsi, le modèle HAM est défini sous MATLAB et ses équations différentielles sont résolues par le solveur de COMSOL. Concernant la liaison TRNSYS/MATLAB, elle est établie en utilisant le type 155 (Solar Energy Laboratory et al., 2010b).

### IV.2.2.1 Synchronisation temporelle

Dans les démarches de co-simulation, il existe deux méthodes de synchronisation temporelle :

La première, est un couplage direct, où les deux modèles d'enveloppe et de bâtiment sont résolus simultanément. La résolution est effectuée sur l'un des deux outils et l'autre est considéré comme un composant.

La deuxième méthode, est le couplage indirect, où la résolution des modèles HAM et BES se fait séparément avec une synchronisation à un pas de temps bien précis (Nicolai et al., 2007).

Dans la plateforme de co-simulation présentée dans ce travail, le contrôle du pas de temps est assuré par le modèle BES (TRNSYS). Ainsi, l'échange de données entre les deux logiciels couplés s'effectue à la post-convergence au pas de temps courant du modèle BES durant lequel le modèle HAM de COMSOL est résolu avec un pas de temps plus fin. En effet, pour un pas de temps donné, les conditions aux limites intérieures et extérieures sont transférées à COMSOL à travers Matlab et sont utilisées pour la résolution du modèle HAM. Par la suite, les flux hydrique et thermique calculés sont transférés à leur tour à TRNSYS et sont pris en compte pour la résolution du modèle BES pour le même pas de temps.

Le schéma de la Figure IV.2 résume la démarche de synchronisation temporelle entre le modèle BES sous TRNSYS et le modèle HAM sous COMSOL. La différence des pas de temps entre les deux modèles se justifie par la cinétique différente des transferts qui influe directement sur le comportement dynamique des modèles couplés. Le pas de temps  $\Delta t_{BES}$  utilisé dans TRNSYS est de 1 h. Cette valeur est courante dans la simulation dynamique des

bâtiments (Clarke, 2001). En outre, le pas de temps utilisé dans le modèle HAM implémenté sous COMSOL, est défini selon le type et la composition de paroi étudiée et en fonction de la cinétique des transferts de masse et de chaleur dans la paroi soumise aux sollicitations thermiques et hydriques imposées.

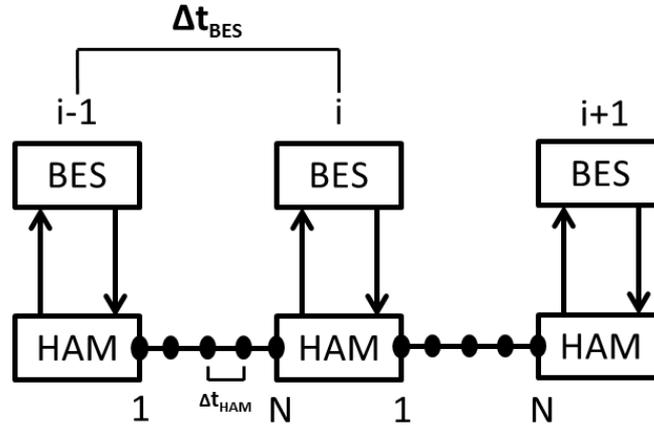


Figure IV.2: Stratégie de synchronisation temporelle

#### IV.2.2.2 Stratégie d'échange de données

A chaque pas de temps un échange d'information est effectué entre les deux modèles de simulation HAM et BES.

Les données transférées du modèle BES (TRNSYS) au modèle HAM (COMSOL) correspondent aux conditions aux limites extérieures et intérieures de l'enveloppe. Ces conditions aux limites représentent les données météorologiques à l'extérieur et les conditions hygrothermiques ambiantes de l'environnement intérieur. Les conditions initiales du modèle HAM aux pas de temps BES courant correspondent aux profils thermiques et hydriques stockés par l'outil intégrateur (MATLAB) à la fin du pas de temps BES précédent.

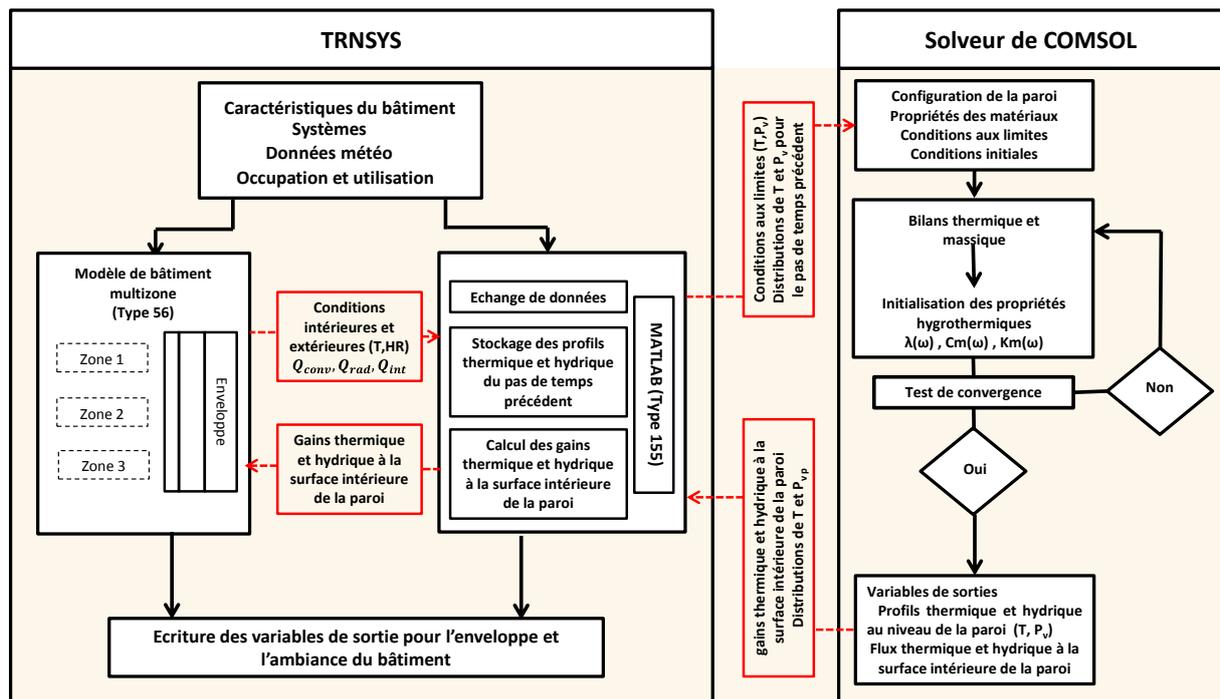
Par ailleurs, à la convergence de chaque pas de temps  $\Delta t_{BES}$ , les flux thermiques et hydriques transmis par l'enveloppe à l'ambiance intérieure et calculés par le modèle HAM, sont transférés au modèle BES. En effet, le flux hydrique est identifié au niveau de TRNSYS comme un gain d'humidité dans la zone. Concernant le flux de chaleur, il est introduit comme gain thermique dans l'équation de bilan énergétique de l'enveloppe. Cependant, pour chaque pas de temps, ce gain thermique est corrigé en amont, au niveau de l'outil intégrateur (MATLAB), afin de tenir compte du flux thermique par conduction de la paroi déjà calculé sur TRNSYS (fonction de transfert). Il est à noter que les gains thermique et hydrique peuvent être négatifs ou positifs.

Au niveau de TRNSYS, le bilan énergétique à la surface intérieure de la paroi est déterminé en fonction d'un flux convectif ( $Q_{conv} [kJ/h]$ ), un flux radiatif ( $Q_{rad} [kJ/h]$ ), un flux thermique par conduction calculé par la méthode de la fonction de transfert ( $Q_{cond} [kJ/h]$ ) et un gain thermique interne ( $Q_{int} [kJ/h]$ ). Le flux thermique ( $Q_{HAM} [kJ/h]$ ) dû à la

considération des transferts hygrothermiques dans l'enveloppe est corrigé et introduit dans le bilan énergétique de la paroi. L'équation (IV.1) résume le calcul du flux thermique corrigé ( $Q'_{HAM} [kJ/h]$ ).

$$Q'_{HAM} = Q_{HAM} - Q_{cond} = Q_{HAM} - (Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{int}) \quad (IV.1)$$

La Figure IV.3 illustre la démarche de co-simulation et la stratégie de couplage entre le modèle BES représentée par TRNSYS et le modèle HAM implémenté sous COMSOL, ainsi que la méthode d'échange de données entre les deux modèles BES et HAM pour chaque pas de temps global  $\Delta t_{BES}$ .



**Figure IV.3:** schéma de couplage HAM-BES par la co-simulation entre COMSOL et TRNSYS

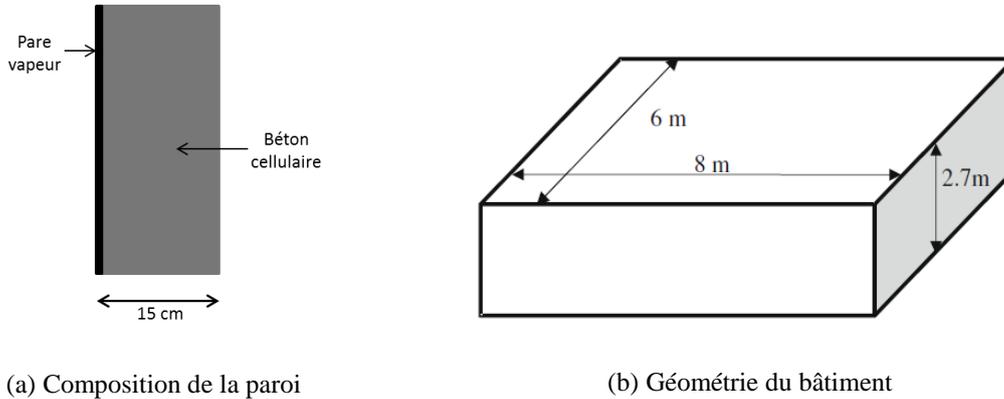
### IV.2.3 Validation de la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES

#### IV.2.3.1 Validation analytique

Dans cette partie, le degré de précision de la solution proposée par l'outil de co-simulation HAM-BES développé est vérifié. La validation est établie en comparant la résolution numérique du modèle à une solution analytique exacte pour un cas d'étude simple sous des conditions bien précises.

Le cas d'étude a été réalisé dans le cadre du projet de IEA/Annexe 41 (Peuhkuri and Carsten, 2004). Dans cet exercice l'humidité relative à l'intérieur d'un bâtiment simplifié a été calculée pour un régime quasi-stationnaire. La géométrie du bâtiment choisi, présente un caisson fermé ayant un volume de  $129.6 \text{ m}^3$  ( $6 \times 8 \times 2.7 \text{ m}^3$ ). L'enveloppe du bâtiment (murs, plancher et

toiture) est composée d'un mur monocouche de 15cm de béton cellulaire. La totalité de la surface extérieure de l'enveloppe est couverte par un pare vapeur afin de limiter le transfert hydrique vers l'extérieur. La Figure IV.4 représente le bâtiment étudié. Les propriétés hydrique et thermique du béton cellulaire sont résumées dans le Tableau IV.1. Cette validation est réalisée pour de configurations : Cas 0A, où un pare vapeur est appliqué à la surface intérieure de l'enveloppe et le cas 0B sans le pare vapeur.

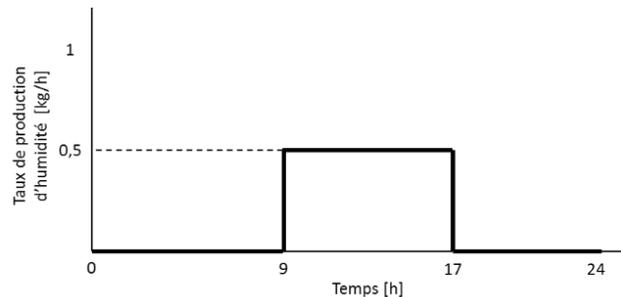


**Figure IV.4:** Schéma du bâtiment étudié

**Tableau IV.1 :** Propriétés hygrothermiques du béton cellulaire

Isotherme de sorption	$\omega = 42.965\varphi$
Conductivité thermique	$\lambda = 1.5 [W/m.K]$
Masse volumique sèche	$\rho = 650 [kg/m^3]$
Perméabilité à la vapeur d'eau	$K_v = 3.0 \times 10^{-11} [kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$
Coefficient d'échange convectif massique	$h_m = 2.0 \times 10^{-8} [kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)]$

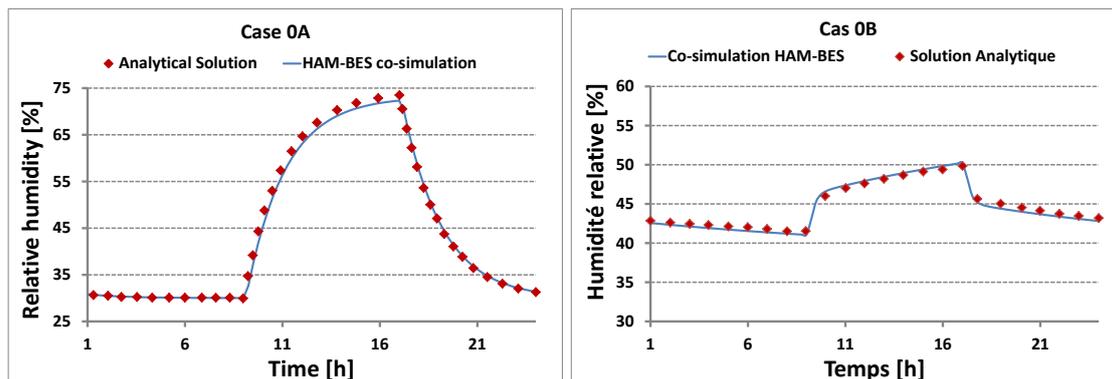
La vérification analytique de l'outil de co-simulation développé consiste à réaliser une simulation numérique en considérant les mêmes conditions initiales et aux limites. Il s'agit de conditions isothermes avec l'absence d'échanges radiatifs. La température et l'humidité relative extérieures sont constantes, ils sont, respectivement, de 20°C et 30%. La température de l'ambiance intérieure est fixée à 20°C. Un apport d'humidité quotidien de l'ordre de 0.5 kg/h entre 09 et 17h (Figure IV.5) et un échange d'air avec un débit de ventilation constant de 0.5 ACH sont considérés. Les conditions initiales aux niveaux de l'enveloppe et l'ambiance intérieure sont, respectivement, de 20°C et 30%.



**Figure IV.5:** Apport d'humidité par jour

Sous cette configuration d'étude caractérisée d'une part par des conditions aux limites fixes et d'autre part par des propriétés hygrothermiques constantes, le modèle mathématique (système d'équations aux dérivées partielles linéaires) a été résolu analytiquement moyennant l'utilisation des transformées de Laplace et des fonctions de transformations (Abahri et al., 2011).

La Figure IV.6 montre la comparaison entre la solution analytique et la résolution numérique obtenue par la co-simulation HAM-BES développée dans ce travail. Le régime quasi-stationnaire est atteint après 500 heures avec un pas de temps de 15 min.



**Figure IV.6** : comparaison entre la solution analytique et la résolution numérique pour un régime quasi-stationnaire

Cette figure montre que la solution numérique issue de la co-simulation TRNSYS-COMSOL concorde bien avec la solution analytique proposée par (Bednar and Hagetoft, 2005). Pour le cas 0A, on remarque que l'humidité relative de l'ambiance intérieure augmente de 41.1% à 49.8% durant la période de génération d'humidité (9h à 17h) et diminue par la suite à cause l'échange d'air imposé et l'absence d'apport hydrique au niveau de l'ambiance (17h à 24h). L'écart moyen entre la solution analytique et numérique est de 0.64% pour le cas 0A et de 0.42% dans le cas 0B.

#### IV.2.3.2 Comparaison entre le modèle hygrothermique couplé TRNSYS-COMSOL et les modèles hydriques simplifiés de TRNSYS

Après la vérification du degré de précision de la résolution numérique proposée par le modèle hygrothermique couplé TRNSYS-COMSOL, une comparaison du comportement de ce dernier par rapport aux modèles hygrothermiques standard simplifiés de TRNSYS a été réalisée. La comparaison a été faite plus particulièrement pour le modèle de transfert hydrique.

TRNSYS comporte deux modèles hydriques simplifiés pour traiter les échanges hydriques entre l'ambiance intérieure et l'enveloppe dans un bâtiment (Solar Energy Laboratory et al., 2010a). Dans le premier modèle **ECH** (Effective Capacitance Humidity Model) l'effet tampon de l'adsorption et de désorption des matériaux constituant l'enveloppe peut être considérée par une capacité hydrique efficace qui est définie comme le produit de masse d'air

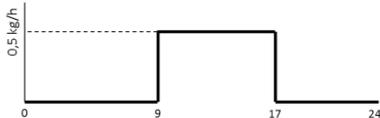
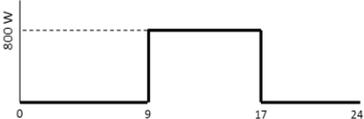
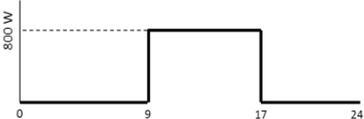
et un ratio d'une capacité d'humidité. Dans ce modèle les conditions de température et d'humidité au niveau de la couche tampon surfacique de l'enveloppe sont identiques aux conditions hygrothermiques dans l'air ambiant.

Le deuxième modèle **BSH** (Buffer Storage Humidity Model) est un modèle de transfert hydrique plus détaillé. L'échange hydrique entre la paroi et l'ambiance intérieure est décrit par un modèle de stockage d'humidité au niveau de la paroi. Le stockage d'humidité dans la zone tampon se produit sur la surface et en profondeur de la paroi. L'inconvénient de ce modèle est qu'il considère une pression de vapeur constante au niveau de la zone tampon. De plus, l'effet du changement de phase sur le bilan thermique de la paroi n'est pas pris en compte ce qui découple entièrement les transferts thermique et hydrique.

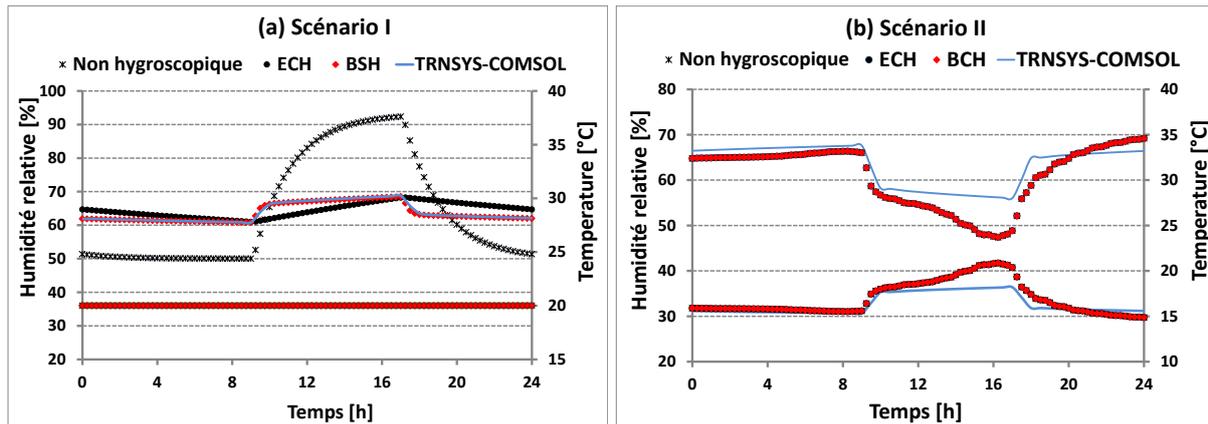
Afin de montrer l'intérêt du couplage HAM-BES réalisé par le biais de la co-simulation TRNSYS-COMSOL, une comparaison a été entreprise entre ce dernier et les modèles hygrothermiques standards de TRNSYS. C'est le cas d'étude réalisé dans le cadre du projet IEA/Annexe 41 qui a servi aussi à la validation analytique présentée ci-dessus qui a été simulé.

La géométrie du bâtiment et la composition de l'enveloppe sont détaillés dans le paragraphe précédent. Deux scénarios ont été supposés, le premier avec un gain d'humidité quotidien de 0.5kg/h entre 9 heures et 17 heures et avec un système de régulation thermique parfait. Dans le deuxième scénario, l'apport hydrique interne est nul et une source de chaleur de 800W est activée de 9h à 17h. Le Tableau IV.2 résume les scénarios étudiés. Les conditions extérieures en température et en humidité relative sont fixées à 20°C et 50% respectivement. Les conditions initiales au niveau de l'ambiance intérieure et l'enveloppe sont identiques aux conditions extérieures.

**Tableau IV.2:** Scénarios étudiés

Scénario	Gain hydrique	Gain thermique
<b>I</b>		Pas de source de chaleur 
<b>II</b>	Pas de gain d'humidité	

La Figure IV.7 compare les évolutions temporelles des températures et des hygrométries obtenues avec le modèle de co-simulation TRNSYS-COMSOL et avec les modèles hydriques standards de TRNSYS pour les deux scénarios étudiés.



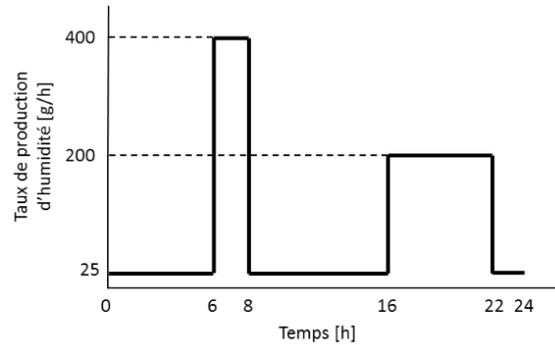
**Figure IV.7** : Comparaison de la réponse hygrothermique au niveau de l'ambiance intérieure pour le modèle TRNSYS-COMSOL et les modèles standards de TRNSYS : non hygroscopique, ECH et BSH

Dans la Figure IV.7-a, on peut constater que, dans un cas isotherme, le type de modèle de transfert hydrique a une grande influence sur la prédiction du comportement hygrothermique du bâtiment. On remarque que le non prise en compte de l'échange hydrique entre l'enveloppe et l'ambiance provoque une prédiction surestimée du comportement hydrique du bâtiment. Cette surestimation est traduite par l'écart de l'humidité relative au niveau de l'ambiance entre le modèle non hygroscopique et les autres modèles durant la période d'apport d'humidité (9h à 17h). La prédiction issue du modèle BSH concorde bien avec celle du modèle de la co-simulation TRNSYS-COMSOL. Cette similitude est due aux conditions isothermes qui excluent l'effet du transfert thermique lié au changement de phase dans le modèle de la co-simulation. En revanche, le modèle ECH évalue mal les variations d'humidité relative dans l'ambiance à cause des hypothèses très simplistes prises par ce modèle (humidité relative identique pour l'ambiance et pour le mur).

La différence entre le modèle couplé HAM-BES et les autres modèles est mieux illustrée par les résultats du deuxième scénario. Dans ce cas non isotherme, le modèle couplé affecte directement la réponse hydrique de l'ambiance contrairement aux autres modèles qui donnent une réponse hygrothermique identique (Figure IV.7). Pour ce scénario, la co-simulation TRNSYS-COMSOL produit un effet direct sur l'humidité relative qui diminue suite à la hausse de température induite par la source de chaleur imposée. Ce comportement est dû à la hausse de la pression de vapeur dans l'ambiance qui crée une différence de pression de vapeur entre l'ambiance et la paroi. Cette différence de pression de vapeur d'eau provoque l'absorption de l'humidité par la paroi. L'effet inverse se produit dans la période où le gain thermique est suspendu. Dans cette période une désorption se produit au niveau de la paroi. Dans ce deuxième scénario, l'intérêt de la co-simulation TRNSYS-COMSOL est mis en avant par le comportement hygrothermique différent lié au couplage des transferts thermique et hydrique au niveau de l'enveloppe du bâtiment.

### IV.2.3.3 Confrontation à des données expérimentales

Dans le but de vérifier le bon fonctionnement de la co-simulation HAM-BES dans une configuration plus réaliste, une validation expérimentale a été entreprise en confrontant le modèle couplé HAM-BES à des données expérimentales extraites des résultats des tests publiés par l'agence internationale de l'énergie IEA dans le cadre de l'annexe 41.



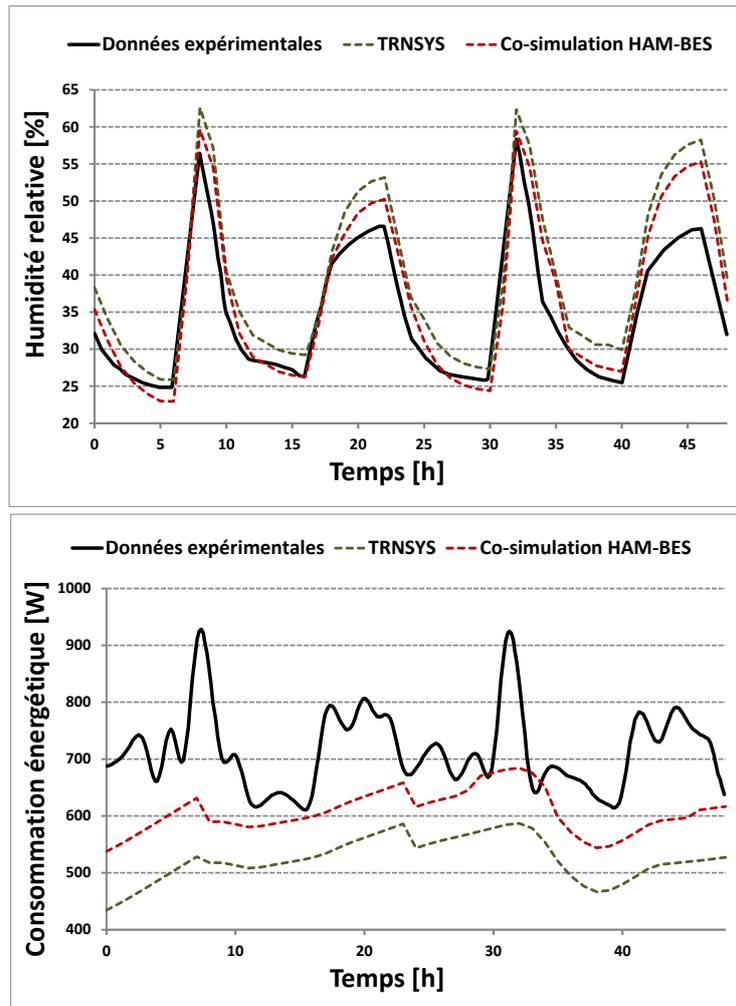
**Figure IV.8** : Scénario de production d'humidité

Dans cette validation le test expérimentale (Benchmark) CE3 de l'annexe 41 est considéré. Ce test a été réalisé par l'institut Fraunhofer de physique du bâtiment en Allemagne (Kristin, 2006). Le test a été réalisé sur une chambre d'un volume de  $50 \text{ m}^3$  et d'une surface de mur de  $67 \text{ m}^2$  (sans plancher, porte et fenêtre). La paroi est constituée de 240 mm de brique avec une isolation extérieure de 70 mm de polystyrène et un enduit intérieur en plâtre de 12mm. Le Tableau IV.3 résume les principales propriétés hygrothermiques des matériaux constituant la paroi. Une fenêtre à double vitrage de dimensions égales à  $1.41 \times 1.94 \text{ m}^2$  a été incluse dans la paroi sud. La chambre est équipée d'un système de régulation thermique, d'une ventilation ainsi que d'un générateur d'humidité. Ce test a été réalisé avec une ventilation d'un taux d'échange d'air constant de  $0.6 \text{ h}^{-1}$ . Pour simuler une production d'humidité par trois personnes dans la chambre, un scénario d'apport d'humidité a été imposé avec une production moyenne de  $25 \text{ g h}^{-1}$ . Des pics de  $400 \text{ g h}^{-1}$  entre 6 h et 8 h et de  $200 \text{ g h}^{-1}$  entre 16 h et 22 h ont été considérés, Figure IV.8. L'ensemble des détails concernant l'expérience réalisée sont mentionnés dans le rapport final de l'annexe 41 (Woloszyn and Rode, 2007).

**Tableau IV.3:** Propriétés des matériaux constituant la paroi

Matériau	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosité [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m.K)]	$C_p$ [J/(kg.K)]	$k_m$ [kg/(m.s.Pa)]
Brique	1650	0.4	0.6	850	$1.31 \times 10^{-11}$
Polystyrène	30	0.95	0.04	1500	$9.05 \times 10^{-11}$
Plâtre	1721	0.31	0.2	850	$2.55 \times 10^{-12}$

Dans le but d'illustrer l'impact de la prise en compte du transfert hygrothermique à travers la paroi dans la prédiction du comportement hygrothermique intérieur du bâtiment, des simulations ont été effectuées. Il s'est agi, en plus de la simulation utilisant la plateforme de co-simulation HAM-BES (modèle HAM en 1D), d'une autre utilisant TRNSYS seul.



**Figure IV.9:** Comparaison entre la simulation numérique et consommation énergétique (données expérimentales du 17 au 19 février 2005)

La Figure IV.9 montre la comparaison entre les données expérimentales et la simulation numérique pour la période de 17 au 19 février 2005.

En se focalisant sur l'humidité relative intérieure, les résultats montrent une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et la prédiction numérique obtenue par le modèle couplé HAM-BES. La comparaison entre les deux cas de simulations (TRNSYS seul et la plateforme de co-simulation HAM-BES) avec les données expérimentales met en évidence une nette amélioration en termes de prédiction du comportement thermohydrigue du bâtiment lorsque les transferts hygrothermique à l'échelle des parois sont considérés. En effet, l'écart moyen par rapport aux données expérimentales est de 4.8% pour le modèle de TRNSYS seul et de 3.7% pour la plateforme de co-simulation HAM-BES.

Concernant les besoins énergétiques, les deux cas de simulation montrent une différence relativement importante par rapport aux données expérimentales. En effet les deux modèles n'arrivent pas à reproduire la hausse des consommations énergétiques lors des pics de

production d'humidité au niveau de l'ambiance. Cette observation a été déjà enregistrée lors de l'étude réalisée dans le cadre de l'annexe 41 (M. Woloszyn and C. Rode, 2007). Ce comportement peut être expliqué par la limite du modèle thermique de TRNSYS où les bilans énergétique et hydrique dans une zone sont calculés de façon découplée. Cependant, en comparant les résolutions numériques proposées par les deux cas de simulations, l'erreur est relativement plus grande pour le cas de TRNSYS avec un écart de 190 W (max 383 W), en revanche pour le cas de la co-simulation HAM-BES l'écart est de 108 W (max. 280 W).

### IV.3 Validation expérimentale de la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES

Dans le but de compléter la démarche entreprise relative aux effets des transferts hygrothermiques sur la performance énergétique des bâtiments et sur le confort des occupants, un banc expérimental a été conçu au laboratoire dans le but de valider expérimentalement la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES.

Dans la littérature, les travaux expérimentaux concernant le comportement hygrothermique des parois de bâtiment ont été réalisés à l'échelle du matériau. Généralement, ces derniers sont basés sur une approche classique qui permet juste d'avoir une caractérisation hygrothermique sur des échantillons relativement petits, ce qui ne reflète pas forcément le comportement réel d'une paroi (problème de représentativité des échantillons).

Sur des échelles plus grandes, il existe d'autres types d'expérimentations qui consistent à introduire des parois dans des cellules expérimentales à la grandeur du bâtiment. Cette démarche permet d'avoir des informations plus complètes et plus représentatives de la paroi étudiée. Néanmoins, plusieurs contraintes sont rencontrées dans ce type d'expérimentation, notamment en termes de mise en œuvre et de coût d'installation. De plus, le contrôle des conditions aux limites (ambiances intérieures et extérieures) n'est pas toujours assez précis, particulièrement quand le dispositif subit des sollicitations extérieures.

Entre les deux échelles, matériau et bâtiment, une caractérisation hygrothermique expérimentale d'une paroi peut être réalisée à une échelle intermédiaire. Cette démarche permet d'une part, d'avoir des résultats représentatifs d'une paroi de bâtiment, d'autre part une meilleure maîtrise des conditions aux limites qui facilite les procédures de validation expérimentale des outils numériques développés.

Dans cette partie un dispositif expérimental est mis en place dont les principaux objectifs sont les suivants :

- Valider expérimentalement la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES développée.
- Etudier le comportement hygrothermique de différents types de parois de bâtiments sous différentes sollicitations en termes de température et d'humidité relative.

- Etudier l'effet des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité sur la réponse hygrothermique des ambiances intérieures.

Le principe du banc expérimental consiste à placer une paroi entre deux compartiments bien contrôlés en termes de température et d'humidité relative. Par conséquent, le dispositif expérimental devra répondre aux exigences suivantes :

- Le contrôle hygrothermique des ambiances des deux compartiments afin de pouvoir simuler les différents types de sollicitations envisagées.
- Le suivi des profils de températures et d'humidité relative au cours du temps à différentes profondeurs de la paroi.
- La mesure des températures et des humidités relatives au niveau des deux compartiments pour avoir une meilleure évaluation des conditions aux limites.

### IV.3.1 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué de deux compartiments hygrothermiquement contrôlés. Chaque compartiment est de forme cubique de  $1 \text{ m}^3$  de volume. Il a été fabriqué d'une enveloppe en contreplaqué de 1.5 cm d'épaisseur et une isolation intérieure de 3 cm de polystyrène extrudé. La surface intérieure de l'enveloppe a été recouverte d'une tôle métallique afin d'éliminer tout échange hydrique avec l'ambiance intérieure (Figure IV.10).



**Figure IV.10:** Composition de l'enveloppe des deux caissons

La régulation de la température dans les deux caissons est assurée par des échangeurs de chaleurs en cuivre fixés aux plafonds de chaque compartiment (Figure IV.11). Chaque échangeur de chaleur est alimenté en eau par un cryostat (Figure IV.11). Les cryostats utilisés sont équipés de sondes PT100 qui permet une régulation de la température en aval (au niveau des ambiances des deux compartiments).



**Figure IV.11:** Système de régulation thermique : échangeur de chaleur (à gauche) et cryostat « Huber » (à droite)

L'hygrométrie dans les ambiances est contrôlée par le biais d'un générateur d'humidité *Michell* HG-10 (Figure IV.12). Le principe de l'appareil consiste à mélanger de l'air sec avec de l'air saturée d'eau avec un ratio volumétrique bien défini afin d'avoir l'humidité relative voulue. Par la suite, l'air humidifié est injecté dans l'ambiance à contrôlée à travers une conduite hermétique. Comme pour les cryostats, le générateur d'humidité est équipé d'un capteur d'humidité relative ce qui permet un contrôle hygrométrique en aval (au niveau de l'ambiance du caisson). La régulation de l'humidité relative est assurée que dans une des deux ambiances.



**Figure IV.12:** Contrôle hygrométrique : Michell Humidity Generator10

La paroi testée est positionnée entre les deux caissons, une vue d'ensemble du dispositif expérimental développé est illustrée dans la Figure IV.13



**Figure IV.13:** Banc expérimental développé

Afin de suivre les évolutions de la température et de l'humidité relative tout au long de la paroi ainsi qu'au niveau des deux compartiments, des capteurs hygrothermiques de type *Sensirion SHT75* ont été utilisés. Les caractéristiques de ce type de capteurs sont résumées dans le tableau II.4 (chapitre2). L'acquisition des données est assurée par deux centrales d'acquisition de type *Sensirion* pilotées par un logiciel qui permet de suivre la variation hygrothermique en temps réel. Les capteurs et les centrales d'acquisition utilisées sont représentés dans la Figure IV.14.

Les capteurs ont été placés à différentes positions dans les deux compartiments et dans la paroi testée. En effet, trois capteurs hygrothermiques ont été positionnés au niveau des deux ambiances afin de vérifier les conditions aux limites imposées. D'autres capteurs ont été implémentés dans la paroi testée au niveau des deux surfaces (extrémités) ainsi qu'à différentes épaisseurs de la paroi. La Figure IV.15 montre le positionnement des capteurs hygrothermiques au niveau des ambiances et dans la paroi.



**Figure IV.14:** Centrale d'acquisition Sensirion (à gauche)  
Capteur hygrothermique Sensirion SHT75 (à droite)



**Figure IV.15:** Positionnement des capteurs hygrothermiques dans le dispositif expérimental

### IV.3.2 Essais réalisés

Dans le but de valider expérimentalement la plateforme de co-simulation HAM-BES développée dans ce travail, deux cas d'étude sont réalisés, un est sous des sollicitations isotherme et le deuxième non isotherme. Dans les deux cas la température est contrôlée dans les deux compartiments, en revanche l'humidité relative est imposée que dans un des deux caissons, l'humidité relative dans le deuxième caisson est laissée libre. Cette configuration permet de voir l'effet des transferts couplés de chaleur et d'humidité sur le comportement hygrothermique de l'ambiance et plus particulièrement le comportement hydrique. Les sollicitations hygrothermiques imposées dans les deux cas d'étude sont résumées dans le Tableau IV.4. Dans cette campagne expérimentale une paroi monocouche de bois aggloméré d'une épaisseur de 6.6 cm est testée. Les propriétés thermiques et hydriques sont mesurées et présentées dans le chapitre 3.

**Tableau IV.4:** Sollicitations imposées dans les cas isotherme et non isotherme

Essai	Compartiment I		Compartiment II	
	T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)
Isotherme	24±1	85±3	24±1	Libre
Non Isotherme	16±1	80±3	24±1	Libre

#### IV.3.2.1 Essai préliminaire: détermination des coefficients d'échange convectif

Pour mieux reproduire numériquement les cas d'étude expérimentaux réalisés, une modélisation précise des conditions aux limites s'est avérée importante. Pour cela, les coefficients d'échanges thermiques à la surface de la paroi ont été déterminés expérimentalement.

L'essai consiste à imposer un gradient de température statique de part est d'autre d'une paroi de résistance thermique connue tout en gardant les mêmes humidités relatives dans les deux ambiances. La Figure IV.16 résume les conditions aux limites appliquées lors de cet essai.

En effet, dans les conditions expérimentales appliquées, le transfert thermique s'opère par conduction au niveau de la paroi et par convection et rayonnement entre la surface de la paroi et l'ambiance du caisson. La densité de flux massique surfacique totale est exprimée comme suit :

$$j_q = \frac{\Delta T}{R_T} \quad \text{avec} \quad R_T = \frac{1}{h_{c1}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{c2}} \quad (\text{IV.2})$$

Où :

$j_q [J/(m^2 \cdot s)]$  : La densité de flux de chaleur,

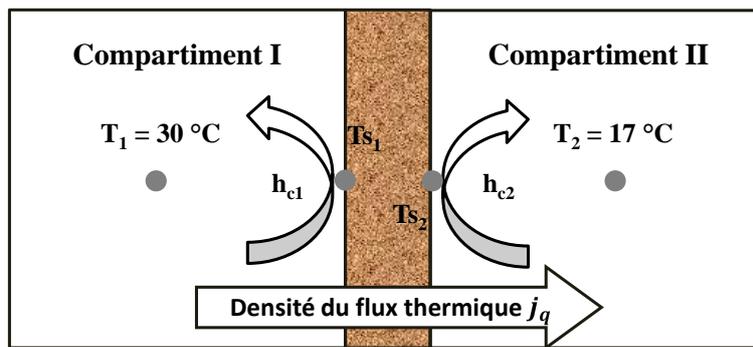
$\Delta T [^{\circ}C]$  : Gradient de température,

$R_T [m^2 \cdot K/W]$  : Résistance thermique totale,

$h_{c1}, h_{c2} [W/m^2 \cdot K]$  : Coefficients d'échange convectif thermique,

$e [m]$  : Epaisseur de la paroi testée,

$\lambda [W/m \cdot K]$  : Conductivité thermique.

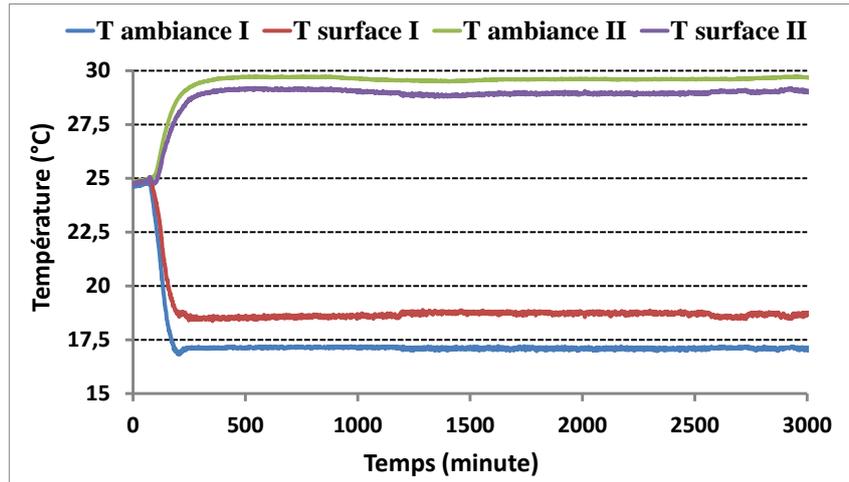


**Figure IV.16:** Principe de détermination des coefficients d'échange convectif

Pour déterminer les coefficients d'échange convectif  $h_{c1}$  et  $h_{c2}$ , la paroi testée est exposée aux conditions aux limites présentées dans la Figure IV.16 jusqu'à atteindre un régime stationnaire. En effet, dans un régime permanent et avec l'hypothèse de paroi plane sans dissipation de chaleur, la densité de flux de chaleur est constante tout au long de la paroi ainsi qu'au niveau de l'interface ambiance/paroi. Dans ces conditions, la densité de flux de chaleur peut s'exprimer comme suit :

$$j_q = \frac{\lambda}{e} (T_{s1} - T_{s2}) = h_{c1} (T_1 - T_{s1}) = h_{c2} (T_{s2} - T_2) \quad (\text{IV.3})$$

Avec  $T_1$  et  $T_2 [^{\circ}C]$  représentent respectivement les températures dans les deux compartiments,  $T_{s1}$  et  $T_{s2} [^{\circ}C]$  représentent respectivement les températures aux deux surfaces de la paroi.



**Figure IV.17:** Evolutions des températures dans les deux compartiments et aux surfaces de la paroi

Pour déduire la densité de flux de chaleur ainsi que les coefficients d'échange convectif, l'évolution de la température des deux ambiances et au niveau des surfaces de la paroi est mesurée jusqu'à atteindre le régime stationnaire.

Les résultats sont présentés dans la Figure IV.17. Des températures moyennes de 29.5°C et 17.1°C sont respectivement enregistrées au niveau des deux compartiments I et II. Les températures surfaciques  $T_{s1}$  et  $T_{s2}$  sont de 28.86°C et 18.68°C respectivement.

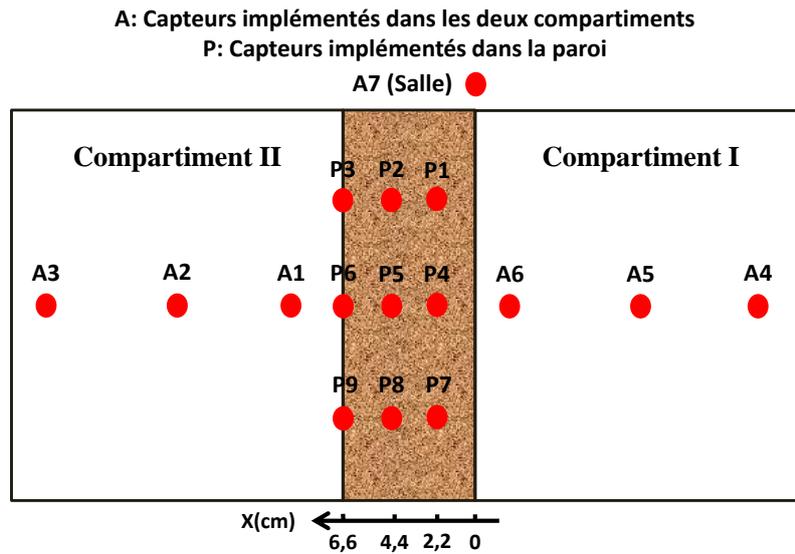
La densité de flux massique est déterminée par le calcul du flux par conduction. Sa valeur moyenne en régime stationnaire est de  $15.7 [J/(m^2 \cdot s)]$ . Par la suite, les coefficients d'échange convectif thermique sont déduits. En utilisant l'analogie d'Illig (Illig, 1952), les coefficients d'échange convectif massique  $h_{m1}$  et  $h_{m2} [kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)]$  sont calculés. Les résultats sont résumés dans le Tableau IV.5.

**Tableau IV.5:** Coefficients d'échange convectif calculés

Compartiment I		Compartiment II	
$h_{c1} [W/m^2 \cdot K]$	$h_{m1} [kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)]$	$h_{c2} [W/m^2 \cdot K]$	$h_{m2} [kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)]$
24.40	$1.71 \times 10^{-7}$	9.71	$0.68 \times 10^{-7}$

#### IV.3.2.2 Résultats expérimentaux et comparaison avec la simulation numérique

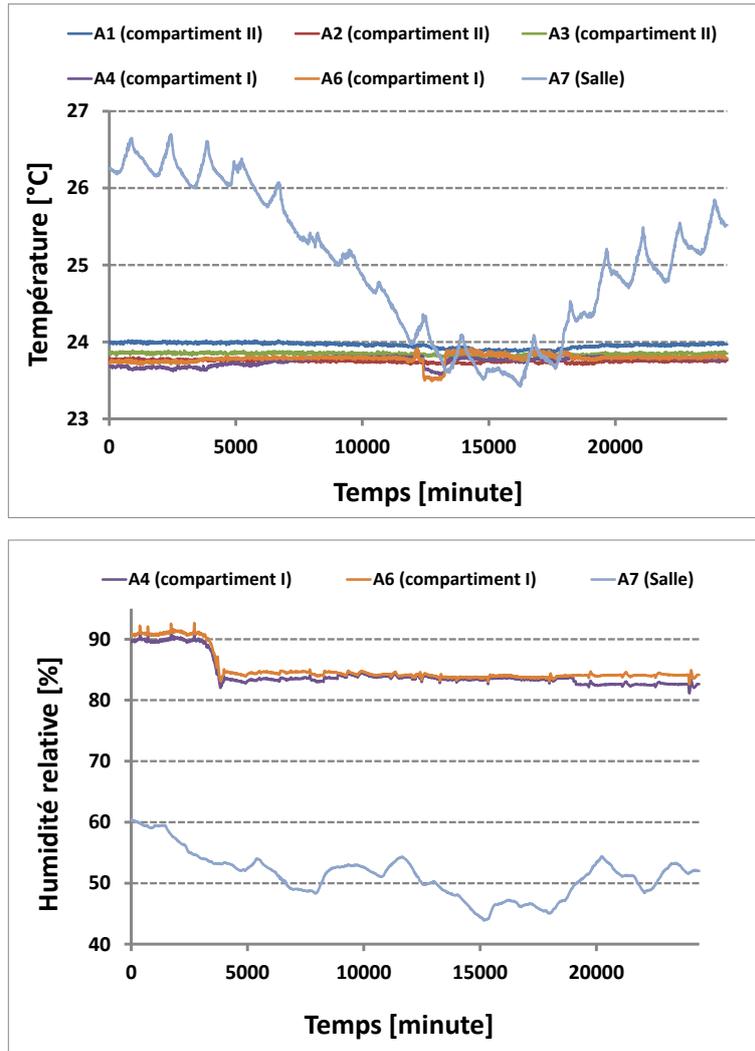
Pour une meilleure compréhension des résultats expérimentaux présentés ci-dessous, le positionnement des points de mesure au niveau du dispositif (la paroi testée et les deux compartiments I et II) est illustré dans la Figure IV.18. Il est à noter qu'au cours de l'expérience le capteur 5, implémenté au niveau du compartiment I, ne fonctionnait pas.



**Figure IV.18:** Positionnement des capteurs au niveau du dispositif expérimental (la paroi testée et les deux compartiments I et II)

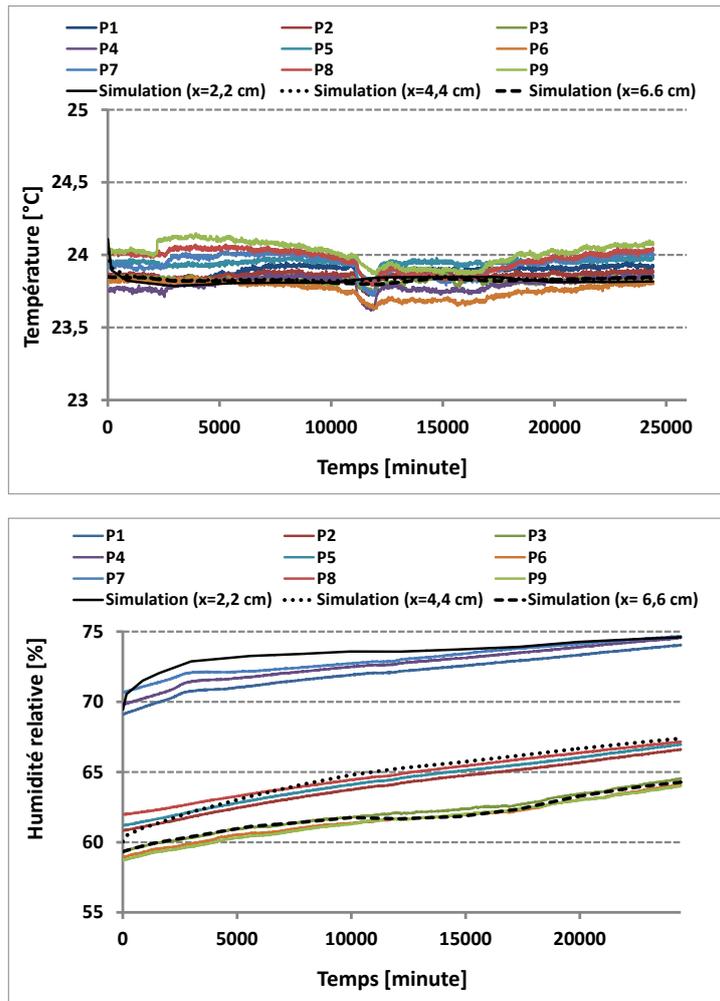
#### IV.3.2.2.1 Conditions Isothermes

Lors de cet essai, la température a été maintenue constante dans les deux compartiments I et II. En revanche l'humidité relative a été contrôlée que dans le compartiment I et laissée en évolution libre dans le compartiment II. L'essai a duré 17 jours, les conditions hygrométriques expérimentales contrôlées dans les deux compartiments sont représentées dans la Figure IV.19. Ces données hygrométriques sont utilisées comme des conditions aux limites pour la validation expérimentale.

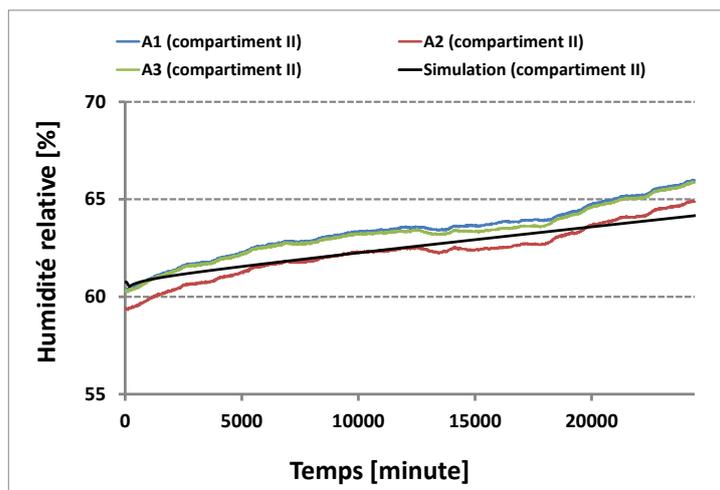


**Figure IV.19:** Conditions hygrothermiques expérimentales contrôlées dans les deux ambiances I et II dans le cas isotherme

La comparaison entre les données expérimentales obtenues et la solution numérique issue de la plateforme de co-simulation développée dans ce travail est présentée dans la Figure IV.20 et Figure IV.21. Les évolutions de la température et l'humidité relative au cours de la durée de l'essai sont représentées.



**Figure IV.20:** Comparaison entre la simulation numérique et les données expérimentales au niveau de la paroi étudiée pour des conditions isothermes



**Figure IV.21:** Comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre la simulation numérique et les données expérimentales au niveau du compartiment II pour des conditions isothermes

Concernant le comportement thermique de la paroi, le suivi de l'évolution de la température à l'intérieur de la paroi a permis de confirmer que l'essai a été réalisé dans des conditions isothermes. Quand l'état d'équilibre est atteint au niveau des deux ambiances, la température enregistrée est la même au niveau de tous les points de mesures implantés sur différentes épaisseurs de la paroi étudiée (voir Figure IV.20). Lors de la validation numérique, en imposant des conditions isothermes de part et d'autre de la paroi, la température d'équilibre est retrouvée et correspond à celle obtenue expérimentalement (voir Figure IV.20).

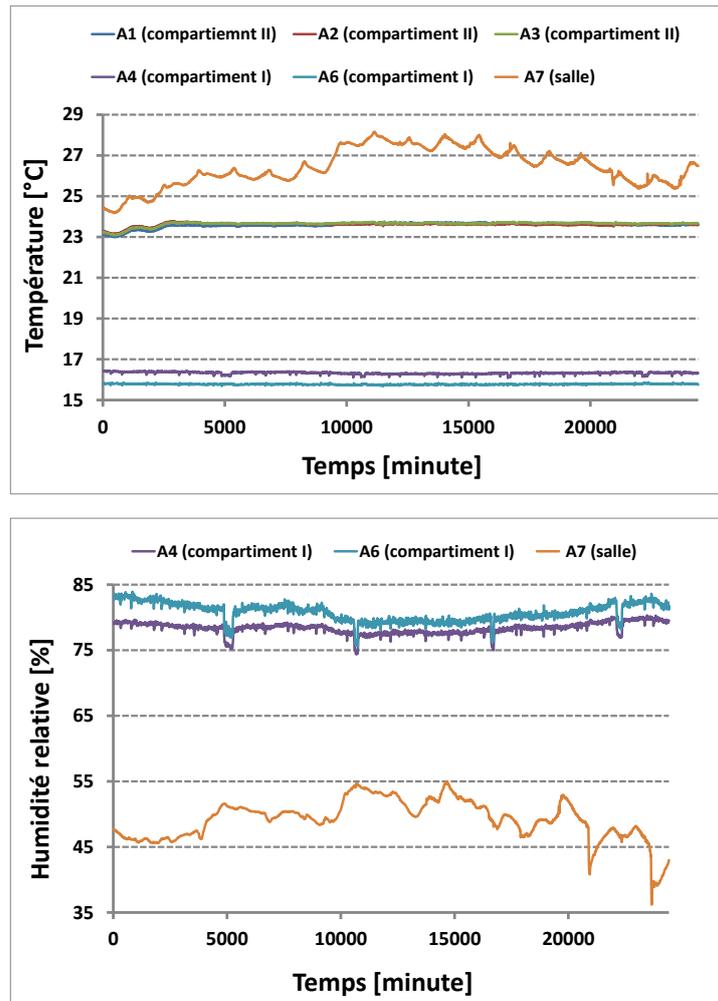
Pour le transfert hydrique, le suivi de l'évolution de l'humidité relative au niveau de la paroi montre une hausse progressive de l'humidité relative au cours du temps dans la paroi. En effet, en fixant la température à 24°C dans les deux compartiments I et II et une humidité relative élevée (85%) dans le compartiment I, un gradient de pression de vapeur d'eau est imposé de part et d'autre de la paroi étudiée (au début de l'essai la pression de vapeur d'eau au niveau des deux compartiments I et II est respectivement de 2440 Pa et 1519 Pa). Ces conditions hygrothermiques engendrent un transfert hydrique au niveau de la paroi (du compartiment I vers le compartiment II) et par conséquent une hausse progressive de l'humidité relative dans la paroi.

La comparaison entre les données expérimentales enregistrées et la solution numérique proposée par la plateforme de co-simulation HAM-BES développée dans travail montre une bonne concordance. Les écarts moyens de l'humidité relative à différentes épaisseurs de la paroi durant l'essai sont de 1.4% (maximum 2.2%) à 2.2 cm du compartiment I, 1% (maximum 1.3%) à 4.4 cm du compartiment I et 0.7% (maximum 1.1%) à la surface de la paroi en contact avec le compartiment II.

Au niveau du compartiment II, où l'humidité relative n'est pas contrôlée, une augmentation progressive de l'humidité relative au niveau de l'ambiance est enregistrée, Figure IV.21. Cela est dû au gradient de pression de vapeur d'eau entre le compartiment I et II. La simulation numérique réalisée reproduit avec une bonne précision le comportement hydrique observé au niveau du compartiment II. L'écart moyen entre l'expérience et la simulation numérique est de 1.8% (maximum 2.5%).

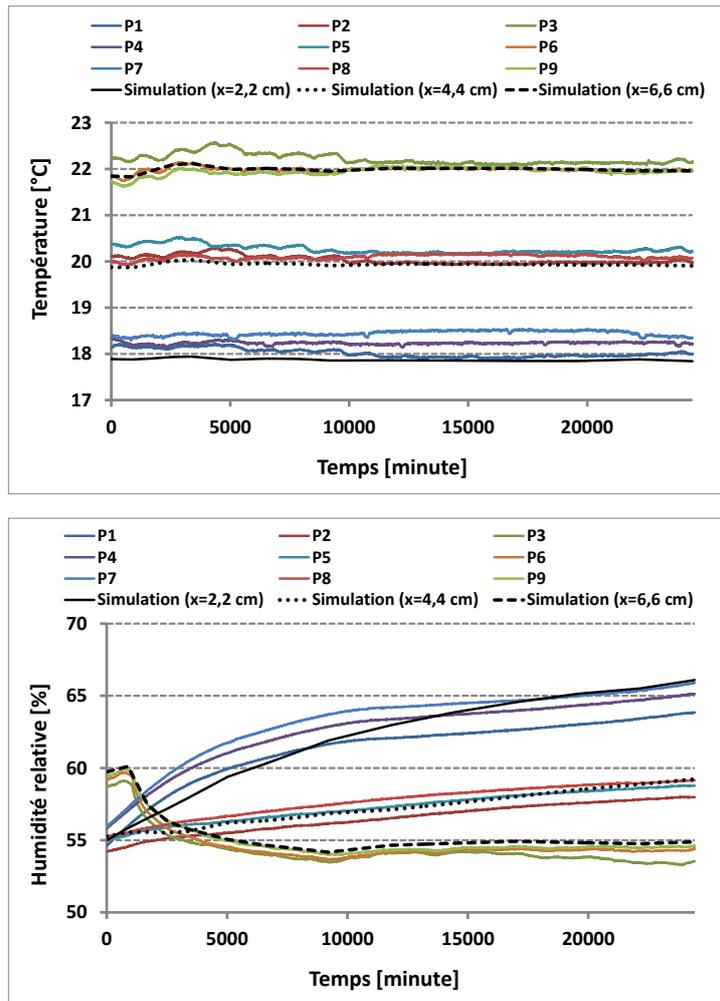
#### *IV.3.2.2.2 Conditions Non-Isotherme*

Un autre essai a été réalisé dans des conditions non isothermes. Les conditions hygrométriques expérimentales imposées dans les deux compartiments sont représentées dans la Figure IV.22.

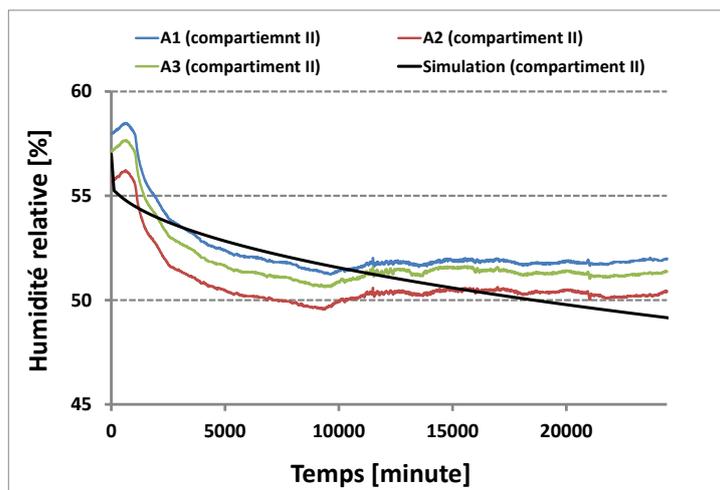


**Figure IV.22:** Conditions hygrothermiques expérimentales contrôlées dans les deux ambiances I et II dans le cas isotherme

La comparaison entre les données expérimentales obtenues et la solution numérique issue de la plateforme de co-simulation HAM-BES développée dans ce travail est présentée dans la Figure IV.23 et FigureIV.24. Les évolutions de la température et l’humidité relative au cours de la durée de l’essai sont représentées au niveau de la paroi ainsi que dans le compartiment II.



**Figure IV.23:** Comparaison entre la simulation numérique et les données expérimentales au niveau de la paroi étudiée pour des conditions non-isothermes



**Figure IV.24 :** Comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre la simulation numérique et les données expérimentales au niveau du compartiment II pour des conditions non-isothermes

Dans le cas non-isotherme, un gradient de température est imposé de part et d'autre de la paroi (16°C pour le compartiment I et 24°C pour le compartiment II). Quand le régime stationnaire est atteint, le profil de température obtenu au niveau de la paroi montre une hausse progressive de la température avec l'épaisseur de la paroi en allant du compartiment I où la température est la plus basse (16°C). En effet, la température à 2.2cm est de 18°C, de 20°C à 4.4 cm et de 22°C à la surface avec le compartiment II. Ce profil est observé sur les trois points où le profil de température dans la paroi est suivi.

La résolution numérique proposée par la plateforme de co-simulation HAM-BES corrobore fortement avec les données expérimentales enregistrées. L'écart atteint respectivement 0.2°C (maximum 0.4°C), 0.35°C (maximum 0.6°C) et 0.25°C (maximum 0.7°C) à 2.2 cm, 4.4 cm et 6.6 cm du compartiment I.

Concernant le transfert hydrique, le profil de l'humidité observé au niveau de la paroi (Figure IV.23) est influencé par le gradient d'humidité relative imposé de part et d'autre de la paroi avec une humidité relative élevée dans le compartiment I (85%) et une humidité relative dans le compartiment II de 60% au début de l'essai. Sous ces conditions hygrothermiques, l'humidité relative baisse progressivement avec l'épaisseur, en allant du compartiment I.

La confrontation entre les résultats expérimentaux et numériques montre que la solution numérique proposée par la plateforme de co-simulation HAM-BES concorde avec les données expérimentales enregistrées. Les écarts sont de : 2% (maximum 3%) à 2.2 cm d'épaisseur de la paroi, en allant du compartiment I, 1.3% (maximum 2.4%) à 4.4 cm et 1.2% (maximum 1.9%) à la surface en contact avec le compartiment II.

Au niveau du compartiment II, une légère baisse de l'humidité relative est observée par rapport à l'état initial (de 58% à 52%). Par la suite, l'humidité relative reste constante à 52%. Ce comportement où une petite variation de l'humidité relative est observée, peut être expliqué par les conditions hygrothermiques imposées de part et d'autre de la paroi. En effet sous ces conditions un gradient de pression de vapeur d'eau dans le sens inverse du gradient de température est imposé (initialement : 1456 Pa dans le compartiment I et 1545 Pa dans le compartiment II). Cela engendre un transfert hydrique du compartiment II vers le compartiment I, ce qui mène à une baisse de la pression de vapeur d'eau dans le compartiment II et par conséquent une baisse d'humidité relative. Après trois jours d'essai, l'humidité relative atteint 52% puis elle reste constante jusqu'à la fin de l'essai. Ce comportement est observé car l'équilibre hydrique au niveau de la paroi est atteint.

Comme dans le cas isotherme, une bonne concordance est obtenue entre les résultats numériques et expérimentaux, l'écart moyen atteint 1.56% avec un maximum de 2.65%.

Ainsi, la réalisation de cette validation expérimentale, à une échelle intermédiaire (1m<sup>2</sup> de paroi) a permis de vérifier la précision de la solution proposée par la plateforme de co-simulation HAM-BES, particulièrement au niveau de l'enveloppe. En effet, une bonne

concordance entre les résultats numériques et expérimentaux au niveau de l'enveloppe permet de vérifier le bon comportement du modèle HAM dans la plateforme de co-simulation HAM-BES et ainsi valider le type de couplage réalisé entre les deux modèles HAM et BES.

## IV.4 Effet de l'interaction dynamique enveloppe-ambiance sur le comportement hygrothermique et énergétique des bâtiments

Le but de cette étude est d'analyser l'impact de la prise en compte de la modélisation, à l'échelle de la paroi constituant l'enveloppe, des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité sur comportement hygrothermique des ambiances habitables ainsi que sur les consommations énergétiques des bâtiments. Il a été également question d'étudier l'effet de l'interaction dynamique HAM-BES sur l'évolution des transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe.

### IV.4.1 Présentation du cas d'étude

Après les différentes validations entreprises afin de vérifier le bon fonctionnement de la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES développée, un cas d'étude a été réalisé. Le but étant d'analyser l'effet de la modélisation en 1D et 2D des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à travers l'enveloppe sur le comportement hygrothermique global du bâtiment (enveloppe du bâtiment et son ambiance habitable) ainsi que sur la prédiction de ses consommations énergétiques. Pour cela, les caractéristiques du bâtiment expérimental (le test expérimental CE3 de l'annexe 41), utilisé pour la validation de la plateforme de co-simulation HAM-BES, ont été considérées lors du cas d'étude réalisé.

Pour mettre en évidence l'impact des conditions environnementales extérieures, le cas d'étude a été entrepris pour trois climats différents : le climat océanique tempéré de La Rochelle, un climat chaud et humide de Hong Kong et un climat froid et humide de Berlin. Dans cette étude, trois types de simulations dynamiques ont été considérés. Les détails des cas de simulations réalisés sont résumés dans le Tableau IV.6.

**Tableau IV.6:** Description des cas de simulation réalisés

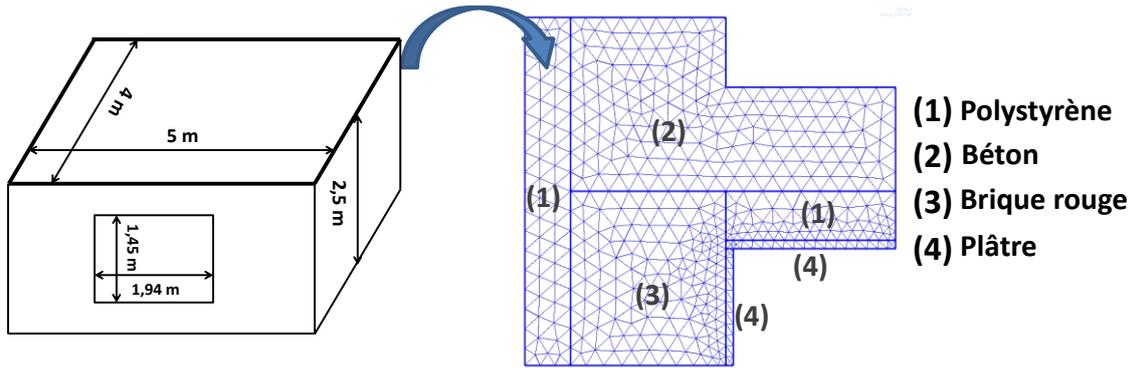
<b>Cas A La Rochelle (climat océanique)</b>	
Cas A.1	Modèle de simulation dynamique de bâtiment TRNSYS
Cas A.2	Modèle TRNSYS + 1D HAM pour l'enveloppe
Cas A.3	Modèle TRNSYS + 1D HAM (paroi courante) + 2D HAM (pont thermique)
<b>Cas B Hong Kong (climat chaud et humide)</b>	
Cas B.1	Modèle de simulation dynamique de bâtiment TRNSYS
Cas B.2	Modèle TRNSYS + 1D HAM pour l'enveloppe
Cas B.3	Modèle TRNSYS + 1D HAM (paroi courante) + 2D HAM (pont thermique)
<b>Cas C Berlin (climat froid et humide)</b>	
Cas C.1	Modèle de simulation dynamique de bâtiment TRNSYS
Cas C.2	Modèle TRNSYS + 1D HAM pour l'enveloppe
Cas C.3	Modèle TRNSYS + 1D HAM (paroi courante) + 2D HAM (pont thermique)

Le premier cas de simulation est le modèle de simulation dynamique de bâtiment proposé par TRNSYS avec un simple modèle de transfert thermique par conduction traduit par l'équation de fonction de transfert. Un terme de correction linéaire est pris en compte afin de considérer les transferts de chaleur au niveau des singularités (intersection du mur extérieur avec le plancher supérieur) caractérisés par la présence des ponts thermiques. Le coefficient de correction est déterminé selon la norme européenne EN-ISO 14683. Concernant le transfert hydrique dans l'enveloppe, le modèle ECH (Effective Capacitance Humidity Model) décrit précédemment a été considéré.

Pour le second cas de simulation, la conduction thermique dans l'enveloppe et le modèle hydrique ECH proposés par TRNSYS ont été substitués par le modèle 1D de transfert couplé de chaleur, d'air et d'humidité, détaillé dans le chapitre II. Dans ce cas, les principaux phénomènes de transferts hygrothermiques ont été considérés : sources de chaleur et d'humidité à l'intérieur du bâtiment, les flux thermiques et hydriques traversant l'enveloppe, le phénomène d'adsorption et de désorption d'eau.

Dans le troisième cas de simulation, en plus du modèle de transfert hygrothermique en 1D pour la paroi courante, l'effet du transfert multidirectionnel a été considéré en modélisant les transferts hygrothermiques en 2D avec une granularité fine (Figure IV.25). Cette modélisation multidirectionnelle a été appliquée aux coins supérieurs du bâtiment où des risques d'apparition de ponts thermiques sont probables.

Les cas de simulations décrivent dans le Tableau IV.6 ont été appliqués pour les périodes hivernale (Janvier) et estivale (Août) en imposant un système de contrôle hygrothermique supposé parfait. La température de consigne est comprise entre 18°C et 26°C. Pour l'humidité relative, une zone de confort entre 35% et 65% a été imposée.



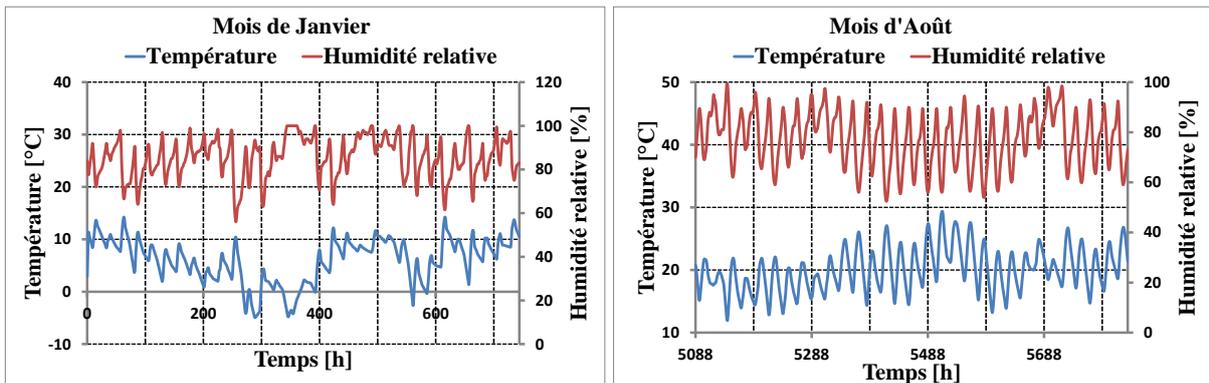
**Figure IV.25:** Géométrie et composition de la configuration étudiée (intersection entre le mur extérieur et le plancher supérieur)

#### IV.4.1.1 Impact des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité sur le comportement hygrothermique des ambiances habitables

La prise en compte de la modélisation des transferts de chaleur, d'air et d'humidité au niveau de l'enveloppe a un impact significatif sur le comportement hygrothermique de l'environnement intérieur des bâtiments. Pour mettre en évidence cet effet, les températures et humidités relatives au niveau de l'ambiance intérieure pour les cas étudiés, ont été représentées ci-après.

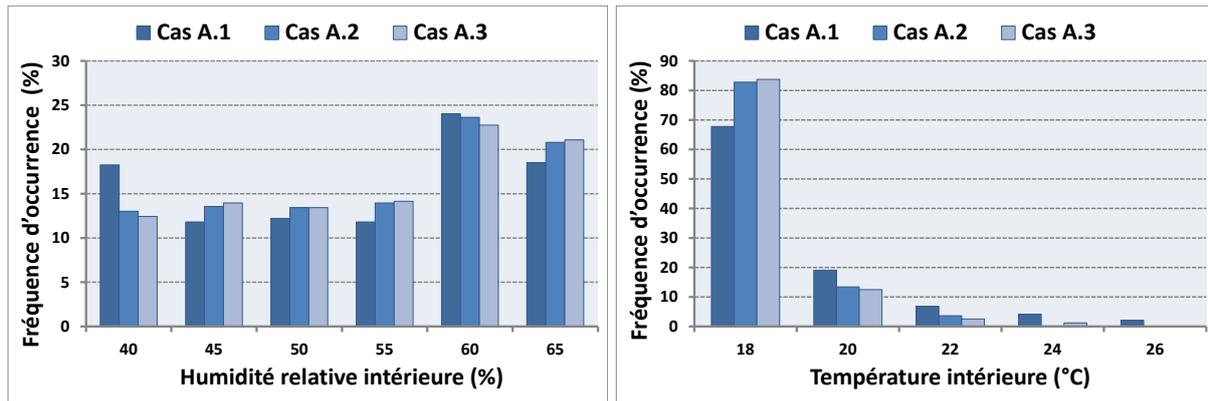
##### IV.4.1.1.1 Cas A: Climat océanique tempéré de La Rochelle

La Rochelle a un climat maritime tempéré, la température et l'humidité relative extérieures sont représentées dans la Figure IV.26 pour les mois de Janvier et Août.



**Figure IV.26:** Température et humidité relative extérieures pour le climat de La Rochelle

Dans cette partie, le bâtiment test est supposé transféré à La Rochelle. Les distributions des fréquences d'occurrence de la température et l'humidité relative intérieures pour le mois de Janvier sont présentées dans la Figure IV.27.

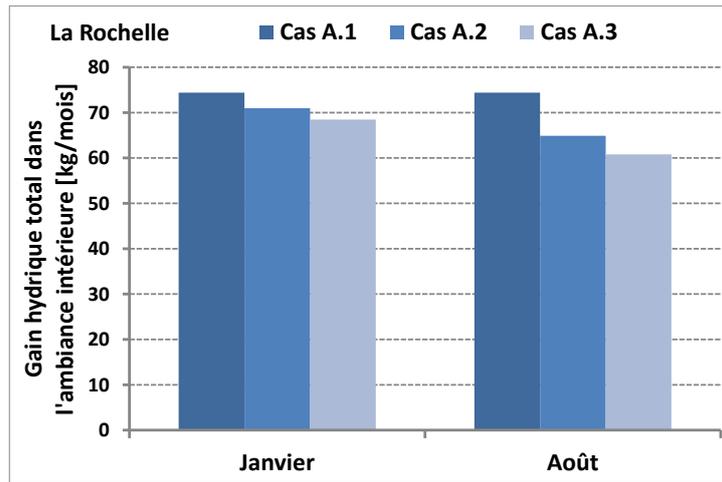


**Figure IV.27:** Fréquences d'occurrence de la température intérieure (à droite) et l'humidité relative intérieure (à gauche) pour le mois de Janvier (Climat de La Rochelle)

Pour la période hivernale, les résultats montrent que la température est constante et égale à 18°C durant la majorité du temps de simulation. Cependant, la période où la température stagne à 18°C est relativement différente entre les trois cas de simulation. En effet, pour le cas A.1, la température est à 18°C pour 68% du temps de simulation (mois de Janvier). En revanche, pour les cas A.2 et A.3, les fréquences où la température est à 18°C sont respectivement 81% et 84%. Concernant l'humidité relative, une différence dans les fréquences d'occurrence des humidités relatives particulièrement entre le cas A.1 et les deux autres cas A.2 et A.3 a été observée. À titre d'exemple, en comparant par rapport au cas de référence pris comme A.1, l'écart dans la fréquence d'occurrence de l'humidité relative à 60% et de 3% pour le cas A.2 et de 4.5% pour le cas A.3.

Contrairement au cas A.1, les cas A.2 et A.3 considèrent, en plus de la conduction thermique, les phénomènes d'advection due au gradient de pression de vapeur d'eau de part et d'autre de la paroi, la chaleur latente de changement de phase ainsi que la variation des propriétés thermophysiques (conductivité thermique et chaleur spécifique) en fonction de l'état hydrique des matériaux. La prise en compte de ces phénomènes modifie le flux thermique à travers l'enveloppe dans le cas A.2 et A.3 par rapport au cas A.1 où le transfert hydrique au niveau de l'enveloppe n'est pas considéré.

Pour l'humidité relative, la différence dans les fréquences d'occurrence illustre clairement l'impact de la prise en compte du transfert hydrique dans l'enveloppe ainsi que le phénomène d'adsorption/désorption à la surface intérieure de l'enveloppe. Ce dernier, explique la différence dans les gains hydriques intérieurs totaux présentés dans la Figure IV.28. En effet, le plâtre, qui est considéré comme un matériau hygroscopique, adsorbe une partie de l'humidité présente dans l'air intérieur ce qui implique une baisse de l'humidité relative et les gains hydriques intérieurs. Il est à rappeler que les gains hydriques sont définis par la somme algébrique de la production de l'humidité dans l'ambiance, l'apport hydrique (positif ou négatif) de l'enveloppe dû au stockage ou au déstockage.

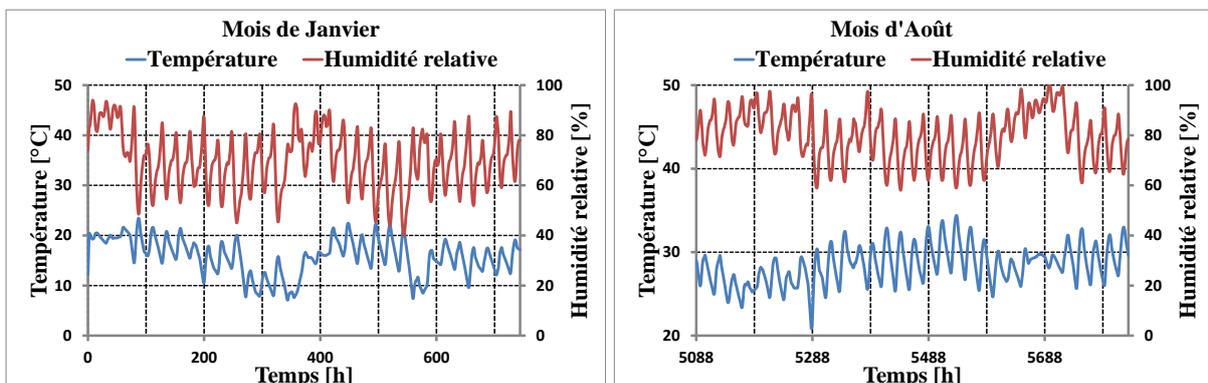


**Figure IV.28:** Gain hydrique total au niveau de l’ambiance intérieure (production d’humidité et l’apport hydrique de l’enveloppe) pour le Cas A

Les différences observés dans les champs de température et d’humidité relative entre les cas A.2 et A.3 sont expliquées par le caractère multidirectionnel des transferts hygrothermiques considérés dans le ca A.3, où des flux thermique et hydrique additionnels sont introduits dans les bilans énergétique et massique globaux du bâtiment.

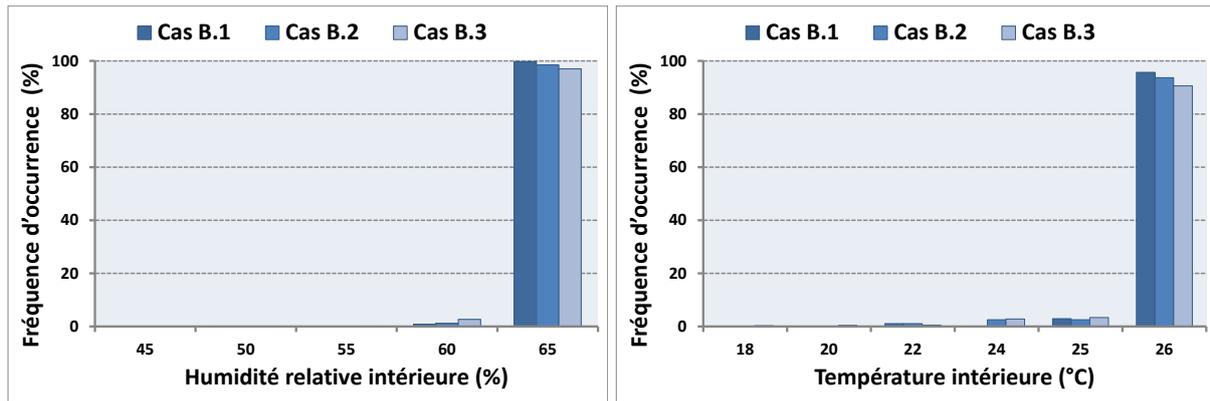
*IV.4.1.1.2 Cas B: Climat chaud et humide de Hong Kong*

Hong Kong se caractérise par un climat subtropical avec un été relativement chaud et humide où la température moyenne excède 30°C avec un taux d’humidité élevé. La Figure IV.29 présente les conditions climatiques de Hong Kong pour les mois de Janvier et Août.



**Figure IV.29:** Température et humidité relative extérieures pour le climat de Hong Kong

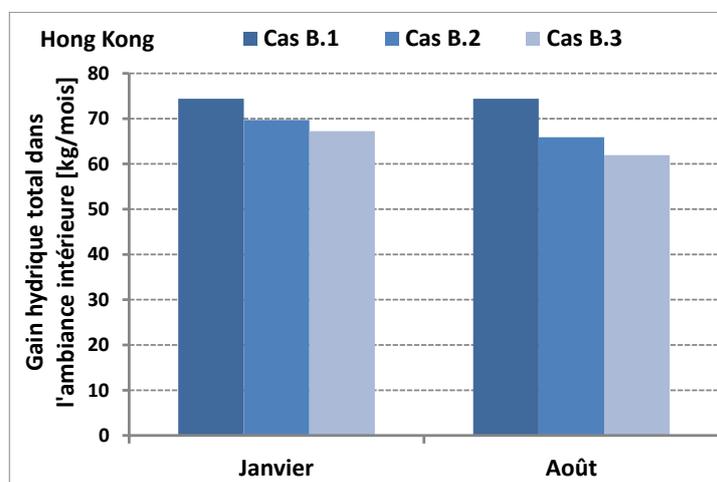
Dans cette section, l’étude est focalisée sur la période estivale où la consommation énergétique est importante. Les distributions des fréquences d’occurrences pour la température et l’humidité relative à l’intérieur du bâtiment sont illustrées dans la Figure IV.30.



**Figure IV.30:** Fréquences d'occurrence de la température intérieure (à droite) et l'humidité relative intérieure (à gauche) pour le mois d'Août (Climat de Hong Kong)

Vu le climat chaud et humide de Hong Kong particulièrement en été, la température et l'humidité relative intérieures sont respectivement constante à 26°C et 65% la majorité du mois d'Août pour les trois cas de simulation. Cependant, en comparant les cas B.2 et B.3 par rapport au cas B.1, des écarts sont constatés dans les distributions de fréquences de température et d'humidité relative.

Pour mieux illustrer la différence dans le comportement hydrique entre les trois cas de simulation, la comparaison des gains hydriques totaux dans l'ambiance intérieure est présentée dans la Figure IV.31.



**Figure IV.31:** Gain hydrique total au niveau de l'ambiance intérieure (production d'humidité et l'apport hydrique de l'enveloppe) pour le Cas B

Une différence dans le comportement hydrique intérieur est notée entre le cas B.1 et les Cas B.2 et B.3. Pour le modèle de TRNSYS (Cas B.1) où le transfert hydrique au niveau de l'enveloppe n'est pas considéré, le gain hydrique total correspond juste à la production de l'humidité intérieure. En revanche, pour les deux cas B.2 et B.3, (où le modèle des transferts

hygrothermiques dans l'enveloppe sont considérés), les gains hydriques intérieurs sont inférieurs au gain obtenu pour le cas B.1. Cela peut être expliqué par l'adsorption de l'humidité à la surface intérieure de la paroi qui implique une diminution du taux d'humidité dans l'ambiance intérieure.

IV.4.1.1.3 Cas C: Climat Froid et humide de Berlin

Dans le cas C, le bâtiment expérimental est supposé déplacé à Berlin qui se caractérise par un climat semi continental relativement froid l'hiver. La Figure IV.32 représente les conditions climatiques à Berlin pour les mois de Janvier et d'Août.

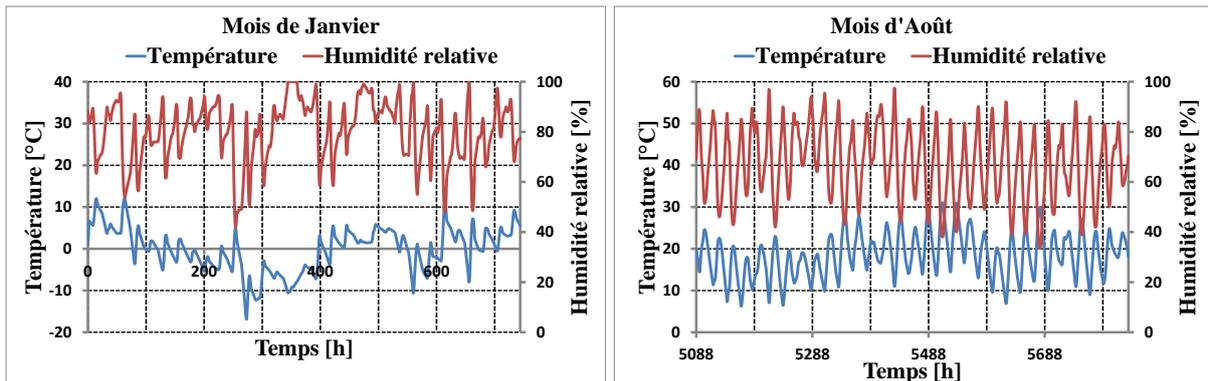


Figure IV.32: Température et humidité relative extérieures pour le climat de Berlin

Pour le cas C, l'étude s'est focalisée sur la période hivernale, la comparaison entre les trois cas de simulation des distributions des fréquences d'occurrence de la température et d'humidité relative de l'ambiance intérieure est présentée dans la Figure IV.33.

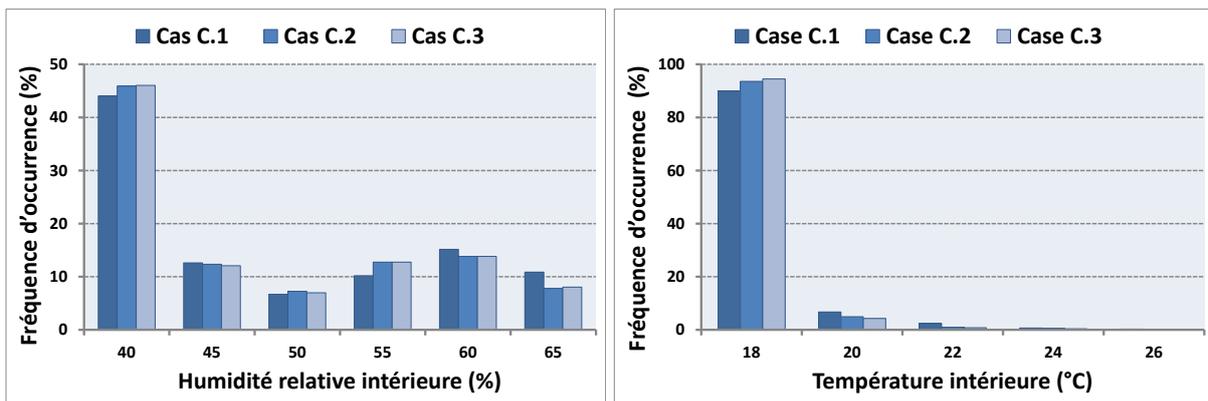
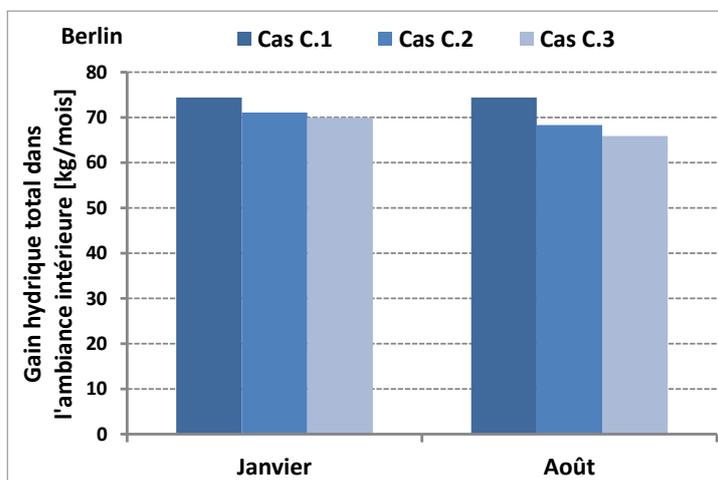


Figure IV.33: Fréquences d'occurrence de la température intérieure (à droite) et l'humidité relative intérieure (à gauche) pour le mois de Janvier (Climat de Berlin)

Les résultats montrent que la température est constante à 18°C presque tout le mois de Janvier. Cependant, comme pour le cas A (climat de La Rochelle), la fréquence d'occurrence correspondante à 18°C est relativement différente entre les trois cas de simulation. La

fréquence est de 99.5% pour le cas C.1, 97% et 95% pour les cas C.2 et C.3 respectivement. Concernant l'humidité relative, la différence entre les trois cas de simulation est moins importante. Pour le gain hydrique intérieur, le même comportement que les autres climats étudiés est constaté (Figure IV.34) avec des écarts moins importantes entre le cas C.1 et les deux autres cas en hiver.

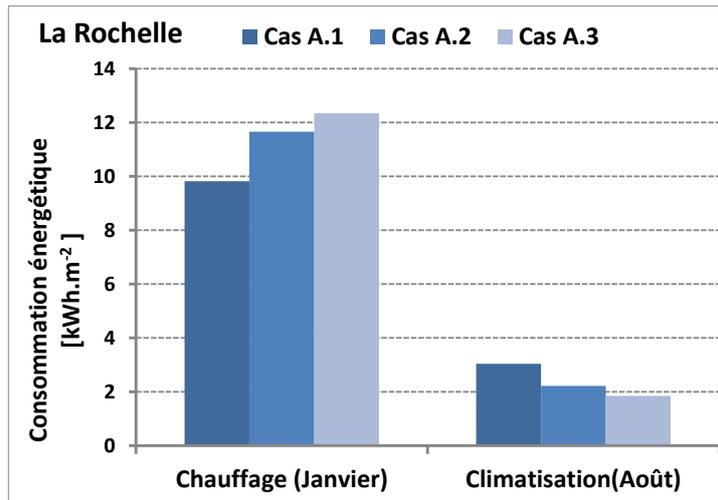


**Figure IV.34:** Gain hydrique total au niveau de l'ambiance intérieure (production d'humidité et l'apport hydrique de l'enveloppe) pour le Cas C

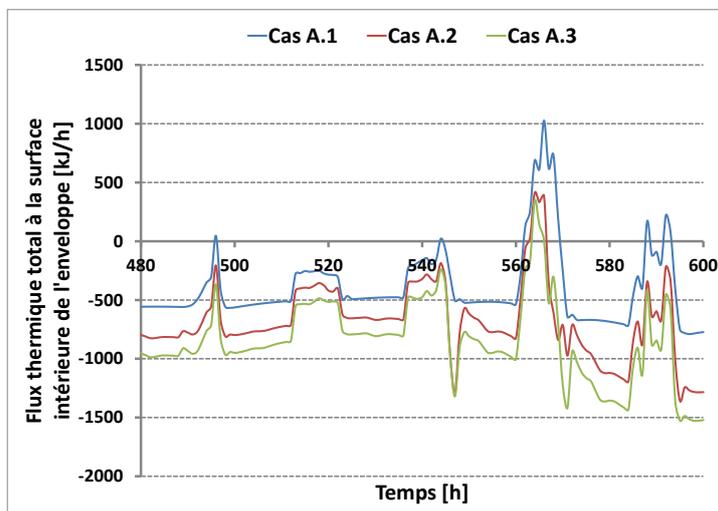
#### IV.4.1.2 Effet de la co-simulation HAM-BES sur la prédiction des consommations énergétiques

Le transfert hygrothermique dans les enveloppes de bâtiments a un impact significatif sur le comportement thermique et hydrique intérieur du bâtiment. En outre, la considération de ce phénomène dans la simulation dynamique du bâtiment a un effet considérable sur la prédiction des consommations énergétiques. Soulignons qu'il existe peu de travaux dans ce sens (Osanyintola and Simonson, 2006). Parmi ces études, les travaux de (Qin et al., 2009) et (Qin et al., 2011) qu'ont pu analyser l'effet du transfert hygrothermique unidirectionnel sur la consommation énergétique. Dans cette section, le présent travail s'étant, en plus de l'impact des transferts hygrothermiques sur la détermination des besoins énergétiques, à l'incidence de la modélisation multidirectionnelle (2D) au niveau des jonctions des parois présentant des phénomènes de ponts thermiques.

La consommation énergétique est calculée pour les cas d'étude présentés dans le Tableau IV.6. Les Figure IV.35, Figure IV.37 et Figure IV.39 représentent la comparaison des besoins énergétiques (chauffage pour le mois de Janvier et climatisation pour le mois d'Août) entre les trois cas de simulation pour les climats étudiés. Les apports thermiques dus à la paroi au niveau de l'ambiance intérieure sont présentés dans les Figure IV.36, Figure IV.38 et Figure IV.40.

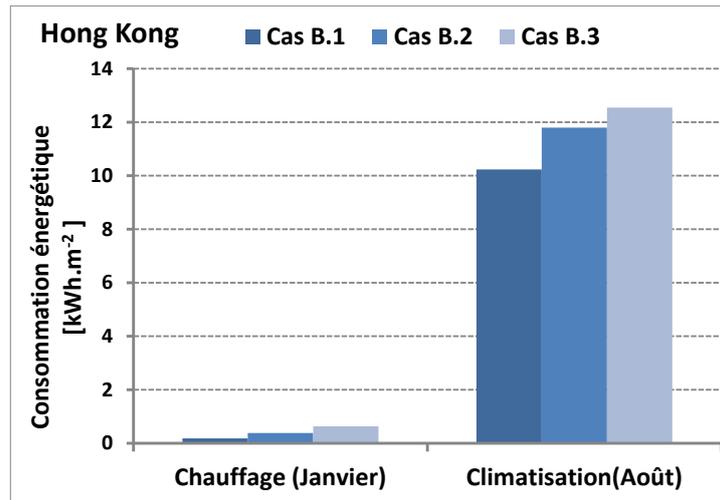


**Figure IV.35:** Consommation énergétique (chauffage et rafraîchissement) dans le climat de La Rochelle

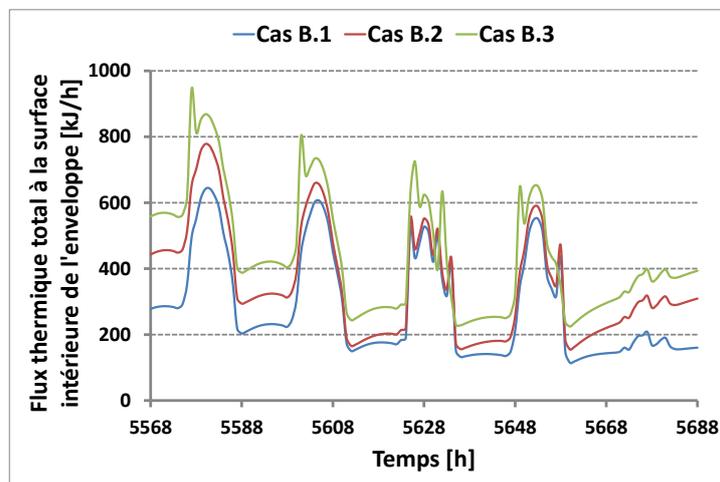


**Figure IV.36:** Flux thermique total à la surface intérieure de l'enveloppe pour la période hivernale (20 au 25 Janvier) pour le climat de La Rochelle

Dans la période de chauffage, la prédiction de la consommation énergétique avec le modèle de TRNSYS est inférieure de celle obtenue avec les deux autres modèles où les transferts hydrothermiques à travers l'enveloppe sont considérés. La sous-estimation des besoins en chauffage pour le modèle de TRNSYS est observée pour les trois climats étudiés. En effet, l'écart entre le modèle de TRNSYS et celui où la modélisation 1D du transfert hydrothermique au niveau de l'enveloppe atteint 28% pour le climat de La Rochelle, 12% pour Berlin et 25% pour Hong Kong.



**Figure IV.37:** Consommation énergétique (chauffage et rafraîchissement) dans le climat de Hong Kong



**Figure IV.38:** Flux thermique total à la surface intérieure de l'enveloppe pour la période estivale (20 au 25 Août) pour le climat de Hong Kong

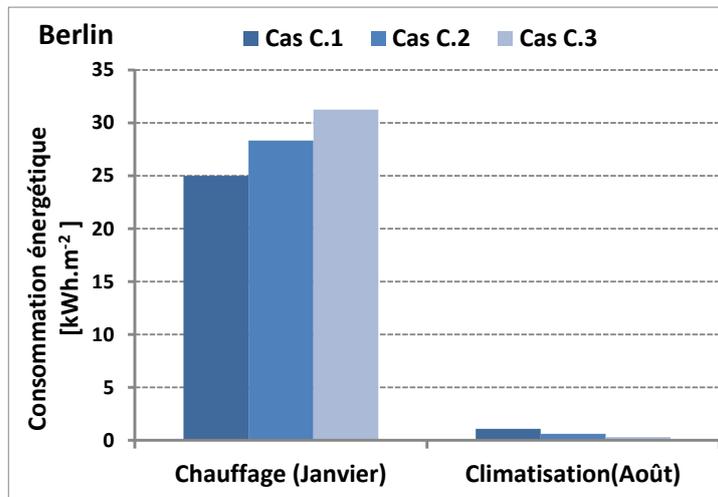
Ces résultats mettent en évidence l'importance de la prise en compte des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans la simulation dynamique du bâtiment. En effet, le flux thermique traversant l'enveloppe de l'intérieur vers l'extérieur (condition climatique hivernale) est plus important. De plus, les besoins en chauffage évalués par le modèle de TRNSYS sont sensiblement sous-estimés. Ce comportement est clairement illustré dans les Figure IV.36 et Figure IV.40 qui montrent des écarts dans les déperditions thermiques à la surface intérieure de l'enveloppe entre le modèle de TRNSYS et les deux autres cas de simulation. Ce résultat explique la différence de la prédiction des consommations de chauffage, observée dans ce cas d'étude. En fait, dans le cas où le transfert hygrothermique est pris en compte, la variation de la conductivité thermique en fonction de l'état hydrique du matériau accélère la cinétique du transfert de chaleur à travers la paroi. La considération de ce

phénomène cause une hausse des déperditions thermiques ce qui implique une consommation énergétique plus importante.

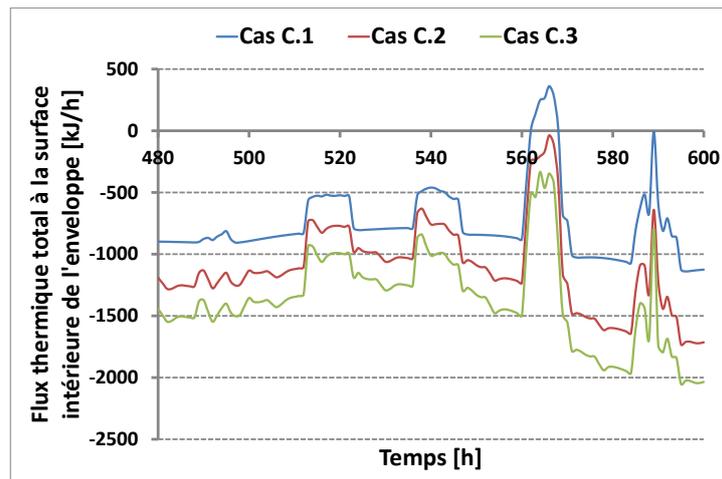
Quand la modélisation des transferts hygrothermiques dans l'enveloppe est effectuée en 2D pour les coins supérieurs du bâtiment test, la différence dans la prédiction de la consommation énergétique est plus importante en comparaison à celle obtenue avec le modèle de TRNSYS.

La sous-estimation atteint 36% pour La Rochelle, 11% pour Berlin et 33% pour Hong Kong. Ce résultat est expliqué par la considération de l'effet multidirectionnel des transferts hygrothermiques aux niveaux des ponts thermiques où les déperditions de chaleur sont plus importantes (Figure IV.36 et Figure IV.40)

Dans la période estivale, pour le climat chaud et humide de Hong Kong, la considération des transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe a le même effet que la période hivernale. En comparant par rapport au cas B.1 (modèle TRNSYS), une sous-estimation des consommations de climatisation de 21% par rapport au cas B.2 et de 32% par rapport au cas B.3 (le modèle HAM en 1D pour la paroi courante et 2D pour les ponts thermiques). Ce résultat confirme l'importance de la prise en compte de la modélisation des transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe ainsi que la considération de l'effet multidirectionnel du transfert aux niveaux des points singuliers de l'enveloppe.



**Figure IV.39:** Consommation énergétique (chauffage et rafraîchissement) dans le climat de Hong Kong



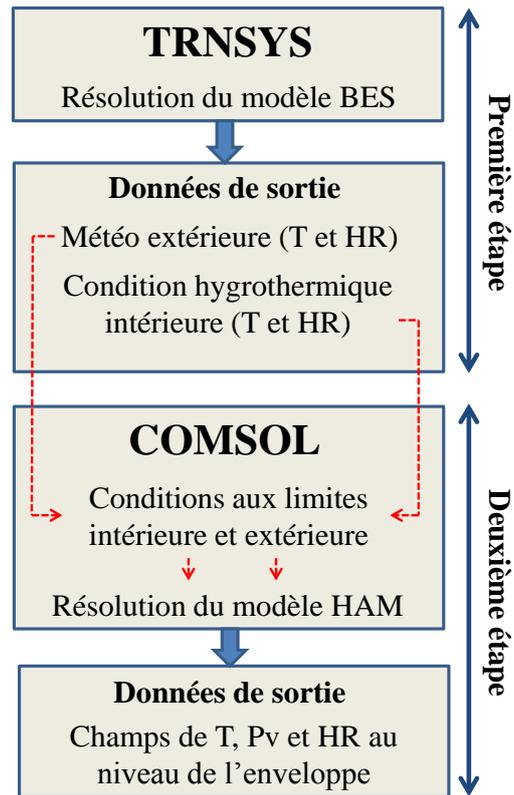
**Figure IV.40:** Flux thermique total à la surface intérieure de l'enveloppe pour la période estivale (20 au 25 Août) pour le climat de Hong Kong

#### IV.4.1.3 Impact de l'interaction dynamique HAM-BES sur la prédiction du comportement hygrothermique des parois de bâtiments

La plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES développé dans ce chapitre a permis d'étudier, d'une part, l'impact la prise en compte des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans l'enveloppe (1D et 2D) sur le comportement hygrothermique de l'ambiance habitable ainsi que les besoins énergétique du bâtiment. D'autre part, il a été montré l'aptitude de cette approche de co-simulation à déterminer avec une grande précision le comportement hygrothermique des composants de l'enveloppe, particulièrement les points singuliers comme les ponts thermiques où les risques liés à une présence excessive d'humidité.

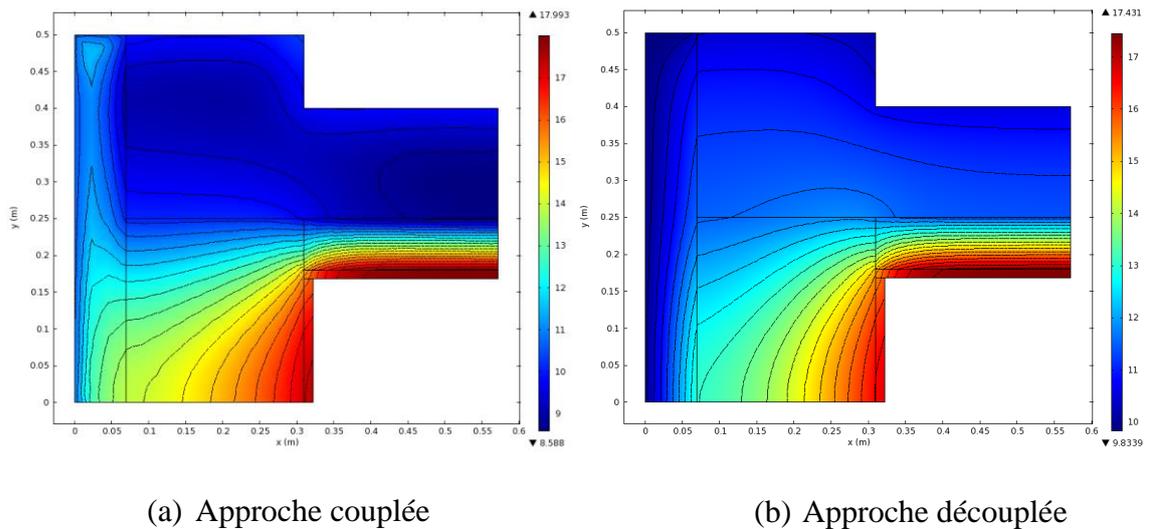
Afin d'analyser l'effet de l'interaction dynamique entre l'ambiance intérieure et l'enveloppe du bâtiment sur la précision de la prédiction du comportement hygrothermique au niveau de l'enveloppe, deux approches de modélisation HAM-BES ont été appliquées pour le cas d'étude décrit précédemment en imposant les conditions météo de La Rochelle. Pour la première approche, dite couplée, la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES développée dans ce chapitre a été utilisée. Dans cette approche, les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité ont été modélisés en 1D pour la paroi courante et 2D pour les ponts thermiques supérieurs.

Quant à la deuxième approche, dite découplée, elle est basée sur une modélisation découplée par chainage des transferts hygrothermiques entre l'enveloppe et l'ambiance. Elle consiste à implémenter le cas d'étude au niveau de TRNSYS sans tenir compte du modèle de transfert HAM dans l'enveloppe. Ainsi, les températures et les humidités relatives intérieures et extérieures obtenues ont été prises comme des conditions aux limites pour le modèle de transfert hygrothermique en 2D du pont thermique implémenté sous Comsol. La Figure IV.41 illustre la démarche découplée.

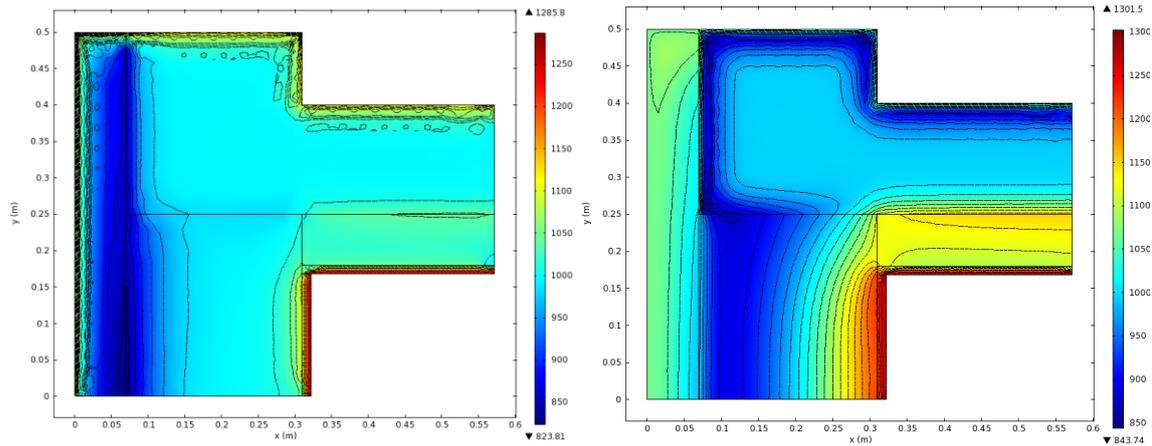


**Figure IV.41:** Démarche de modélisation HAM-BES par chainage (approche découplée)

Les Figure IV.42, Figure IV.43 et Figure IV.44 exposent les comparaisons des distributions, obtenues avec les deux approches, des champs de température, de pression de vapeur et d'humidité relative au niveau de la jonction présentant un pont thermique.



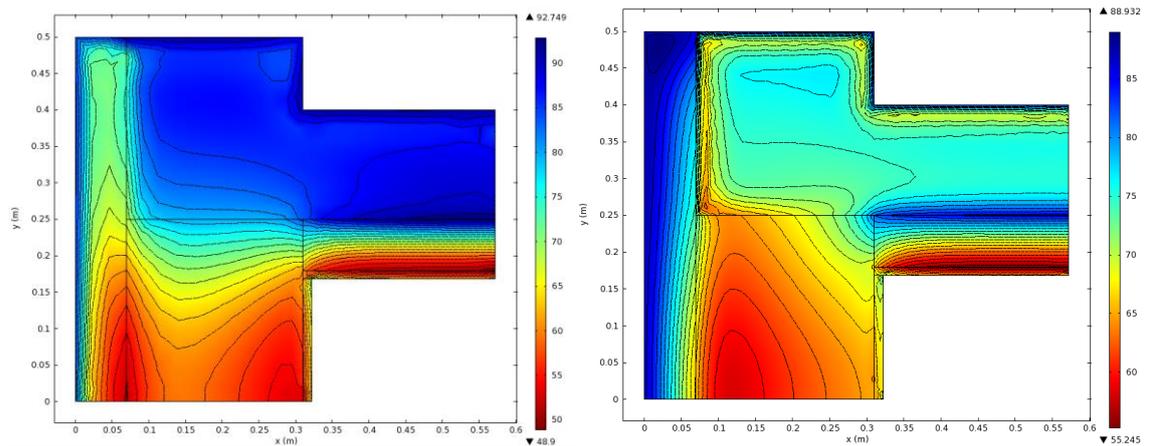
**Figure IV.42:** Comparaison de la distribution des champs de température entre l'approche couplée et découplée (31 Janvier)



(a) Approche couplée

(b) Approche découplée

**Figure IV.43:** Comparaison de la distribution des champs de pression de vapeur entre l'approche couplée et découplée (31 Janvier)



(a) Approche couplée

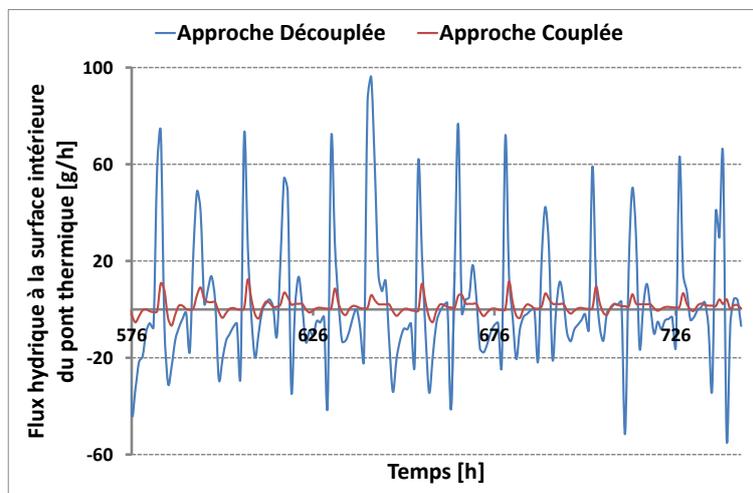
(b) Approche découplée

**Figure IV.44:** Comparaison de la distribution des champs d'humidité relative entre l'approche couplée et découplée (31 Janvier)

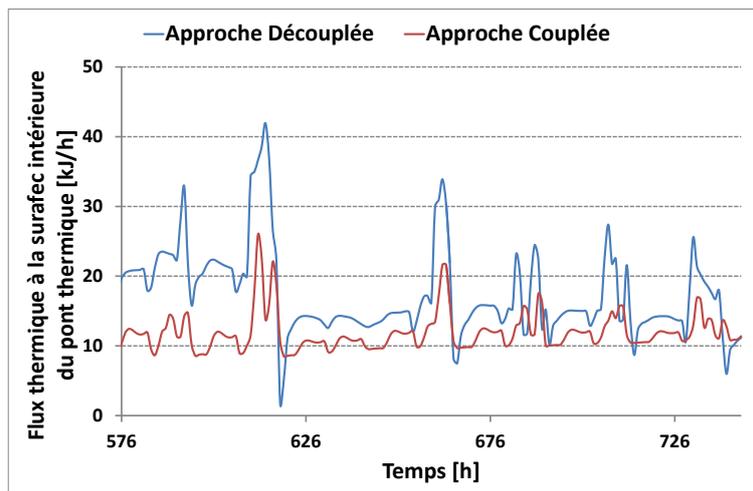
La comparaison entre les distributions des champs de température, de pression de vapeur d'eau et d'humidité relative entre l'approche découplée (où la résolution des deux modèles HAM et BES se fait séparément sans aucune interaction dynamique) et l'approche couplée (où les deux modèles HAM et BES sont résolus simultanément avec un échange de données dynamique à chaque pas de temps) montre que la qualité de la prédiction du comportement thermique et hydrique du pont thermique est complètement différente entre les deux approches étudiées (voir les Figure IV.42, Figure IV.43 et Figure IV.44). Ces résultats sont confirmés par la comparaison des flux thermiques et hydriques traversant la surface intérieure

de l'enveloppe. La Figure IV.45 illustre clairement la différence d'ordre de grandeur des flux thermiques et hydriques entre les deux approches «couplée» et «découplée». L'écart atteint 12 kJ/h pour le transfert thermique et de 40 g/h pour le flux hydrique.

En effet, quand l'interaction entre les modèles HAM et BES est dynamique et continue, cela induit un échange simultané de données. Pour un pas de temps donné, un apport thermique et hydrique (positif ou négatif) de l'enveloppe est introduit dans les bilans massique et énergétique de l'ambiance intérieure, ce qui n'est pas considéré dans l'approche découplée. Cela implique une modification des conditions aux limites intérieures lors de la simulation au niveau de l'enveloppe, pour le pas temps suivant. Ce procédé est répété tout au long de la simulation et mène à un comportement hygrothermique différent entre la démarche couplée et l'approche découpée par chainage lors du couplage des modèles HAM-BES.



(a) Flux hydrique (24 au 31 Janvier)



(b) Flux thermique (24 au 31 Janvier)

**Figure IV.45:** Flux hydrique et thermique traversant la surface intérieure de du pont thermique : comparaison entre les approches couplée et découplée

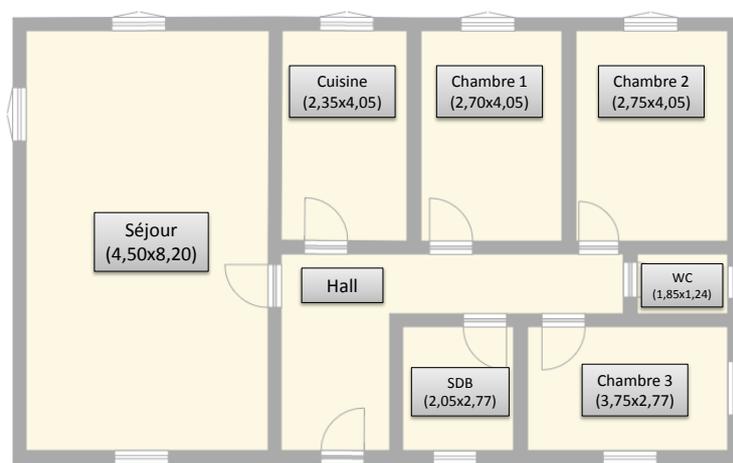
## IV.5 Etude numérique comparative sur la performance des stratégies de ventilation : Indicateurs de pathologies liés à l'humidité

Dans une habitation, la stratégie de ventilation adoptée a un impact important sur la qualité de l'air intérieur, les consommations énergétiques ainsi que sur le contrôle des pathologies dues à une présence excessive de l'humidité au niveau de l'ambiance habitable et l'enveloppe du bâtiment. L'objectif du cas d'étude présenté ci-dessous est de réaliser une étude comparative des systèmes de ventilation dans une maison individuelle vis à vis de leurs efficacités par rapport à la réduction et le contrôle des risques liés à l'humidité.

### IV.5.1 Présentation du cas d'étude

#### IV.5.1.1 Description de la maison étudiée

La maison étudiée est de plain-pied, de hauteur sous plafond de 2.5m. Elle est de type F3 comportant quatre pièces principales, à savoir un séjour et trois chambres, et trois pièces techniques qui sont la cuisine, la salle de bain et les toilettes. Le volume de la maison étudiée est de  $250 \text{ m}^3$  avec une surface habitable de  $100 \text{ m}^2$ . Le plan de la maison étudiée ainsi que les dimensions de chaque pièce sont illustrés dans la Figure IV.46.



**Figure IV.46:** Plan de la maison étudiée (Rahmeh, 2014)

Les façades de la maison sont constituées de 20 cm de parpaing avec un enduit extérieur de 2 cm, une isolation intérieure est assurée par une couche de 9 cm de polystyrène. Le plafond est composé de l'intérieur vers l'extérieur d'une plaque de plâtre de 1.3 cm, d'un isolant de laine de verre de 10 cm et d'une dalle en béton de 15 cm. Les cloisons intérieures de la maison ont une épaisseur de 80 cm, elles sont constituées de plâtre et de la laine de verre. Les fenêtres sont en double vitrage. Les épaisseurs de la paroi sont résumées dans le Tableau IV.7.

**Tableau IV.7:** Compositions des différentes parois de la maison étudiées

Parois	Couches de matériau (de l'intérieur vers l'extérieur)	Epaisseur (cm)
Façades extérieures e = 31.5 cm	Polystyrène expansé	9
	Parpaing	20
	Enduit	2.5
Plafond e = 26.3 cm	Plaque de plâtre	1.3
	Laine de verre	10
	Dalle en béton	15
Cloison e = 81.3 cm	Plaque de plâtre	1.3
	Laine de verre	80

La perméabilité à l'air de l'enveloppe est supposée respecter la réglementation thermique en vigueur (RT 2012) pour une maison individuelle. Elle est fixée à  $0.6 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ .

#### IV.5.1.2 Scénario d'occupation et de production d'humidité

Cette étude s'intéresse particulièrement aux risques liés à l'humidité, pour cela les autres types de polluants ne sont pas considérés. Les scénarios d'occupation et de production d'humidité décrits ci-après sont basés sur ceux utilisés dans les travaux de l'annexe 27 de AIE (Millet et al., 1995) et (Mansson, 2001).

La production d'humidité est principalement liée à l'occupation. En effet, la présence d'occupant dans une pièce se traduit par des productions métaboliques de vapeur d'eau ainsi que leurs activités telles que la cuisine des aliments, la douche et la lessive. Une autre source d'humidité est relative aux apports hydriques (positifs ou négatifs) à travers l'enveloppe.

La maison étudiée dispose de quatre chambres, elle peut donc être occupée par une famille de 4 ou 5 personnes. Ce type d'occupation est défini dans l'Annexe 27 de l'AIE (Millet et al., 1995). Dans ce cas d'étude, la maison est occupée par une famille de 4 personnes : un couple et deux enfants âgés respectivement de 19 et 13 ans. Le scénario de présence dans la maison et d'occupation de chaque pièce est celui considéré dans les travaux de Koffi (Koffi, 2009) résumé dans le Tableau IV.8.

**Tableau IV.8:** Scénario de présence dans la maison (Koffi, 2009)

Occupant	Jours de semaine	Week-end
Homme	00:00-08:00	00:00-10:00
	18:00-24:00	12:00-24:00
Femme	00:00-08:00	00:00-13:00
	17:00-24:00	15:00-24:00
Enfant (19 ans)	00:00-08:00	02:00-17:00
	18:00-24:00	
Enfant (13 ans)	00:00-08:00	00:00-12:00
	17:00-24:00	15:00-24:00

Le Tableau IV.9 indique les valeurs de production de vapeur d'eau due au métabolisme des occupants (éveillé ou endormi) ainsi que leurs activités (douche, repas, lavage).

**Tableau IV.9:** Production d'humidité due à l'occupation

Source		Production	Durée	
Métabolisme	Adulte (> 15ans)	Eveillé	55(g/h/pers)	
		Endormi	30(g/h/pers)	
	Enfant (10-13 ans)	Eveillé	45(g/h/pers)	
		Endormi	15(g/h/pers)	
Activités	Repas	Petit déjeuner	100(g/h/pers)	
		Déjeuner	600(g/h/pers)	
		Diner	900(g/h/pers)	
	Douche		300(g/pers)	10 min/pers
	Lavage		200 (g)	2h
	Séchage		1000(g)	2h

Les scénarios journaliers de production de vapeur d'eau pour les différentes pièces de la maison sont représentés dans le Tableau IV.10.

**Tableau IV.10:** Scénarios journaliers de production d’humidité dans les différentes pièces de la maison

Pièce	Jours ouvrés		Week-end	
Séjour	06:00-07:00	110		
	07:00-08:00	100	08:00-10:00	110
	18:00-19:00	210	13:00-17:00	100
	19:00-21:00	155	20:00-24:00	165
	21:00-23:00	110		
Chambre 1	19:00-23:00	55	02:00-12:00	30
	23:00-07:00	30		
Chambre 2	17:00-18:00	45	16:00-18:00	45
	21:00-22:00	45	24:00-10:00	15
	22:00-07:00	15		
Chambre 3	23:00-06:00	90	24:00-08:00	110
Cuisine	07:00-08:00	100	07:00-08:00	100
	17:00-18:00	900	17:00-18:00	900
Salle de Bain	06:10-06:20	300	09:10-09:20	300
	06:40-06:50	300	09:40-09:50	300
	07:10-07:40	300	10:10-10:20	300

#### IV.5.1.3 Système de ventilation

Dans ce travail, afin de comparer l’efficacité entre les deux principes de ventilation par extraction et par insufflation, trois stratégies de ventilation sont été étudiées.

La première est une ventilation mécanique auto-réglable par extraction (VMC-R). Dans cette stratégie de ventilation, l’extraction mécanique de l’air se fait par les pièces techniques et l’entrée d’air est libre dans les pièces principales à travers des modules d’entrée d’air. Les débits d’extraction sont fixés en se référant à l’arrêté de 1982 (JORF, 1982) pour une maison de quatre pièces principales. Pour la salle de bain et les toilettes des débits d’extraction de 30 m<sup>3</sup>/h et 15m<sup>3</sup>/h sont imposés. Concernant la cuisine, le débit d’extraction est fixé à 45m<sup>3</sup>/h. Ce débit passe à 120m<sup>3</sup>/h dans la période de production d’humidité (Pendant la préparation des repas).

Les entrées d’air sont fixées selon la norme XP 50-410 (DTU 68.1, 1995). Cette norme exige la présence d’une entrée d’air dans chaque pièce principale. Dans ce cas d’étude, deux entrées d’air de module M22 (22 m<sup>3</sup>/h) sont considérées dans le séjour et une entrée de module M22 dans chaque chambre.

La deuxième est une ventilation mécanique par insufflation centrale (VI-C). Cette stratégie représente le système d’insufflation le plus utilisé en France. Le principe consiste à insuffler dans un point central de la maison et l’évacuer l’air vicié par les pièces de la maison. Afin de pouvoir comparer ce système par rapport à la VMC-R, le même débit de ventilation globale est imposé. Dans ce cas, l’insufflation de l’air est effectué dans le hall avec un débit de

90m<sup>3</sup>/h et de 165m<sup>3</sup>/h dans les périodes de pointes. Pour l'évacuation d'air, des modules de sortie d'air sont considérés dans les différentes pièces de la maison comme suit : M45 dans la cuisine (45 m<sup>3</sup>/h), M30 dans le séjour et la salle de bain (30 m<sup>3</sup>/h) et M15 dans les chambres (15 m<sup>3</sup>/h).

La troisième stratégie consiste à une ventilation par insufflation répartie (VI-B). Contrairement à la VI-C où l'insufflation est effectuée dans un point du bâtiment, pour la VI-R, l'injection de l'air est répartie sur les pièces principales (chambres et séjour) et l'évacuation s'effectue par les pièces de services. Un débit de 20m<sup>3</sup>/h est insufflé dans chacune des trois chambres. Pour la cuisine, l'insufflation est fixée à 30m<sup>3</sup>/h dans les périodes standards, en revanche durant les périodes de pointes un débit de 120m<sup>3</sup>/h est imposé. L'évacuation d'air est assurée par des sorties d'air, Des modules M45 (45 m<sup>3</sup>/h), M30 (30 m<sup>3</sup>/h) et M15 (15 m<sup>3</sup>/h) sont considérés respectivement dans la cuisine, la salle de bain et les toilettes.

Le Tableau IV.11 résume la répartition des débits imposés pour les trois stratégies de ventilation étudiées. Ces systèmes de ventilation ont été inspirés des travaux de thèse de Rahmeh (Rahmeh, 2014).

**Tableau IV.11:** Distributions des débits d'air pour les systèmes de ventilation étudiés

Stratégie de ventilation	Pièces principales			Pièces de service		
	Séjour	Chambres	Hall	Cuisine	Bain	WC
VMC-R	2 x M22	M22	-	45/120	30	15
VI-C	M30	M15	90/165	M45	M30	M15
VI-B	30/120	20	-	M45	M30	M15

## IV.5.2 Modélisation thermo-hydro-aéraulique

Dans le but d'étudier l'impact des stratégies de ventilation sur le comportement hygrothermique de l'ambiance habitable ainsi que l'enveloppe des bâtiments, un outil de modélisation des systèmes de ventilation (CONTAM) a été couplé dynamiquement à la plateforme de co-simulation HAM-BES développée dans la section précédente. Cette démarche permet d'étendre la modélisation thermohydraulique assurée par la plateforme de co-simulation HAM-BES à une modélisation thermo-hydro-aéraulique avec une modélisation détaillée des systèmes de ventilation et des transferts aérauliques.

### IV.5.2.1 Modélisation des champs de pression

Dans un bâtiment, les différences de pression, soit entre zones adjacentes, soit entre l'intérieur du bâtiment et son environnement extérieur ; génèrent des flux d'air. Au niveau de CONTAM, la modélisation du comportement aéraulique des bâtiments est basée sur

l'algorithme développé par AIRNET (Walton, 1989). En effet, la différence de pression à travers une ouverture entre deux zones données est exprimée par l'équation de Bernoulli :

$$\Delta P = \left( P_i + \frac{\rho_i v_i^2}{2} \right) - \left( P_j + \frac{\rho_j v_j^2}{2} \right) + g \cdot (\rho_i z_i - \rho_j z_j) \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$i, j$  : Deux zones adjacentes,

$\Delta P$  [Pa] : Différence de pression entre deux zones adjacentes,

$P$  [Pa] : Pression statique de la zone,

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] : Masse volumique de la zone,

$g$  [m/s<sup>2</sup>] : Accélération de la pesanteur,

$v$  [m/s] : vitesse de l'air,

$z$  [m] : Hauteur de l'ouverture,

Entre deux zones adjacentes ou entre une ambiance intérieure et l'environnement extérieur, le terme  $g \cdot (\rho_i z_i - \rho_j z_j)$  exprime la différence de pression due au tirage thermique ( $\Delta P_T$  [Pa]). En effet, en considérant l'air dans les zones comme un gaz parfait, la variation de la température des zones induit une variation des pressions hydrostatiques.

Pour les zones en contact avec l'ambiance extérieure, l'effet de la pression due au vent sur l'enveloppe a un impact significatif sur les valeurs des débits d'air. L'expression de cette pression est représentée dans l'équation suivante :

$$P_{vent} = C_P \cdot \frac{\rho_{ext} \cdot V_{vent}^2}{2} \quad (\text{IV.5})$$

Où :

$P_{vent}$  [Pa] : Pression du vent extérieur,

$\rho_{ext}$  [kg/m<sup>3</sup>] : Densité de l'air extérieur,

$V_{vent}$  [m/s] : Vitesse du vent,

$C_P$  [-] : Coefficient de pression,

Au final, pour les ouvertures situées sur l'enveloppe extérieure, la différence de pression est exprimée comme suit :

$$\Delta P = P_i - P_j + \Delta P_T + P_{vent} \quad (\text{IV.6})$$

#### IV.5.2.2 Modélisation des débits d'air à travers les connexions aérauliques

Pour l'évaluation des flux d'air unidirectionnels traversant les connexions aérauliques (défauts d'étanchéité, entrées/sorties d'air et détalonnages des portes), CONTAM propose deux principaux modèles. Le premier exprime le débit d'air en fonction de la différence de pression en utilisant une loi de puissance, le second utilise, quant à lui, une expression

quadratique. Le modèle de la loi empirique de puissance utilisée dans ce travail est représenté par l'équation (IV.7).

$$Q_{air} = C(\Delta P)^n \quad (\text{IV.7})$$

L'exposant  $n$  varie entre 0,5 pour les écoulements turbulents et 1 pour les écoulements laminaires. Le coefficient  $C$  inclut les caractéristiques géométriques de l'orifice, les pertes de charge ainsi que la modification des lignes de courant au passage de celui-ci.

#### IV.5.2.2.1 Terminaux de ventilation

Les débits d'air traversant les terminaux de ventilation sont caractérisés par la loi de puissance. L'exposant  $n$  est fixé à 0.5 avec une différence de pression de 20 Pa supposée constante. En se basant sur les caractéristiques aérauliques théoriques des modules d'air utilisés dans ce cas d'étude, les coefficients  $C$  sont déterminés (Tableau IV.12).

**Tableau IV.12:** Coefficient  $C$  pour les modules d'air utilisés dans le cas d'étude

Module d'air	Débit théorique	Coefficient $C$
M45	45 m <sup>3</sup> /h	0.0028
M30	30 m <sup>3</sup> /h	0.0020
M22	20 m <sup>3</sup> /h	0.0015
M15	15 m <sup>3</sup> /h	0.0011

#### IV.5.2.2.2 Défaut d'étanchéité et détalonnage de porte

Pour l'évaluation des débits d'air traversant les ouvertures dues aux défauts d'étanchéité de l'enveloppe extérieur, le modèle de l'orifice (basé sur la loi de puissance) est utilisé. Ce modèle consiste à déterminer une surface de fuite équivalente par rapport à la surface totale de l'enveloppe. Le débit d'air à travers l'orifice est exprimé comme suit :

$$Q_{air} = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (\text{IV.8})$$

Où :

$Q_{air}$  [m<sup>3</sup>/s] : Débit d'air,

$C_d$  [-] : Coefficient de décharge,

$A$  [m<sup>2</sup>] : Surface de l'orifice,

Pour la perméabilité de la maison étudiée (0.6 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>), la surface de fuite est fixée à 0.64 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> avec un coefficient de décharge  $C_d=1$  pour une différence de pression de 4 Pa. Pour chaque façade d'une zone de la maison, deux orifices sont considérés, ils sont disposés respectivement à des hauteurs de ¼ et ¾ de la hauteur de la pièce. Cette distinction permet de prendre en compte un plan neutre au niveau de la façade. En effet, l'air extérieur entre dans le bâtiment par la perméabilité basse tandis que l'air intérieur sort par la perméabilité haute.

Concernant la modélisation des débits d'air traversant les portes fermées (détalonnage des portes), le modèle utilisant la loi de l'orifice décrit ci-dessus est utilisé. Une surface de fuite de  $180 \text{ cm}^2$  est considérée. Les données d'entrée du modèle sont respectivement :  $n = 0.5$  et  $C_d = 1$  pour une différence de pression de  $37.5 \text{ Pa}$ .

#### IV.5.2.3 Couplage entre CONTAM/plateforme de co-simulation HAM-BES

Le couplage entre l'outil de modélisation aéraulique (CONTAM) et la plateforme de co-simulation permet d'assurer une modélisation thermo-hydro-aéraulique détaillée de la maison étudiée.

Le couplage est particulièrement réalisé entre CONTAM et TRNSYS. En effet, le comportement hygrothermique des zones de bâtiment dépendent des débits d'air. D'un autre côté, les différences de températures entre les zones à une influence dans le calcul des débits d'air (équation de Bernoulli).

Le couplage CONTAM/TRNSYS est effectué à travers le Type 97 qui fait appel à un fichier \*.air créé depuis CONTAM. L'échange d'informations entre les deux logiciels se fait à chaque pas de temps. Les températures de chaque zone calculées par TRNSYS (Type 56) ainsi que les données météo (la température et la pression atmosphérique extérieure, la vitesse et la direction du vent) sont transmises à CONTAM afin de déterminer les champs de pression et déduire par la suite les débits d'air. CONTAM transmet à son tour les débits d'air échangés entre les zones ou avec l'environnement extérieur. Ces débits d'air sont utilisés pour déterminer les gains thermiques et hydriques (dus à la ventilation et l'infiltration d'air) qui sont introduit dans les bilans thermiques et massiques de chacune des zones. Le diagramme représenté dans la Figure IV.47 résume la démarche de couplage thermo-hydro-aéraulique entre CONTAM et la plateforme de co-simulation HAM-BES.

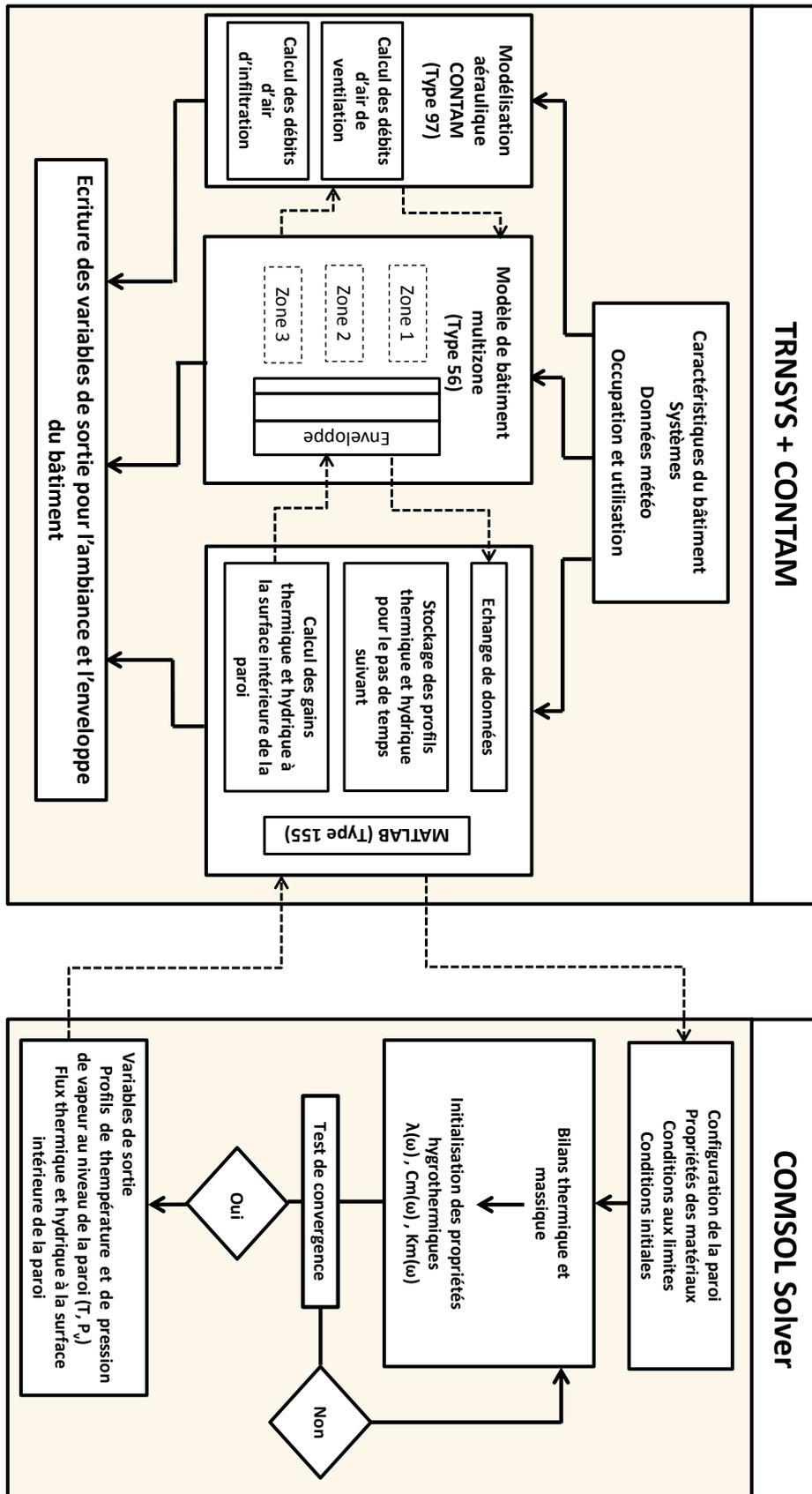


Figure IV.47: Démarche de couplage thermo-hydro-aéraulique (CONTAM-TRNSYS-COMSOL)

### IV.5.3 Indicateurs de pathologies liés à l'humidité

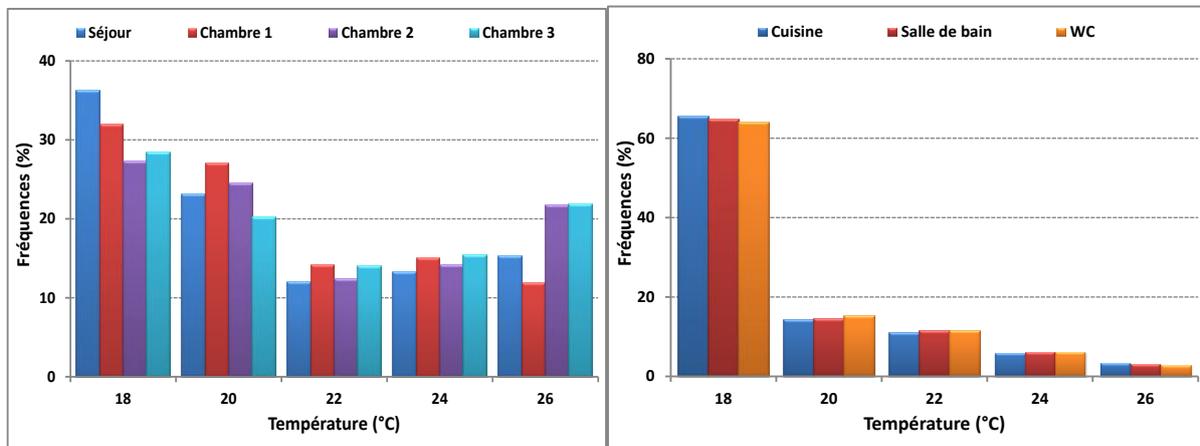
Dans le cas d'étude décrit précédemment, l'efficacité des systèmes de ventilations étudiés sont comparés selon des indicateurs de durabilité liés à des pathologies causées par l'humidité. Ces indicateurs sont classés en deux catégories : risques de pathologies au niveau de l'ambiance habitable et risques de pathologies au niveau de l'enveloppe. Dans cette étude le climat de La Rochelle est considéré comme conditions aux limites extérieures. Au niveau de la plateforme de co-simulation HAM-BES, la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité est prise en compte pour l'enveloppe extérieure. (1D pour la paroi courante et 2D pour les coins supérieurs).

#### IV.5.3.1 Risques de pathologies au niveau de l'ambiance habitable

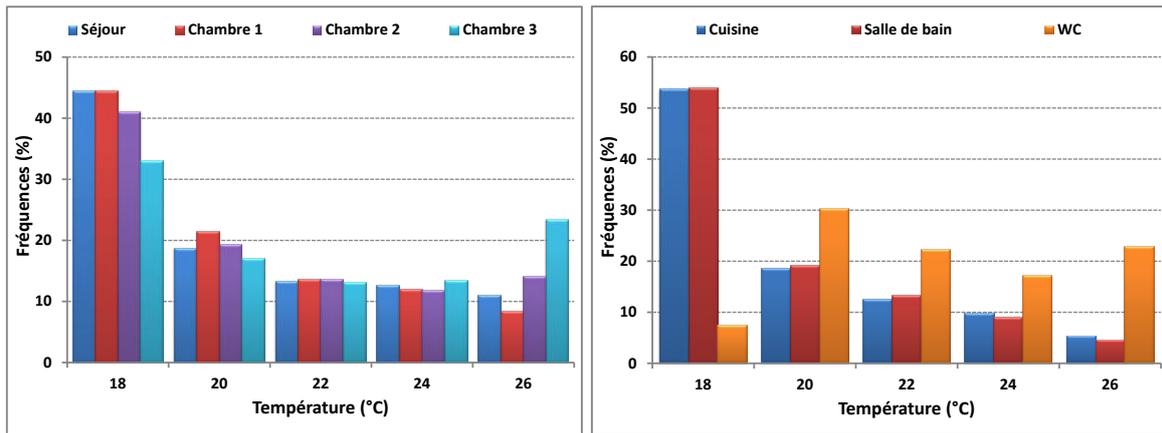
##### IV.5.3.1.1 Consommation énergétique

##### IV.5.3.1.1.1 Niveaux des températures intérieures

Pour une année de simulation, une température de 18°C pendant une fréquence moyenne de 60% du temps pour les zones humides est constatée. Elle passe à 30% de la durée de simulation pour les pièces principales. Durant les périodes chaudes, et avec le climat tempéré de La Rochelle, les températures intérieures des zones humides atteint rarement les 26°C (une fréquence de 5% durant une année). Pour les pièces principales, la fréquence moyenne pour la température limite supérieure (26°C) est de 15% durant une année.

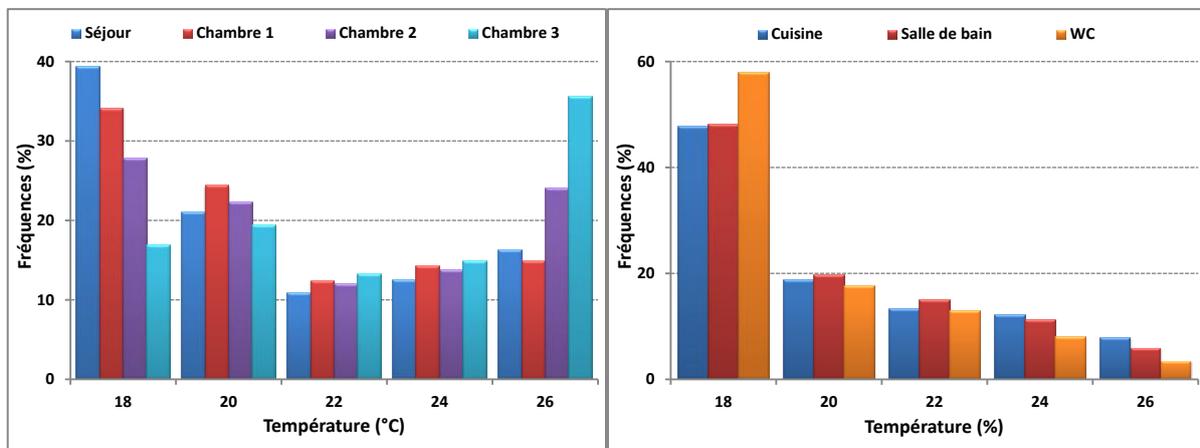


**Figure IV.48:** Distribution annuelle des niveaux des températures intérieures dans le cas de la VMC



**Figure IV.49:** Distribution annuelle des niveaux des températures intérieures dans le cas de la VI Centrale

Concernant la stratégie de VI-centrale, en comparant la distribution de la température par rapport au système de VMC, la fréquence moyenne d’avoir une température de 18°C est relativement inférieure pour les zones de services. En revanche, elle est légèrement supérieure pour les pièces principales. En effet, la température est à 18°C en moyenne durant 53% du temps pour la cuisine et la salle de bain. Pour la WC la fréquence est nettement moins importante (10%). Pour les pièces de service, la fréquence moyenne à 18°C est de 35%. Durant les périodes chaudes, les fréquences moyennes où la température atteint les 26°C est relativement similaire à celles obtenues dans le cas du système de ventilation VMC.



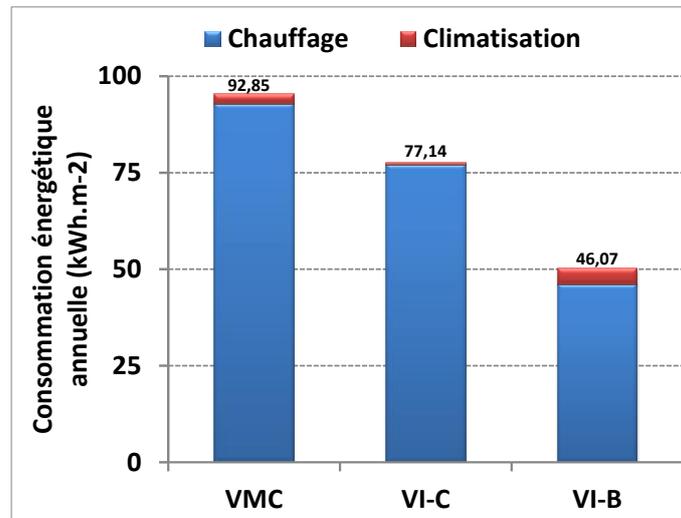
**Figure IV.50:** Distribution annuelle des niveaux des températures intérieures dans le cas de la VI à Balayage

Pour la stratégie de ventilation par insufflation à balayage, les fréquences d’occurrences pour la température limite basse (18°C) sont moins importantes (25% pour les pièces principales et 45% pour les zones humides) en comparaison aux autres systèmes de ventilations étudiés. Concernant la température limite haute (26°C), la fréquence moyenne est de 23% pour les pièces principales et de 8% pour les pièces de service.

Les résultats des distributions de température que nous avons obtenus se justifient par la stratégie de ventilation adoptée et le taux de renouvellement d'air correspondant. En effet, plus le renouvellement d'air est important plus les températures fluctuent et les déperditions s'accroissent. Cela permet de percevoir qualitativement l'influence de la stratégie de ventilation sur les consommations énergétiques.

#### IV.5.3.1.1.2 Consommations énergétiques

Pour le climat tempéré de La Rochelle, les besoins énergétiques, pour la régulation thermique de l'ambiance intérieure, sont principalement des consommations de chauffage. La Figure IV.51 présente les consommations énergétiques totales (chauffage et climatisation) pour les trois stratégies de ventilation étudiées.



**Figure IV.51:** Comparaison de la consommation énergétique annuelle pour les stratégies de ventilation étudiées

L'analyse des résultats montre que, pour les périodes hivernales, les besoins en chauffage pour la stratégie de ventilation par VMC est nettement plus importante par rapport aux deux autres systèmes de ventilation par insufflation (VI-C et VI-B). En effet, la consommation en chauffage annuelle dans le cas de la VMC est de 92 kWh.m<sup>-2</sup>, par contre dans le cas de VI-Centrale et la VI à Balayage, les besoins en chauffage sont respectivement de 80 kWh.m<sup>-2</sup> et de 50 kWh.m<sup>-2</sup>.

Les consommations estivales d'énergie dues à la climatisation sont nettement plus faibles à celles d'hiver dues au chauffage. Néanmoins, les résultats montrent que, durant les périodes estivales, les besoins de rafraîchissement sont de 4.1 kWh.m<sup>-2</sup> dans le cas de la VI à Balayage, de 2.5 kWh.m<sup>-2</sup> pour la VMC et 0.6 kWh.m<sup>-2</sup> pour la VI Centrale.

Ces résultats confirment les distributions de températures obtenues pour les trois systèmes de ventilation étudiés. Les écarts en consommation énergétique entre les cas de stratégies de ventilation sont expliqués par les valeurs importantes des taux de renouvellement d'air dans le cas de la VMC. En effet, l'air frais rentrant par les modules provoque une baisse de

température dans les ambiances intérieures dans pièces principales ce qui mène à une consommation d'énergie afin de contrôler la température intérieure en la réglant à celle de consigne. Aussi, l'extraction mécanique de l'air dans les zones humides conduit à une déperdition énergétique.

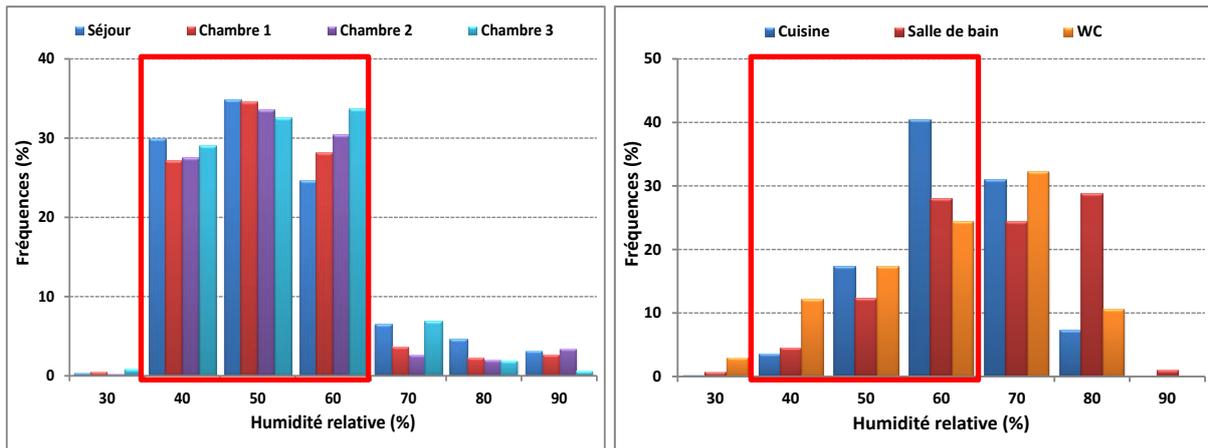
La comparaison des consommations d'énergie annuelles pour les trois systèmes de ventilation étudiés permet de conclure que la VI à balayage est la stratégie la plus performante, particulièrement pour les périodes froides, car son taux de renouvellement d'air est moins important que celui de la VMC. En revanche, un renouvellement d'air faible peut être pénalisant en termes de pathologies liées à une présence excessive d'humidité dans les ambiances intérieures.

Il faut noter aussi que la typologie du climat extérieur à une grande influence sur les consommations énergétiques. En effet, les résultats obtenus pour un climat tempéré de La Rochelle, montre que la VI à balayage est la plus performante en terme de besoin en chauffage, en revanche, c'est le système le plus énergivore durant les périodes chaudes. Cela permet de conclure que cette stratégie de ventilation ne peut être adéquate pour des climats chaud et humide tel que celui de Hong Kong.

#### *IV.5.3.1.2 Qualité de l'air intérieur (QAI)*

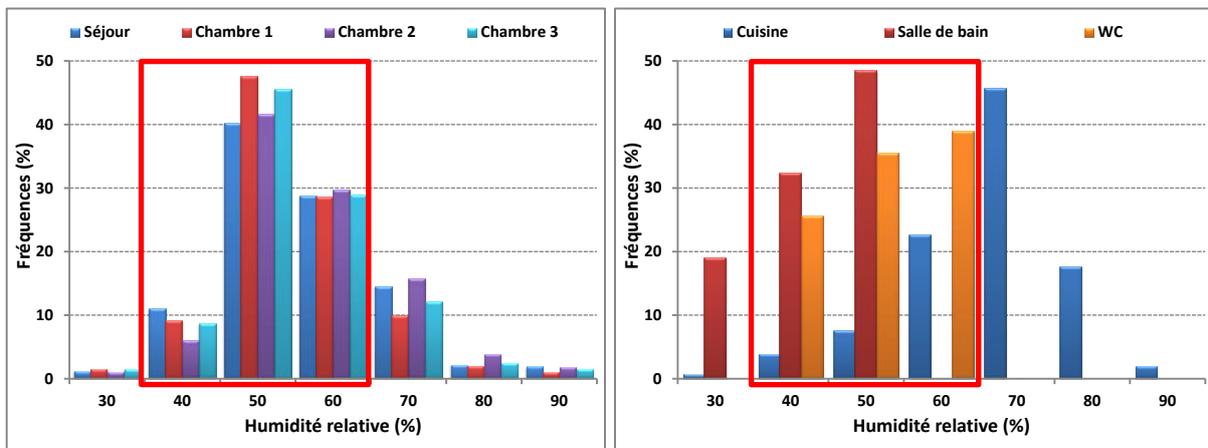
Dans les ambiances intérieures des bâtiments, les taux faibles ou élevés d'humidité relative sont favorables à la croissance de polluants, notamment une présence excessive de bactéries et des acariens. En se basant sur l'étude menée par Roulet (Roulet, 2004) sur la détermination des plages d'humidité favorables à la croissance des polluants, Il a été déduit que la plage d'humidité relative optimale pour une bonne qualité de l'air intérieur est celle comprise entre 40% et 60% .

Pour les trois stratégies de ventilation étudiées, les distributions des humidités relatives annuelles aux niveaux des pièces principales ainsi que dans les zones humides sont représentées dans les FigureIV.52, Figure IV.53 et Figure IV.54. Les humidités relatives ont été moyennées sur 6 heures.



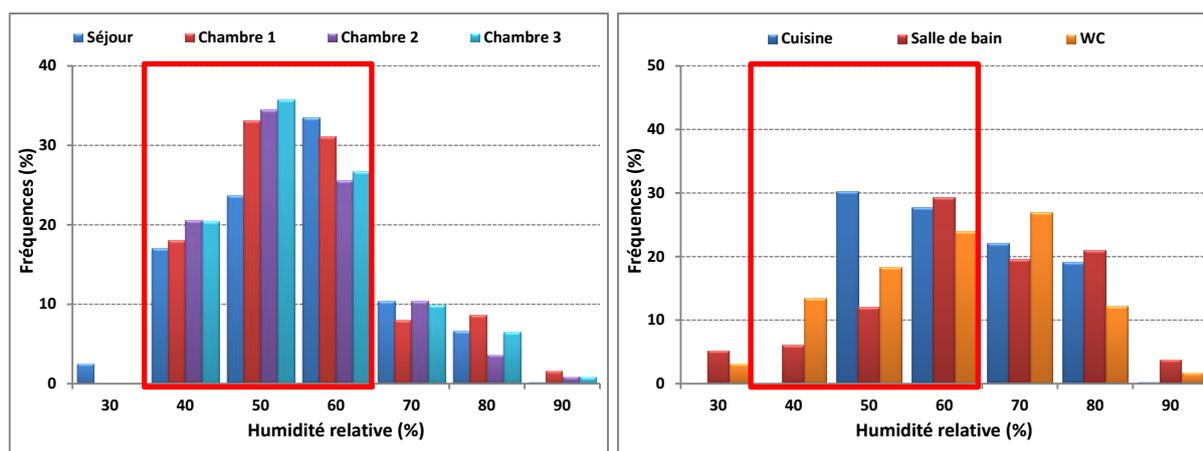
**Figure IV.52 :** Distribution annuelle des niveaux des humidités relatives intérieures dans le cas de la VMC

Dans le cas de la VMC, les résultats des distributions annuelles des humidités relatives montrent bien que, pour les pièces principales, une fréquence moyenne de 92% du temps (estimée sur une année) où les humidités relatives sont dans la plage optimale d'humidité relative (40%-60%). Pour les zones de service, une fréquence moyenne de 54% du temps où le critère de la qualité d'air intérieur est respecté. Cela est dû à la grande production de vapeur d'eau dans ces pièces.



**Figure IV.53:** Distribution annuelle des niveaux des humidités relatives intérieures dans le cas de la VI-Centrale

Concernant le cas de VI-centrale, le critère d'une bonne qualité d'air intérieur est respecté pendant 83% du temps dans les pièces principales. Cette fréquence est relativement inférieure à celle obtenue dans le cas de la VMC. Pour les zones humides, la distribution des humidités relatives ne sont pas les mêmes. Pour le WC, l'humidité relative est entre 40%-60% durant la totalité du temps de simulation. En revanche pour la cuisine et la salle de bain, où la production d'humidité est importante, le critère de la QAI est respecté respectivement durant 51% et 82% de l'année.



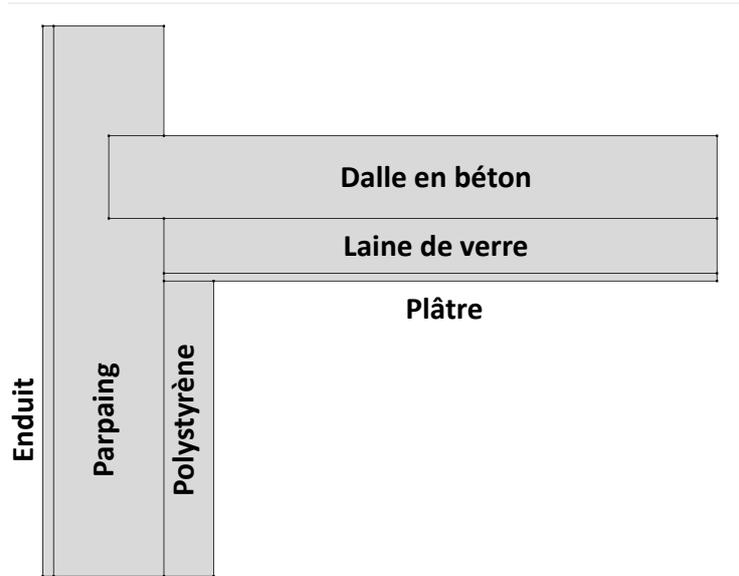
**Figure IV.54:** Distribution annuelle des niveaux des humidités relatives intérieures dans le cas de la VI à Balayage

Pour le cas de la VI à balayage, l'humidité relative est comprise entre 40% et 60% pour une fréquence moyenne de 79% pour les pièces principales, ce qui est relativement inférieur aux deux autres stratégies de ventilation. Concernant les pièces de service, le critère de QAI est respecté sur une fréquence moyenne de 53% du temps.

La différence de distribution des humidités relatives observée pour les trois stratégies de ventilation met en évidence l'intérêt du renouvellement d'air sur la qualité de l'air intérieur et la régulation des niveaux d'humidité relative dans les ambiances intérieures. En effet, le taux de renouvellement d'air pour la VMC est relativement supérieur par rapport à la VI centrale et la VI à balayage ce qui justifie la bonne régulation des humidités relatives, particulièrement pour les pièces principales.

#### IV.5.3.2 Risques de pathologies au niveau de l'enveloppe

Dans le bâtiment, le système de ventilation a un effet, à la fois, sur le comportement hygrothermique des ambiances habitables ainsi que sur les enveloppes du bâtiment. Cette partie s'intéresse à analyser l'impact des systèmes de ventilation sur l'apparition des pathologies liées à l'humidité dans la paroi. L'étude est menée sur une partie de l'enveloppe de la cuisine qui représente la zone la plus défavorable avec la plus grande production de vapeur d'eau dans la maison. La partie de paroi en question est le coin supérieur au niveau de la façade en contact avec l'environnement extérieur où l'apparition du pont thermique est plus probable (Figure IV.55).



**Figure IV.55** : La composition de la partie de paroi étudiée

#### IV.5.3.2.1 Risque de Fortes déperditions thermiques

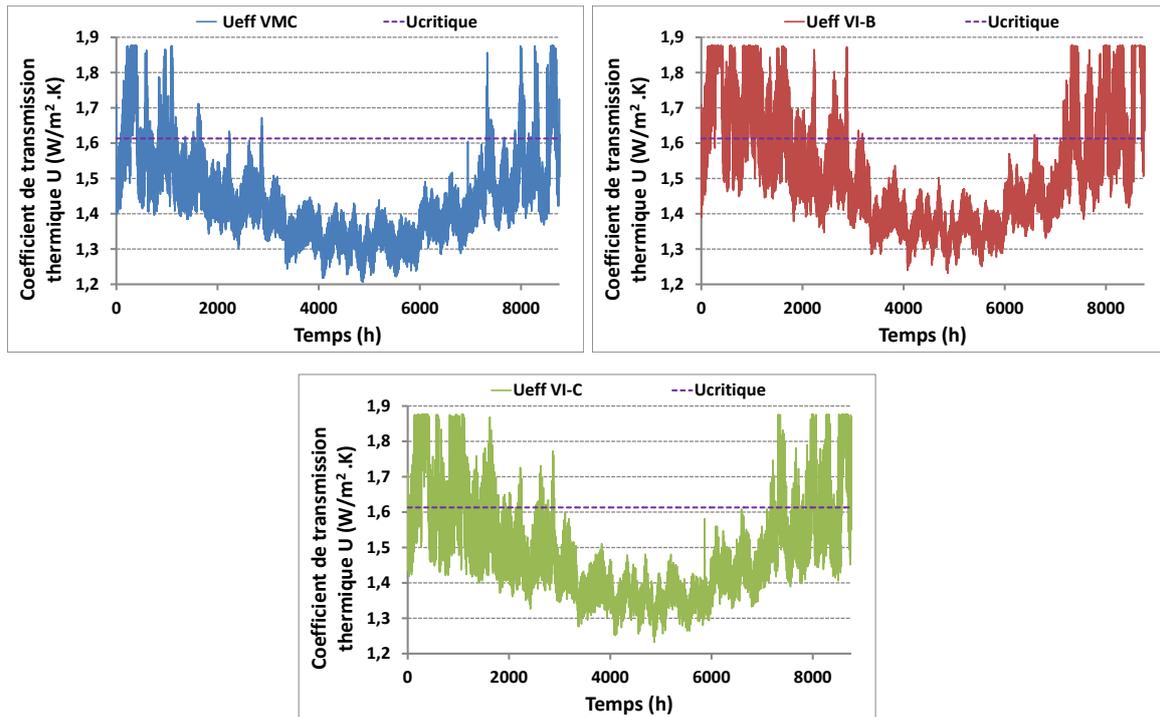
Une hausse de l'humidité au niveau de l'enveloppe peut provoquer de grande déperdition thermique, particulièrement en hiver, ce qui influe directement sur la consommation énergétique du bâtiment. Les risques de déperditions thermiques d'une paroi peuvent être évalués en comparant le coefficient de transfert thermique effectif de la paroi  $U_{eff}$ , calculé à partir des flux thermiques sensibles dans la paroi, avec le coefficient de transfert thermique calculé selon la norme EN 10456  $U_{nor}$  (HR=50% et T=23°C). En se basant sur les travaux de Berger et al (Berger et al., 2013), le critère d'apparition de pathologie est  $U_{eff} > U_{critique}$  avec  $U_{critique}$  représente une majoration du coefficient de transfert thermique  $U_{nor}$  de 5% ( $U_{critique} = 1.05 U_{nor}$ ).

C'est dans ce cas d'étude, qu'un pont thermique est étudié. Le calcul du coefficient de transfert thermique normalisé  $U_{nor}^{2D}$  est effectué en considérant les déperditions thermiques dues au pont thermique comme suit :

$$U_{nor}^{2D} = U_{nor}^{1D} + \frac{\psi \cdot L}{A} \quad \text{(IV.9)}$$

Avec  $U_{nor}^{1D}$  est le coefficient de transfert thermique pour une paroi 1D calculé selon la norme EN 10456,  $L$  est la longueur du pont thermique,  $A$  est la surface de la paroi,  $\psi$  est le coefficient de déperdition thermique linéique dû au pont thermique, il est déterminé selon les réglementations thermiques (Berger, 2014). Une valeur de  $\psi = 0.71 [W/(m \cdot K)]$  est suggérée pour la configuration de pont thermique étudiée.

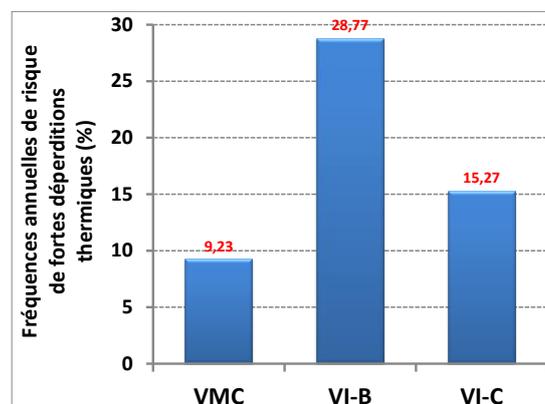
La Figure IV.56 représente l'évaluation annuelle du risque de déperdition thermique pour les stratégies de ventilation étudiées (VMC, VI-Centrale et VI à Balayage).



**Figure IV.56:** Evaluation annuelle de risque de déperdition thermique au niveau de l’enveloppe

L’analyse des résultats montre que les risques de fortes déperditions thermiques sont observés dans la période hivernale où le climat extérieur est froid avec un taux d’humidité relative élevé ce qui illustre bien la grande influence de l’environnement extérieur sur l’apparition des pathologies liées à l’humidité.

Cependant la comparaison des résultats entre les trois systèmes de ventilation montre que la fréquence annuelle d’apparition de risques de fortes déperditions thermiques diffère d’un système de ventilation à un autre. La Figure IV.57 montre les fréquences annuelles d’apparition des risques de déperditions thermiques.



**Figure IV.57:** Comparaison des fréquences annuelles de risque de fortes déperditions thermiques pour les trois systèmes de ventilation étudiés

Pour la VMC, le risque d'une forte déperdition thermique est probable durant 9% de l'année. En revanche, pour les systèmes de ventilation par insufflation les risques de déperdition thermique sont plus fréquents avec un pourcentage annuel de 15% pour la VI centrale et de 27% pour la VI à balayage. Ce résultat peut se justifier par la différence du comportement hygrothermique au niveau de la cuisine qui dépend du système de ventilation utilisé. Le système de ventilation a un effet indirect sur le comportement hygrothermique de l'enveloppe. En effet, le système de ventilation utilisé et son taux de renouvellement d'air intérieur influe directement sur les conditions thermique et hydrique des ambiances intérieures qui sont considérées comme des conditions aux limites intérieures de l'enveloppe.

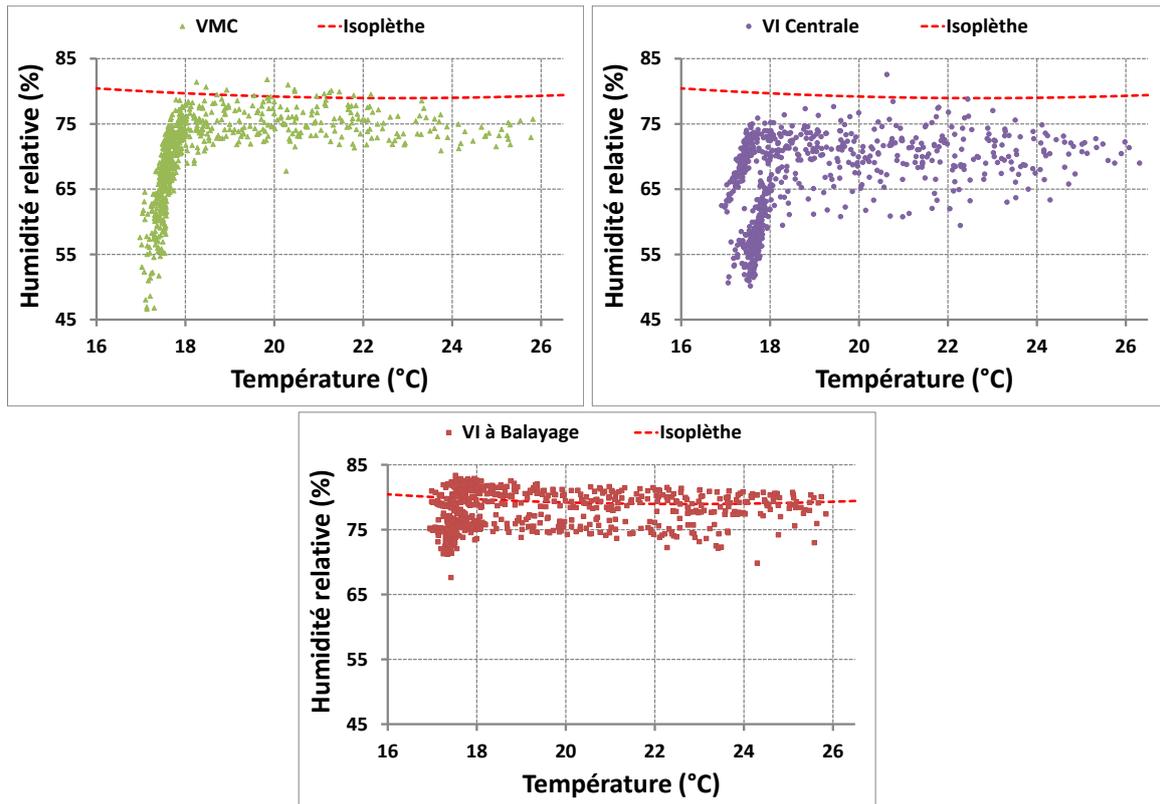
#### *IV.5.3.2.2 Risque de développement fongique*

Une présence excessive de l'humidité à la surface de la paroi peut favoriser l'apparition et le développement de plusieurs organismes biologiques tels que les bactéries et les champignons. Plusieurs modèles de développement de moisissures ont été développés dans la littérature. Dans ce cas d'étude le modèle des courbes isoplèthes proposé par Hens (Hens, 1995) et (IEA-Annex 14, 1990) a été utilisé. C'est un modèle dynamique basé sur la variation du couple température et humidité relative au cours du temps. Les valeurs critiques des humidités relatives pour la courbe des isoplèthes (le champignon *Aspergillus versicolor*) sont déterminées selon la relation suivante :

$$HR_{\text{critique}} = 0.033T^2 - 1.5T + 96 \quad (\text{IV.10})$$

Où  $T$  est la température en [°C] et  $HR_{\text{critique}}$  est l'humidité relative critique exprimée en [%].

Les courbes isoplèthes (pour l'évaluation du développement fongique) qui ont été obtenues pour les trois stratégies de ventilation sont représentées dans la Figure IV.58. Les températures et les humidités relatives sont moyennées sur 12 heures.



**Figure IV.58:** Evaluation du risque du développement fongique sur la surface intérieure pour les stratégies de ventilation étudiées

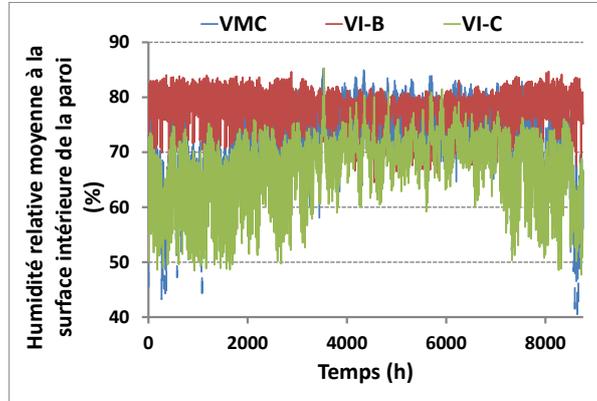
La comparaison des risques d'apparition fongique, entre les trois systèmes de ventilation étudiés, montre que les risques sont plus importants pour le système de ventilation par insufflation à balayages. Pour les deux autres stratégies de ventilation (VMC et VI centrale) la probabilité du développement fongique est presque nulle. Comme pour les autres pathologies, ces résultats sont justifiés par le taux de renouvellement d'air proposés par chacun des systèmes de ventilation étudiés.

#### IV.5.3.2.3 Risque de condensation

Dans une ambiance habitable, une surproduction de vapeur d'eau avec un taux de renouvellement d'air faible peut induire des valeurs des humidités relatives très élevées et ce pour des durées importantes. Ces conditions sont favorables à l'apparition des phénomènes de condensation à la surface intérieure de la paroi.

Dans la littérature, hormis, la méthode simplifiée de Glaser, il n'existe pas de critères clairs pour l'évaluation des risques de condensation, particulièrement pour des durées d'occurrences des valeurs des humidités relatives qui stagnent à 100%. Dans cette étude, une humidité relative à 100%, à la surface de l'enveloppe, pour une durée de 6 heures est considérée comme un critère de risque de condensation à la surface de la paroi. La Figure IV.59 représente l'évaluation des risques de condensation à la surface du composant de la paroi étudié durant toute l'année.

Les résultats montrent que la probabilité d’avoir des phénomènes de condensation est nulle pour les trois stratégies de ventilation étudiées. Néanmoins, l’humidité relative à la surface est relativement supérieure, durant toute l’année, dans le cas de la VI à balayage par rapport aux deux autres systèmes (VMC et VI centrale).



**Figure IV.59:** Evaluation des risques de condensation à la surface du composant de paroi étudié

## IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une approche de co-simulation dynamique HAM-BES a été développée. Le couplage des modèles HAM et BES a été réalisé grâce à la mise en place d’une plateforme de co-simulation où les deux outils de simulation, TRNSYS (BES) et COMSOL (HAM) ont été couplés pour une simulation dynamique des transferts couplés de chaleur, d’air et d’humidité dans les bâtiments. Le modèle de transferts hygrothermique au niveau de l’enveloppe, considéré dans la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES, prend en compte la variation des propriétés des matériaux en fonction de leur état hydrique. On outre, les moteurs de transferts choisis, particulièrement pour le transfert hydrique, sont adaptés à la modélisation des transferts hygrothermiques dans les parois multicouches (variables continues).

La validation de la plateforme de co-simulation HAM-BES a été entreprise d’une part en confrontant les résultats obtenus par la plateforme à une solution analytique et d’autre part à des résultats expérimentaux issus des travaux réalisés dans le cadre de l’annexe 41 de AIE. Peu d’écarts ont été constatés pour le comportement hydrique avec une différence moyenne de 3.7% d’humidité relative. En revanche, des écarts importants ont été observés concernant la prédiction de la consommation énergétique où la différence moyenne par rapport aux données expérimentales est d’environ 100W.

De plus, une validation expérimentale au niveau du laboratoire a été entreprise. Cette validation a été réalisée en utilisant les résultats collectés du banc expérimental que nous avons développé au laboratoire qui est dédié à l’étude du comportement hygrothermique des parois à une échelle intermédiaire ( $1 \text{ m}^2$ ) sous des sollicitations contrôlées.

Les résultats obtenus ont montrés le bon fonctionnement de la plateforme de co-simulation HAM-BES dans la prédiction du comportement hygrothermique, à la fois au niveau de l'ambiance et de l'enveloppe du bâtiment. Les écarts entre les résultats numériques et expérimentaux au niveau de la paroi sont de l'ordre de 1 à 2°C pour la température et ente 1% et 3% pour l'humidité relative. Ces résultats illustres bien que l'utilisation de propriétés hygrothermiques fiable (ce qu'est le cas pour le bois aggloméré où les principales propriétés hygrothermiques ont été mesurées au laboratoire (voir chapitre III)) lors de la simulation numérique améliore fortement la qualité de la prédiction du comportement hydrique et thermique de la paroi.

Par ailleurs, un cas d'étude a été réalisé dans le but d'étudier l'impact des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans l'enveloppe sur comportement hygrothermique et énergétique du bâtiment. L'analyse des résultats a montré que les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité ont un effet significatif sur la prédiction du comportement thermique et hydrique des ambiances habitables ainsi que sur les besoins énergétiques. Cet effet a été observé pour différents types de climats où la différence en termes de consommation énergétique entre un modèle de TRNSYS qui ne tient pas compte des transferts hygrothermiques à travers l'enveloppe et la plateforme de co-simulation HAM-BES développée atteint les 28% pour le climat de La Rochelle, 12% pour Berlin et les 21% pour un climat chaud et humide de Hong Kong.

En outre, ce même cas d'étude a permis de mettre en exergue l'impact d'une interaction dynamique HAM-BES sur la prédiction du comportement hygrothermique des composants de l'enveloppe. En effet, il a été montré que dans le cas où le couplage dynamique entre le modèle HAM et celui de BES pouvait affecter la qualité de la prédiction de la réponse hygrothermique d'une paroi de bâtiment. Et de ce fait, ceci sera responsable d'une mauvaise évaluation des désordres causés par l'humidité au niveau de l'enveloppe.

Enfin, la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES a été couplée à CONTAM qui représente un outil de modélisation aéraulique. Ce couplage a permis d'étendre l'étude thermohydrique au niveau du bâtiment à une étude thermo-hygro-aéraulique. Cette démarche a été réalisée dans l'objectif d'atteindre une analyse multicritères de différentes stratégies de ventilation (bâtiments résidentiels) pour réduire et contrôler d'éventuelles pathologies causées par une présence excessive d'humidité (au niveau de l'enveloppe et/ou de l'environnement intérieur du bâtiment). Dans cette analyse comparative, trois systèmes de ventilations ont été confrontés : une ventilation mécanique par extraction (VMC) et deux systèmes de ventilation par insufflation (VI), une centrale et l'autre à balayage. Il a été évalué l'efficacité de chacune des techniques eu égard à des critères de performance énergétique, de qualité de l'air intérieur et d'apparition de pathologies (déperditions, consommation énergétique, qualité de l'air intérieur, croissance fongique...). Pour un climat tempéré de La Rochelle, l'analyse des résultats a montré qu'une stratégie de ventilation par insufflation, particulièrement la VI-à balayage, est plus performante par rapport à une stratégie de ventilation par extraction (VMC)

en termes de consommations énergétiques. Cependant, en s'intéressant aux risques d'apparitions de pathologies liées à l'humidité, une ventilation par extraction mécanique s'avère plus efficace en proposant une meilleure qualité d'air intérieur ainsi qu'une faible probabilité d'apparition de désordres causés par l'humidité par rapport à un système de ventilation par insufflation (VI-centrale où VI-à balayage).



# Conclusions générales et perspectives

Ce travail de thèse s'intègre dans le cadre du projet ANR-HUMIBATex « Comment prédire les désordres causés par l'humidité ? Quelles solutions techniques pour rénover le bâti existant ? ». Il a pour effet le développement d'une démarche de modélisation théorique et expérimentale des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à différentes échelles : matériau-paroi-enveloppe et ambiance du bâtiment. L'objectif principal de ce travail est double :

- Mieux appréhender l'impact des transferts hygrothermiques et aérauliques sur la performance énergétique des bâtiments ;
- Améliorer la prédiction de l'apparition des désordres causés par l'humidité dans des bâtiments neufs ou réhabilités.

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse a été organisé autour de quatre parties :

Dans un premier temps nous avons dressé un état de l'art, constituant ainsi le premier chapitre, qui porte sur les pathologies liées à l'humidité dans le bâtiment. Ces dégradations ont été classées dans deux catégories selon leurs localisations. En effet, celles-ci peuvent apparaître soit au niveau de l'ambiance habitable comme la détérioration de la qualité de l'air intérieur, soit au niveau de la paroi comme la hausse des déperditions thermiques, la variation dimensionnelle ou le développement d'agents biologiques. Les modèles de prédiction des différentes pathologies liées à l'humidité, et qui ont été recensés dans cette recherche bibliographique, sont basés sur la détermination des champs de température et d'humidité relative. Cette étude a mis en évidence la nécessité d'assurer une bonne prédiction des transferts hygrothermiques au niveau des bâtiments.

Dans un second temps, un modèle phénoménologique des transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans les parois multicouches de bâtiment a été proposé, dans le deuxième chapitre. La température, la pression de vapeur d'eau et la pression totale ont été choisies

respectivement comme moteurs de transfert thermique, hydrique et d'air. Ce choix a été entrepris afin de s'affranchir des problèmes de discontinuité aux niveaux des interfaces entre les différentes couches de la paroi. En effet les moteurs de transferts utilisés sont des variables d'état non tributaires des caractéristiques microstructurales des matériaux. Cela a permis de justifier l'hypothèse de continuité des variables de transferts hygrothermiques au niveau des interfaces entre les couches de parois. D'un autre côté, le modèle de transfert de chaleur, d'air et d'humidité élaboré prend en considération la variation des propriétés hygrothermiques en fonction de l'état hydrique et thermique des matériaux, notamment la perméabilité à la vapeur d'eau, la capacité de stockage d'humidité pour le transfert hydrique et la conductivité thermique et la chaleur spécifique pour le transfert de chaleur.

Par la suite, deux démarches de validation ont été entreprises afin de vérifier l'aptitude du modèle à prédire fidèlement le comportement hygrothermique des matériaux d'enveloppe du bâtiment soumis à des sollicitations dynamiques. La première validation consistait en une comparaison par rapport à une solution analytique. En effet, le modèle de transfert hygrothermique a été implémenté dans un logiciel de simulation multi physique « Comsol Multiphysics » qui a été utilisé comme solveur du système d'équations différentielles fortement couplées traduisant les transferts hygrothermiques dans les parois de bâtiments. Ainsi, l'objectif de cette validation se résumait dans la vérification de la précision numérique obtenue par l'outil de simulation utilisé, en comparaison avec une solution analytique exacte. Les résultats ont montré une bonne concordance entre les solutions analytiques et numériques. Dans la deuxième validation, nous confrontons des données expérimentales avec les résultats issus de la simulation numérique. Des essais ont été réalisés au laboratoire sur quatre configurations de composants multicouches de paroi de bâtiment à une petite échelle. La comparaison entre les données numériques et expérimentales a confirmé l'aptitude du modèle de transfert hygrothermique élaboré à prédire finement le comportement thermique et hydrique des parois de bâtiments.

Au final, une étude de sensibilité des paramètres d'entrée du modèle de transfert hygrothermique sur la prédiction des champs de température, de pression de vapeur et d'humidité relative a été entreprise. Cette étude s'est focalisée sur les propriétés hygrothermiques des matériaux, la conductivité thermique et la chaleur spécifique pour le transfert thermique et la perméabilité à la vapeur d'eau et la capacité de stockage d'humidité pour le transfert hydrique. Cette étude a permis d'illustrer la grande incidence de la variation des propriétés hydriques et thermophysiques sur la réponse hygrothermique des enveloppes de bâtiments. Cela a permis de mettre l'accent sur l'importance d'une bonne caractérisation hygrothermiques des matériaux de construction.

Le troisième chapitre a été consacré à une campagne de caractérisation expérimentale des principales propriétés physiques, hydriques et thermophysiques des matériaux de construction. Dans ce travail, une évaluation des propriétés hygrothermiques en fonction de la teneur en eau et la température des matériaux a été étudiée. L'analyse des résultats a montré

que l'ordre de grandeur des propriétés hydriques et thermophysiques dépend fortement de la nature microstructurale du milieu poreux. De plus, les états hydrique et thermique du matériau ont une grande influence sur les valeurs des propriétés hygrothermiques. En effet, les résultats obtenus quant à l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau ont démontré que cette la conductivité thermique augmente fortement. Pour les matériaux hygroscopiques comme le bois aggloméré, la hausse de la conductivité thermique entre l'état sec et saturé atteignait les 150%. Ces résultats ont mis en évidence l'importance de la considération de ces variations dans les modèles de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments afin d'atteindre un degré supérieur dans la prédiction des réponses hygrothermiques des enveloppes de bâtiments et par conséquent une meilleure évaluation des risques liées à l'humidité.

Dans le but d'intégrer l'impact des transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe dans la simulation dynamique du bâtiment, une démarche de co-simulation dynamique, entre un modèle de transfert hygrothermique dans l'enveloppe (HAM) et un modèle de simulation énergétique des bâtiments (BES) a été développé dans le quatrième chapitre. La co-simulation dynamique a été réalisée en couplant deux logiciels, Comsol Multiphysics pour le modèle HAM et TRNSYS pour le modèle BES, la liaison entre les deux outils a été assurée par le biais de Matlab, qui est considéré comme un outil intégrateur dans la plateforme de co-simulation HAM-BES élaborée.

Par la suite, différentes validations de la plateforme de co-simulation HAM-BES ont été réalisées en se basant sur les travaux menés dans le cadre de l'annexe 41 de l'agence internationale de l'énergie. La confrontation des résultats de simulation, obtenus d'une part par la plateforme de co-simulation HAM-BES et via le logiciel TRNSYS d'autre part (où la modélisation hygrothermique au niveau de la paroi est prise en compte grâce aux données expérimentales), a montré que la considération des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à travers la paroi affine considérablement la prédiction du comportement hygrothermique des ambiances habitables.

Dans la même démarche, un banc expérimental a été monté au LaSIE afin de réaliser une validation expérimentale de la plateforme de co-simulation HAM-BEE à une échelle intermédiaire où les conditions aux limites sont rigoureusement contrôlées. La comparaison entre les données numériques et expérimentales a vérifié le bon fonctionnement de la plateforme de co-simulation HAM-BES, particulièrement au niveau de la paroi où ces résultats ont permis ainsi de valider le type de couplage (couplage indirect) entre les deux modèles HAM et BES.

Pour étudier l'impact des transferts couplés de chaleur et de masse au niveau de l'enveloppe sur le comportement hygrothermiques des ambiances habitables ainsi que sur la prédiction des consommations énergétiques au niveau du bâtiment, un cas d'étude a été réalisé. Ce travail a permis de mettre en évidence l'influence d'une interaction dynamique entre les modèles

HAM et BES sur la prédiction du comportement hygrothermique à la fois de l'ambiance et de l'enveloppe du bâtiment. À titre d'exemple, pour un climat de La Rochelle, la différence en termes de consommation en chauffage entre un modèle de TRNSYS et la plateforme de co-simulation HMA-BES (modèle HAM en 1D) est de 28%. Cette différence est plus grande (36%) lorsque les effets multidirectionnels des transferts hygrothermiques au niveau de l'enveloppe sont considérés (modèle HAM en 2D).

Finalement, la plateforme de co-simulation HAM-BES a été couplée avec un outil de simulation aéraulique « Contam » afin d'étendre l'étude à une étude thermo-hydro-aéraulique du bâtiment. Cette démarche a été appliquée sur un cas d'étude dans l'objet d'analyser la performance de différentes stratégies de ventilation (ventilation mécanique par extraction, ventilation mécanique par insufflation centrale et à balayage) par rapport à la réduction et le contrôle des pathologies liées à l'humidité aux niveaux de l'enveloppe et l'ambiance du bâtiment. Les résultats de cette étude ont montré qu'une stratégie de ventilation par insufflation, particulièrement la VI à balayage est plus performante en termes de consommations énergétiques par rapport à une ventilation par extraction. En revanche, un système de ventilation par insufflation est moins efficace par rapport à une stratégie de ventilation par extraction en termes de risque d'apparition de pathologies liées à l'humidité.

Les conclusions tirées des travaux réalisés dans cette étude ont permis de mettre en avant plusieurs perspectives tant au niveau du développement de la démarche de modélisation adoptée, qu'au niveau expérimentale à différentes échelles.

En effet, l'évaluation des désordres causés par l'humidité est basée sur des indicateurs de durabilité définis en fonction des champs de température et d'humidité. Cependant, plusieurs critères d'apparition de pathologies sont fondés sur des études expérimentales, menées sur des matériaux bien précis et qui ne peuvent être généralisés sur tous les autres matériaux de constructions. Pour cela, une investigation s'avère incontournable sur la détermination des caractéristiques des matériaux nécessaires pour la prédiction des risques liés à l'humidité tout en proposant des bases de données avec des critères bien définis.

Les différentes validations expérimentales réalisées ont montré que les erreurs sont relativement plus importantes au niveau des profils hydriques. Ces constatations ont permis de mettre l'accent sur la nécessité d'une description plus approfondie des transferts hydriques à la fois par la considération des phénomènes d'hystérésis ainsi qu'une meilleure prédiction du lien entre la teneur en eau du matériau et l'humidité relative particulièrement dans le cas dynamique où un changement brusque des conditions aux limites est imposé. En effet, les courbes d'isotherme d'adsorption et de désorption sont déduites expérimentalement en régime d'équilibre. Cependant, selon plusieurs travaux réalisés dans ce sens, comme l'étude de (Scheffler and Plagge, 2011), où les auteurs ont montré que les courbes d'adsorption mesurées en régimes dynamiques varient fortement à celle mesurées dans un régime stationnaire. Sur la base de ces constatations, proposer une modélisation en s'affranchissant de l'hypothèse d'un

équilibre thermodynamique local peut améliorer la prédiction du comportement hygrothermique des parois de bâtiments. Bien que complexe, cette piste pourrait apporter des éléments nouveaux à l'étude des transferts hygrothermiques dans les parois de bâtiments.

Par ailleurs, les résultats de la campagne de caractérisation expérimentale des différentes propriétés hygrothermiques ont montré que les valeurs de ces propriétés varient fortement avec l'état hygrothermique du matériau et par conséquent la prise en compte de ces variations peut améliorer considérablement la prédiction de la réponse hygrothermique des parois de bâtiments. A la base de ces résultats, un enrichissement des bases données serait intéressant, en termes de propriétés hydriques et thermophysiques et leur variation en fonction de la température et la teneur en eau ainsi que l'âge du matériau qui représente un paramètre important lors des études de réhabilitations énergétiques des anciens bâtiments.

Concernant la plateforme de co-simulation développée, une intégration d'une approche probabiliste permettant de prendre en compte à la fois des variabilités spatiales et temporelles des propriétés intrinsèques des matériaux pourrait améliorer la prédiction des désordres causés par l'humidité. Ceci permettrait de collecter davantage d'informations sur les parties d'enveloppes où une apparition de pathologies est plus susceptible.

En outre, l'extension de la démarche de co-simulation élaborée à l'interface bâtiment-microclimat urbain constituerait une piste intéressante permettant de prendre en compte dans la simulation du comportement hygrothermique, l'évaluation des besoins énergétiques et des interactions entre le bâtiment (couplé à un modèle de transfert hygrothermique de la paroi) et le microclimat d'une rue, voire d'un quartier entier.



# Références bibliographiques

- Abahri, K. (2012). Modeling of coupled heat, air and moisture transfer in porous building materials. La Rochelle University.
- Abahri, K., Belarbi, R., and Trabelsi, A. (2011). Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials. *Building and Environment*. 46, 1354–1360.
- Abahri, K., Belarbi, R., Oudjehani, N., Issaadi, N., and Ferroukhi, M. (2013). Total Pressure Gradient Incidence on Hygrothermal Transfer in Highly Porous Building Materials. *Advanced Materials Research* 772, 124–129.
- Abbasi, V., Sauvat, N., and Dubois, F. (2006). Variation d'humidité dans les assemblages de structure bois : modèle numérique pour l'actualisation des propriétés mécaniques du bois. Conférence AUGC, Grande motte.
- Adan, O. (1994). On the fungal defacement of interior finishes. Ph D Courses, Netherlands.
- AFGC (2007). GrandDuBé: Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons (Presses Ponts et Chaussées).
- Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat. & Collombet (1989). L'Humidité des bâtiments anciens: causes et effets, diagnostic et remèdes Paris (Edition du Moniteur).
- Aït Ouméziane, Y. (2013). Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre. Génie Civil. Université Européenne de Bretagne.
- Aït-Mokhtar, A., Amiri, O., Poupard, O., and Dumargue, P. (2004). A new method for determination of chloride flux in cement-based materials from chronoamperometry. *Cement and Concrete Composites*. 26, 339–345.
- Andrade, C., and Alonso, C. (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction Building Materials*. 10, 315–328.
- Andrés, A., Díaz, M.C., Coz, A., Abellán, M.J., and Viguri, J.R. (2009). Physico-chemical characterisation of bricks all through the manufacture process in relation to efflorescence salts. *Journal of the European Ceramic Society*. 29, 1869–1877.
- Arnold, A., and Zehnder, K. (1987). Monitoring Wall paintings Affected by Soluble Salts. *The Conservation of Wall Paintings*.
- ASTM (2005). Annual book of standards, E 96, Standard test method for water vapour transmission of materials. Philadelphia, 2005.
- ATILH (2008). La durabilité des bétons.
- Ayerst, G. (1969). The effect of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. *J Stored Prod. Res* 5, 127–141.

- Baughman, A., and Arens, E. (1996). Indoor Humidity and Human Health-Part I: Literature Review of Health Effects of Humidity-Influenced Indoor Pollutants. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE
- Beck, K., Al-Mukhtar, M., Rozenbaum, O., and Rautureau, M. (2003). Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire valley—France. *Building and Environment*. 38, 1151–1162.
- Belarbi, R., Ghiaus, C., and Allard, F. (2006a). Modeling of water spray evaporation: Application to passive cooling of buildings. *Solar Energy* 80, 1540–1552.
- Belarbi, R., Aït mokhtar, A., Qin, M., and Omikrine, O. (2006b). Development of simplified approach to model the moisture transfer in building materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 10, 1033–1048.
- Belarbi, R., Qin, M., Aït mokhtar, A., and Nilsson, L.-O. (2008). Experimental and theoretical investigation of non-isothermal transfer in hygroscopic building materials. *Building and Environment*. 43, 2154–2162.
- Bellini, D.J. (1992). ransport d'humidité en matériau poreux en présence d'un gradient de température. Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire (Université de Grenoble).
- Berger, J. (2014). Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : Application des méthodes de réduction de modèle. Thèse en Génie Civil. Université de Grenoble.
- Berger, J., Tasca-Guernouti, S., Woloszyn, M., and Chatrine, B. (2013a). L'humidité dans les bâtiments: Pathologies et paramètres gouvernants. (Chambery, France),.
- Berger, J., Rouchier, S., Tasca-Guernouti, S., Woloszyn, M., and Buhe, C. (2013b). On the integration of hygrothermal bridges into whole building and HAM modeling. (Chambery, France),.
- Blocken, B., and Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 92, 1079–1130.
- Bouddour, A., Auriault, J., and Mhamdi-Alaoui, M. (1998). Heat and mass transfer in wet porous media in presence of evaporation-condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 41, 2263–2277.
- Bourbatache, K. (2009). Modélisation du transfert des ions chlorures dans les matériaux ci- mentaires par homogénéisation périodique. Thèse en Génie Civil. Université de La Rochelle.
- Boutin-Forzano, S., Charpin-Kadouch, C., Chabbi, S., Bannedjai, N., Dumon, H., and Charpin, D. (2004). Wall relative humidity: a simple and reliable index for predicting *Stachybotrys chartarum* infestation in dwellings. *Indoor Air* 14, 196–199.
- Brager, G, and De Dear, R. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*. 27, 1025-1038.
- Burke, W., Gabriels, D., and Bouma, J. (1986). Soil structure assessment. Rotterdam/Boston.
- Burr, M., Matthews, I., Arthur, R., Watson, H., Gregory, C., and Dunstan, F.D. (2007). Effects on patients with asthma of eradicating visible indoor mould: a randomised controlled trial. *Thorax*. 62, 767–772.
- Caro, F. (2004). Modélisation et simulation numérique des transitions de phase liquide vapeur. Thèse en Génie Civil. Ecole Polytechnique.
- Carter, M. (1993). Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers.
- Chang, W.-J., and Weng, C.-I. (2000). An analytical solution to coupled heat and moisture diffusion transfer in porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 43, 3621-3632.
- Clarke, J. (2001). Energy simulation in building design. Ph D courses, Oxford.
- Clarke, J. (2013). Moisture flow modelling within the ESP-r integrated building performance simulation system. *Journal of Building Performance Simulation*. 6, 385–399.
- Clarke, J.A., Johnstone, C.M., Kelly, N.J., McLean, R.C., Rowan, N.J., Smith, J.E., and others (1999). A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings. *Building and Environment*. 34, 515–521.

- Cognard, P. (2002). Calfeutrement des joints dans le bâtiment. Généralités. Techniques de l'Ingénieur. C 3660.
- Coignet, J. (2006). La maison ancienne Nouvelle Edition. Paris Eyrolles.
- Collet, F. (2004). Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faible impacts environnementaux. Thèse en Génie Civil, INSA Rennes.
- Comsol Multiphysics (2012). User's Guide.
- Cóstola, D., Blocken, B., and Hensen, J. (2009). External coupling between BES and HAM programs for whole-building simulation. (Glasgow), pp. 316–323.
- Crausse, P., Laurent, J., and Perrin, B. (1996). Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux : Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrrique de parois de bâtiment. *Revue Générale de Thermique*. 35, 95–106.
- Daian, J. (1986). Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau meso et macroporeux : étude expérimentale du mortier de ciment. Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- Daïan, J.-F. (2013a). Équilibre et transferts en milieux poreux, Première partie. Université Joseph Fourier. pp. 642 .
- Daïan, J.-F. (2013b). ÉQUILIBRE ET TRANSFERTS EN MILIEUX POREUX, Deuxième partie. Université Joseph Fourier.
- De Freitas, V.P., Abrantes, V., and Crausse, P. (1996). Moisture migration in building walls— Analysis of the interface phenomena. *Building and Environment*. 31, 99–108.
- Delmon, B. (1969). Introduction à la cinétique hétérogène. Institut français du pétrole.
- Derluyn, H. (2006). Salt Transport and crystallization in porous limestone : neutron - X-ray imaging and poromechanical modeling. Ph D courses, Génie Civil. KatholiekeUniversiteit Leuven.
- Dos Santos, G.H., and Mendes, N. (2009). Heat, air and moisture transfer through hollow porous blocks. *Int. J. Heat Mass Transf.* 52, 2390–2398.
- DTU 68.1 (1995). NF XP P50-410 Installations de ventilation mécanique contrôlée - Règles de conception et de dimensionnement. URL <http://www.bdd-avsconcept.fr/animateur/dtu/DTU/7670000>.
- Dullien, F. (1979). Porous media : fluid transport and pore structure. Academic press.
- Duong, D.. (1998). Adsorption analysis : Equilibria and kinetics. *Chemical engineering*. 2, 265-281.
- Erriguible, A., Bernada, P., Couture, F., and Roques, M. (2006). Simulation of convective drying of a porous medium with boundary conditions provided by CFD. *Chemical Engineering Research and Design*. 84, 113–123.
- Espinosa, R.M., Franke, L., and Deckelmann, G. (2008). Model for the mechanical stress due to the salt crystallization in porous materials. *Construction and Building Materials*. 22, 1350–1367.
- Fang, L., Clausen, G., and Fanger, P. (2000). Temperature and Humidity: Important Factors for Perception of Air Quality and for Ventilation Requirements. *ASHRAE Transaction*. 106.
- Ferroukhi, M.Y., Belarbi, R., and Limam, K. (2014). Effect of Hygrothermal Transfer on Multilayer Walls Behavior, Assessment of Condensation Risk. *Advanced Materials Research*. 1051, 647–655.
- Ferroukhi, M.Y., R. Belarbi, K. Limam, and M. Potard (2014). Incidence des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité sur la qualité des ambiances habitables. Conférence AUGC (France).
- Friedmann, H., Amiri, O., and Aït-Mokhtar, A. (2008). Physical modeling of the electrical double layer effects on multispecies ions transport in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 38, 1394–1400.
- Funk, M., and Wakili, K.G. (2007). Driving Potentials of Heat and Mass Transport in Porous Building Materials: A Comparison Between General Linear, Thermodynamic and Micromechanical Derivation Schemes (Transport Porous Media).

- Galbraith, G., Guo, J., McLaeen, R., Lee, C., and Kelly, D. (2000). The effect of temperature on the moisture permeability of building materials. *Building Research Informations*. 28, 249–259.
- Gertis, K. (1991). Increased insulation in building - a way to avoid the coming change in climates? *Colloque Bauphysiks*. 13, 132–137.
- Goudie, A., and Viles, H. (1997). *Salt Weathering Hazards*. John Wiley Sons.
- Green, G. (1985). Indoor relative humidity in winter and the related absenteeism. *ASHRAE Transaction*. 91.
- Green, D., and Kreschmann, D. (1994). Moisture content and the properties of clear Southern Pine, Res. FPL-RP-531. Madison, WI: U.S. Department of agriculture, Forest Service, Products Laboratory.
- Hans Janssen (2011). Thermal diffusion of water vapour in porous materials: Fact or fiction? *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 54, 1548–1562.
- Hedenblad, G. (1996). Material data for moisture transport calculations (in Swedish material data for fuk transport beräkningar). (Stockholm: Byggeforskningsradet),.
- Hens, H. (1995). Fungal defacement in buildings, a performance related approach. *International Journal Heating Ventilation Air-Conditioning Refrigerat Research* 5, 265–289.
- Holm, A., Künzeli, H., and Sedlbauer, K. (2003). The hygrothermal behaviour of rooms: Combining thermal building simulation and hygrothermal envelope calculation. (Eindhoven, Netherlands),.
- Hukka, A., and Viitanen, H. (1999). A mathematical model for mould growth on wooden material. *Wood Science Technology* 33, 475–485.
- IEA-Annex 14 (1990a). Condensation and energy (Leuven, Belgique).
- IEA-Annex 14 (1990b). Condensation and energy. Guidelines and practice. Leuven: Acco.
- Illig, W. (1952). The magnitude of the water vapor transfer value during diffusion processes in walls of housing units, stables and cold storage rooms. *Gesund. Ing.* 73 H. 7/8, S, 124–127.
- IUPAC (1994). Recommendations for the characterization of porous solids.
- Janssen, H. (2002). The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. *Thèse en Génie Civil*. Katholieke Universiteit Leuven.
- Janssen, H., Carmeliet, J., and Hens, H. (2004). The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. *Buildings and Environment*. 39, 825–836.
- Janssen, H., Blocken, B., and Carmeliet, J. (2007a). Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *Heat and Mass Transfer*. 50, 1128–1140.
- Janssen, H., Blocken, B., Roels, S., and Carmeliet, J. (2007b). Wind-driven rain as a boundary condition for HAM simulations: Analysis of simplified modelling approaches. *Buildings and Environment*. 42, 1555–1567.
- Jerman, M., and Černý, R. (2012). Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*. 53, 39–46.
- JORF (1982). Arrêté du 24 mars 1982 relatives à l'aération des logements, *Journal Officiel de la République Française*.
- Kaermmmerlen, A. (2009). *Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment*. Université de Nancy 1.
- Kameni, N., Tchinda, R., and Djongyang, N. (2013). Field Study of Thermal Comfort in Naturally Ventilated Classrooms of Cameroon. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*. 3, 555–570.
- Kari, B., Perrin, B., and Foures, J. (1992). Modélisation macroscopique des transferts de chaleur et d'humidité dans des matériaux du bâtiment. *Les données nécessaires*. *Materials and Structures*. 25, 482–489.
- Kittler, R. (1981). A Universal Calculation Method for Simple Predetermination of Natural Radiation on Building Surfaces and Solar Collectors. *Building and Environment*. 16, 177–182.

- Klute, A. (1986). *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph n.9 (2nd edition).
- Koffi, J. (2009). *Analyse multicritere des strategies de ventilation en maisons individuelles*. Thèse en Génie Civil. Université de La Rochelle.
- Koniorczyk, M., and Gawin, D. (2012). Modelling of salt crystallization in building materials with microstructure – Poromechanical approach. *Construction and Building Materials*. 36, 860–873.
- Krus, M., Kilian, R., and Sedlbauer, K. (2007). Mould growth prediction by computational simulation on historical buildings.
- Künzel, H. (1995). *Simultaneous heat and moisture transport in building components*. Fraunhofer Institute of Building Physics.
- Lacey, J. (1994). Indoor aerobiology and health. J Singh Ed *Build. Mycol.* Chapman Hall Lond. 77–129.
- Lemaire, T., Moyne, C., and Stemmelen, D. (2007). Modelling of electro-osmosis in clayey materials including pH effects. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 32, 441–452.
- Lewandowska, J., and Laurent, J. (2001). Homogenization modelling and parametric study of moisture transfer in an unsaturated heterogeneous porous medium. *Transport Porous Media* 45, 321–345.
- Lewin, S. (1982). *Conservation of historic stone buildings and monuments*.
- Lisø, K.R., Kvande, T., Hygen, H.O., Thue, J.V., and Harstveit, K. (2007). A frost decay exposure index for porous, mineral building materials. *Building and Environment*. 42, 3547–3555.
- Litvan, G. (1975). Phase transition of adsorbates: VI, effect of deicing agents on the freezing of cement paste. *J Am Ceram Soc* 58, 26–30.
- Liu, J.Y. (1991). Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *Int. J. Heat Mass Transf.* 34, 1747–1754.
- L. Kristin (2006). International Energy Agency, Annex 41-Subtask 1, Common Exercise 3.
- Luikov, A.V. (1966). *Heat and mass transfer in capillary porous bodies*. Pergamon Lond.
- Maghous, S., Saada, Z., Dormieux, L., Canou, J., and Dupla, J.C. (2007). A model for in situ grouting with account for particle filtration. *Comput. Geotech.* 34, 164–174.
- Mamillan, M. (1994). *Restauration des bâtiments en pierre*. Technical report.
- Mansson, L.. (2001). *Evaluation and demonstration of domestic ventilation systems*. IEA ECBCS Annex 27 Final report, 2001.
- Martin Pérez, B. (1999). *Service life modelling of highway structures exposed to chlorides*. Civil Engineering. Civil Engineering University of Toronto.
- Mchirgui, W. (2012). *Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique - Application aux matériaux cimentaires*. thèse en Génie Civil. Université de La Rochelle.
- Meille, S. (2001). *Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*. Génie Civil. INSA Lyon.
- Meukam, P. (2004). *Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments*. Génie Civil. Université de Yaouande I.
- Millet, J., Villenave, J., and Fleury, E. (1995). Annexe 27 “Evaluation et Démonstration pour les systèmes de ventilation des bâtiments résidentiels” Rapport final. ENEA/CVA n°95.165R, 11 décembre 1995.
- Monteagudo, J., Rajagopal, K., and Lage, P.. (2001). Scaling laws in network models: porous medium property prediction during morphological evolution. *J. Pet. Sci. Eng.* 32, 179–190.
- Moon, H., and Augenbroe, G. (2003). *Evaluation of hygrothermal models for mold growth avoidance prediction*. In *Building Simulation*, (Eindhoven, Netherlands),.
- Moujalled, B., Cantin, R., and Garracino, G. (2008). Comparison of thermal comfort algorithms in naturally ventilated office buildings. *Energy Build.* 40, 2215–2223.

- Moyen, C., Bastal, C., and Degiovanni, A. (1988). Approche expérimentale et théorique de la conductivité thermique des milieux poreux humides. *Int J Heat Mass Transf.* 31, 2319–2330.
- Moyne, C., and Murad, M. (2006). A two-scale model for coupled electro-chemo-mechanical phenomena and onsager's reciprocity relations in expansive clays : I homogenization analysis. *Transp. Porous Media* 62, 333–380.
- Moyne, C., and Murad, M.A. (2002). Electro-chemo-mechanical couplings in swelling clays derived from a micro/macro-homogenization procedure. *Int. J. Solids Struct.* 39, 6159–6190.
- Musy, A., and Soutter, M. (1991). *physique du sol.*
- M. Woloszyn, and C. Rode (2007). IEA Annex 41, MOIST-ENG Subtask 1 – Modelling Principles and Common Exercises, Final Report.
- Navi, P., and Heger, F. (2005). Comportement thermo-hydrromécanique du bois, application techniques et dans structures.
- Nguyen, P.T. (2010). Etude multi – physique du transfert des chlorures dans les écobétons insaturés : application à la prédiction de la corrosion des aciers. Thèse en Génie Civil. Université de La Rochelle.
- Nguyen, P.T., and Amiri, O. (2014). Study of electrical double layer effect on chloride transport in unsaturated concrete. *Constr. Build. Mater.* 50, 492–498.
- Nguyen, T.Q., Petković, J., Dangla, P., and Baroghel-Bouny, V. (2008). Modelling of coupled ion and moisture transport in porous building materials. *Constr. Build. Mater.* 22, 2185–2195.
- Nicolai, A. (2008). Modeling and Numerical Simulation of Salt Transport and Phase Transitions in Unsaturated Porous Building Materials.
- Nicolai, A., and Grunewald, J. (2006). Delphin 5 - User Manual and Program Reference.
- Nicolai, A., Zhang, J.S., and Grunewald, J. (2007). Coupling strategies for combined simulation using multizone and building envelope models. *Proc. Build. Simul.*
- Nilsson, L.-O. (2005). On the role of moisture in degradation of concrete structures. (Dundee, Scotland), pp. 15–24.
- N. Issaadi, Nouviaire, A., R. BELARBI, and A. Aït-Mokhtar (2014). Etude comparative des techniques d'arrêt d'hydratation et de leurs conséquences sur les propriétés de transfert hydrique des matériaux cimentaires. Conférence AUGC (France).
- Nord, A.. (1992). Efflorescence salts on weathered buildings stone in sweden. (Stockholm), 423–429.
- Ojanen, T., Peuhkuri, R., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Vinha, J., and Salminen, K. (2011). Classification of material sensitivity – new approach for mould growth modeling. 9th Nord. Symp. Build. Phys. 2, 867–874.
- Osanyintola, O.F., and Simonson, C.J. (2006). Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. *Energy Build.* 38, 1270–1282.
- Pedersen, C.R. (1992). Prediction of moisture transfer in building constructions. *Build. Environ.* 27, 387–397.
- Peuhkuri, R., and Carsten, R. (2004). Common Exercise 1 – Case 0A and 0B Revised, IEA, Annex 41, Task 1, Modeling Common Exercise.
- Peuhkuri, R., Rode, C., and Hansen, K.K. (2008). Non-isothermal moisture transport through insulation materials. *Build. Environ.* 43, 811–822.
- Philip, J., and De Vries, D. (1957). Moisture movement in porous material under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys. Union* 2, 222–232.
- Piecková, E., and Jesenská, Z. (1999). Microscopic fungi in dwellings and their health implications. *Ann Agric Env. Med* 6, 1–11.
- Platt, S., Martin, C., Hunt, S., and Lewis, C. (1989). Damp housing, mould growth, and symptomatic health state. *Br Med J* 298, 1673–1678.
- Poupeleer, A. (2007). Transport and crystallization of dissolved salts in cracked porous building materials. Génie Civil. Katholieke Universiteit Leuven.

- Powers, T. (1949). The air requirement of frost-resistant concrete. Proc Highw. Res Board.
- Price, C. (1998). Stone Conservation : An Overview of Current Research.
- Prommas, R. (2011). Theoretical and experimental study of heat and mass transfer mechanism during convective drying of multi-layered porous packed bed. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 38, 900–905.
- Qin, M. (2008). Etude des phénomènes de transfert hygrothermiques dans les parois des bâtiments. Université de La Rochelle.
- Qin, M., Belarbi, R., AïLuit mokhtar, A., and Nilsson, L.-O. (2008). Nonisothermal moisture transport in hygroscopic building materials: modeling for the determination of moisture transport coefficients. *Transp Porous Med* 72, 255–271.
- Qin, M., Belarbi, R., Aït-Mokhtar, A., and Nilsson, L.-O. (2009a). Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials. *Constr. Build. Mater.* 967–975.
- Qin, M., Belarbi, R. fi k, Aït-Mokhtar, A., and Allard, F. (2009b). Simulation of coupled heat and moisture transfer in air-conditioned buildings. *Autom. Constr.* 18, 624–631.
- Qin, M., Walton, G., Belarbi, R., and Allard, F. (2011). Simulation of whole building coupled hygrothermal-airflow transfer in different climates. *Energy Convers. Manag.* 52, 1470–1478.
- Rahmeh, M. (2014). Etude expérimentale et numérique des performances de la ventilation mécanique par insufflation: qualité de l’air intérieur dans les bâtiments résidentiels. Thèses en Génie Civil. Université de La Rochelle.
- Raji, S., Jannot, Y., Lagièrre, P., and Puiggali, J.R. (2009). Thermophysical characterization of a laminated solid-wood pine wall. *Constr. Build. Mater.* 23, 3189–3195.
- Remki, B., Abahri, K., Tahlaiti, M., and Belarbi, R. (2012). Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient. *Int. J. Therm. Sci.* 57, 135–141.
- Rodriguez, C., and Doehne, E. (1999). Salt weathering : influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surf. Process. Landf.* 24, 191–209.
- Roels, S. (2002). Modelling unsaturated moisture transport in autoclaved aerated concrete: a microstructural approach. (Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway: Gustavsen A. and Thue J.V.).
- Roulet, C.. (2004). Santé et Qualité de l’air intérieur.
- Rousseau, M.. (2003). Heat, Air and Moisture Strategies for Managing Condensation in Walls. *Natl. Res. Counc. Can. NRCC-46734.*
- Rowan, N.J., Johnstone, C.M., Craing, R., Anderson, J., and Clarke, J.A. (1999). Prediction of toxigenic fungal growth in buildings by using a novel modelling system. *Appl Env. Microbiol* 4814–4821.
- R. R. Zarr, D. M. Burch, and A. H. Fanney (1995). Heat and Moisture Transfer in Wood-Based Wall Construction: Measured Versus Predicted. *NIST BUILDING SCIENCE SERIES 173* 83.
- Sacis Kalagasidis, A. (2004). HAM-Tools. An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analysis in Building Physics. Doctoral thesis. Chalmers University of Technology.
- Samson, E., Marchand, J., and Beaudoin, J.J. (1999). Describing ion diffusion mechanisms in cement-based materials using the homogenization technique. *Cem. Concr. Res.* 29, 1341–1345.
- Sanahuja, J., Dormieux, L., and Chanvillard, G. (2007). Modelling elasticity of a hydrating cement paste. *Cem. Concr. Res.* 37, 1427–1439.
- Sanchez-Palencia, E. (1985). Einstein-like approximation for homogenization with small concentration. *i-elliptic problems. Nonlinear Anal.* 9, 1243–1254.
- Santamouris, M., Pavlou, K., Synnefa, A., Niachou, K., and Kolokotsa, D. (2007). Recent progress on passive cooling techniques. *Energy Build.* 39, 859–866.
- Schaube, H., and Werner, H. (1986). Heat transfer coefficient under natural climatic conditions.
- Scherer, G.W. (2004). Stress from crystallization of salt. *Cem. Concr. Res.* 34, 1613–1624.
- Schwarz, B. (1971). Heat and material transfer in outdoor wall surfaces. *Diss. Universität Stuttgart.*

- Smith, S., and Hill, S. (1982). Influence of temperature and water activity on germination and growth of *Aspergillus restrictus* and *A. versicolor*. *Trans Br Mycol Soc* 79, 558–560.
- Solar Energy Laboratory, TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, and TESS – Thermal Energy Systems Specialists (2010a). TRNSYS 17 a TRaNsient SYstem Simulation program.
- Solar Energy Laboratory, TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, and TESS – Thermal Energy Systems Specialists (2010b). TRNSYS 17 a TRaNsient SYstem Simulation program.
- Sotehi, N. (2010). Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation. Génie Civil. Université Mentouri.
- Spitz, C., Woloszyn, M., Buhe, C., and Labat, M. (2013). Simulating combined heat and moisture transfer with EnergyPlus: an uncertainty study an comparison with experimental data. In *Building Simulation 2013, Proceedings*, (Chambery, France),.
- Steehan, M., Janssens, A., Steeman, H.J., Belleghem, M.V., and Paepe, M.D. (2010). On coupling 1D non-isothermal heat and mass transfer in porous materials with a multizone building energy simulation model. *Build. Environ.* 45, 865–877.
- Talukdar, P., Olutmayin, S.O., Osanyintola, O.F., and 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. *Int. J. Heat Mass Transf.* 50, 4527–4539.
- Taoukil, D., El bouardi, A., Sick, F., Mimet, A., Ezbakhe, H., and Ajzoul, T. (2013). Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite. *Constr. Build. Mater.* 48, 104–115.
- Tariku, F., Kumaran, K., and Pazio, P. (2010a). Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media. *Int. J. Heat Mass Transf.* 53, 3035–3044.
- Tariku, F., Kumaran, K., and Fazio, P. (2010b). Integrated analysis of whole building heat, air and moisture transfer. *Int. J. Heat Mass Transf.* 53, 3111–3120.
- T. Bednar, and C. Hagentoft (2005). Analytical solution for moisture buffering effect validation exercises for simulation tools. (Reykjavik),.
- Tepfers (1979). Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars. *Mag. Concr. Res.* 31, 3–12.
- Toftum, J., Jorgensen, A., and Fanger, P. (1998). Upper Limits for Indoor Air Humidity to Avoid Uncomfortably Humid Skin. *Energy Build.* 28, 1–13.
- Touzain, S. (1996). Etude de la structure des dépôts calcomagnésiens formés en présence d'écoulements. Application à la protection cathodique en milieu marin. Université de La Rochelle.
- Trabelsi, A. (2010). Études numérique et expérimentale des transferts hygrothermiques dans les milieux poreux du bâtiment. Génie Civil. Université de La Rochelle.
- Trabelsi, A., Belarbi, R., Abahri, K., and Qin, M. (2012). Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient. *Build. Simul.* 5, 107–115.
- Trabelsi, A., Belarbi, R., Abahri, K., and Qin, M. (2013). Reply on the comments regarding the paper “Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient.” *Build. Simul.* 6, 109–110.
- Traoré, I. (2011). Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois. Université de Nancy 1.
- Unver, R., Akdag, N., Gedik, G., Ozturk, L., and Karabiber, Z. (2004). Prediction of building envelope performance in the design stage: an application for office buildings. *Build. Environ.* 39, 143–152.
- Valenza, J.J., and Scherer, G.W. (2007). A review of salt scaling: II. Mechanisms. *Cem. Concr. Res.* 37, 1022–1034.

- Van Schijndel, A.W. (2009). Integrated modeling of dynamic heat, air and moisture processes in buildings and systems using SimuLink and COMSOL. *Build. Simul.* 2, 143–155.
- Veran-Tissoires, S. (2011). Sur le phénomène de cristallisation discrète à la surface ou à l'intérieur d'un milieu poreux. *Génie Civil*. Université de Toulouse.
- Vereecken, E., and Roels, S. (2012). Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Build. Environ.* 51, 296–310.
- Viitanen, H. (1996). Factors affecting the development of mould growth and brown rot decay in wooden materials and wooden structures, effect of humidity, temperature and exposure time. The Swedish University of Agricultural Science, Department of Forest Products.
- Vu, X. (2007). Caractérisation expérimentale du béton sous fort confinement : influences du degré de saturation et du rapport eau/ciment. *Génie Civil*. Université Joseph Fourier.
- Walton, G. (1989). AIRNET: A computer program for building airflow network modeling. U.S. Dept. of Commerce, National Institute of Standards and Technology, National Engineering Laboratory, Center for Building Research, Building Environment Division.
- Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media : A theory of drying. *Elsevier* 13, 119–203.
- Whitaker, S. (1986). Flow in porous media ii : The governing equations for immiscible, two- phase flow. *Transp Porous Med* 1, 105–125.
- Woloszyn, M., and Rode, C. (2008a). Annex 41 whole building heat, air, moisture response - Modelling principles and common exercises. Final report IEA, EXCO ECBCS Annex 41, ACCO (Leuven, Belgique).
- Woloszyn, M., and Rode, C. (2008b). Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings. *Build. Simul.* 1, 5–24.
- Wong, P.. (1999). *Methods in the physics of porous media*.
- Zelinka, S.L., and Stone, D.S. (2011). Corrosion of metals in wood: Comparing the results of a rapid test method with long-term exposure tests across six wood treatments. *Corros. Sci.* 53, 1708–1714.
- Zelinka, S.L., Rammer, D.R., Stone, D.S., and Gilbertson, J.T. (2007). Direct current testing to measure corrosiveness of wood preservatives. *Corros. Sci.* 49, 1673–1685.
- Zelinka, S.L., Sichel, R.J., and Stone, D.S. (2010). Exposure testing of fasteners in preservative treated wood: Gravimetric corrosion rates and corrosion product analyses. *Corros. Sci.* 52, 3943–3948.
- Zhong, Z., and Braun, J. (2008). Combined heat and moisture transport modeling for residential buildings.
- Zhu, Q., Kondo, D., and Shao, J. (2009). Homogenization-based analysis of anisotropic damage in brittle materials with unilateral effect and interactions between microcracks. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geome- Chanics* 33, 749–772.
- Zuber, B. (2002). Vers une modélisation numérique du comportement des matériaux cimentaires exposés au gel. *Génie Civil*. Ecole nationale supérieure de Cachan.
- Zuber, B. (2004). Predicting the volume instability of hydrated cement systems upon freezing using poro-mechanics and local phase equilibria. *Mater StructMatériaux Constr.* 37, 257–270.
- Zuber, B., and Marchand, J. (2000). Modeling the deterioration of hydrated cement systems exposed to frost action: Part 1: Description of the mathematical model. *Cem. Concr. Res.* 30, 1929–1939.



---

# Modélisation des transferts thermo-hydro-aéraulique dans les enveloppes de bâtiments: Evaluation des désordres causés par l'humidité

---

## Résumé :

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre du projet ANR HUMIBATex « Comment prédire les désordres causés par l'humidité ? Quelles solutions techniques pour rénover le bâti existant? » (2012-2016). Elle traite de la modélisation numérique et expérimentale des transferts couplés hydro-thermo-aérauliques à différentes échelles : matériau, paroi et ambiance de bâtiment.

Sur le plan théorique, un modèle phénoménologique des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité à travers les enveloppes de bâtiments (HAM) a été élaboré. Après la phase de validation (confrontation avec des solutions analytiques et des résultats expérimentaux), ce modèle a été implémenté avec confiance dans un code de simulation thermique dynamique du bâtiment (BES). Ceci a permis, ainsi, de développer une plateforme de co-simulation HAM-BES. Grâce à l'outil mis en œuvre, les comportements hygrothermiques de la paroi et de l'ambiance habitable des bâtiments ont été prédits finement. Deux cas d'études ont été entrepris. Le premier avait pour but de mettre en évidence l'impact des transferts hygrothermiques sur la prédiction des consommations énergétiques. Le deuxième cas d'étude a été dédié à l'étude de l'efficacité de différentes stratégies de ventilation (extraction ou insufflation) sur le contrôle et la diminution des risques d'apparition de désordres liés à l'humidité au niveau des bâtiments résidentiels.

Sur le plan expérimental, une campagne de caractérisation des propriétés physiques, hydriques et thermophysiques des matériaux de construction a été effectuée. Cette campagne expérimentale s'est focalisée sur l'analyse de l'impact de l'état thermique et hydrique du matériau sur les valeurs des propriétés hygrothermique. Dans un autre travail expérimental, des dispositifs expérimentaux, à petite échelle mais également à l'échelle de la paroi, ont été conçus au laboratoire dans le but d'étudier la réponse hygrothermique des enveloppes de bâtiment ainsi que valider la plateforme de co-simulation dynamique HAM-BES. La confrontation des résultats a montré une bonne concordance entre la résolution numérique et les mesures expérimentales.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de thèse ont mis en exergue l'influence d'une modélisation fine des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité, à la fois sur la prédiction du comportement hygrothermique des ambiances habitables mais aussi sur le calcul des besoins énergétiques des bâtiments.

