



HAL
open science

Étude multi-échelle des transferts de chaleur et de masse appliquée à un bâtiment parisien rénové, en condition météorologique normale et en période de vague de chaleur

Karina Azos Diaz

► **To cite this version:**

Karina Azos Diaz. Étude multi-échelle des transferts de chaleur et de masse appliquée à un bâtiment parisien rénové, en condition météorologique normale et en période de vague de chaleur. Génie des procédés. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016. Français. NNT : 2016PA066108 . tel-01403856

HAL Id: tel-01403856

<https://theses.hal.science/tel-01403856>

Submitted on 28 Nov 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.

UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE - PARIS 6

ÉCOLE DOCTORALE SMAER

Sciences mécaniques, acoustique, électronique et robotique de Paris

T H È S E

pour obtenir le titre de

Docteur

de l'Université de Pierre et Marie Curie - Paris 6

Spécialité : THERMIQUE-ÉNERGÉTIQUE

Présentée et soutenue par

Karina AZOS DIAZ

Étude multi-échelle des transferts de chaleur et de masse appliquée à un bâtiment parisien rénové, en condition météorologique normale et en période de vague de chaleur

Soutenue le 26 mai 2016

Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Mohamed EL MANKIBI	- Chercheur HDR, ENTPE (Lyon)
	Monika WOLOSZYN	- Professeur, LOCIE, Polytech Annecy-Chambéry
<i>Directeur :</i>	Chrisophe MARVILLET	- Professeur, CNAM (Paris)
<i>Co-encadrant :</i>	Brice TREMEAC	- Maitre de Conférences, CNAM (Paris)
<i>Examineurs :</i>	Isabelle MABILLE	- Maitre de Conférences HDR, UPMC (Paris)
	Marjorie MUSY	- Chercheuse HDR, ENSA Nantes
<i>Invités :</i>	David CORGIER	- Ingénieur, Manaslu Ing. (Le Bourget-du-Lac)
	Florian SIMON	- Ingénieur, Manaslu Ing. (Le Bourget-du-Lac)

Avant-propos :

Ce projet a été réalisé au sein du laboratoire de Chimie Moléculaire, Génie des Procédés Chimiques et Énergétiques (CMGPCE, ancien LGP2ES) au CNAM en partenariat de CMDL SAS (MANASLU Ing.), dans le cadre d'une thèse CIFRE.

Je tiens à remercier mes encadrants, M. Christophe MARVILLET et M. Brice TREMEAC qui ont tenu à ce projet et qui ont déposé leur confiance dans mon travail. Tous mes remerciements pour vos orientations, support et le temps consacré à ce projet. Brice, je te remercie très sincèrement pour tes encouragements dans les moments où j'avais le plus besoin, merci également pour ta patience. Je tiens également à remercier M. David CORGIER d'avoir accepté et supporté ce projet, tant au niveau financier qu'intellectuel. Je remercie M. Florian SIMON, pour les enrichissants apports, pour ses instructions et le temps investi dans ma formation au sein de l'entreprise. Je voudrais remercier également à M. Georges DECOMBES du CNAM qui s'est montré attentif quand il a fallu.

Je remercie Mme. Monika WOLOSZYN et M. Mohamed ELMANKIBI d'avoir accepté de rapporter cette thèse. Vos appréciations ont été très pertinentes et enrichissantes, elles m'ont permis d'avoir plus de recul sur mon travail. Je remercie Mme. Marjorie MUSY et Mme. Isabelle MABILLE d'avoir accepté de faire part du jury, je suis très honorée.

Je tiens à remercier M. Julien BIGORGE de l'APUR sans qui la sélection du bâtiment pour la campagne de mesure, la mise en relation avec le bailleur social et les locataires, se serait avéré une tâche très complexe. Je tiens à remercier Mme. Agnès BENREKASSA de la SIEMP qui a mis à disposition toute l'information nécessaire pour la mise en place de la campagne de mesure.

Je voudrais également remercier Martin HENDEL qui s'est montré toujours très serviable. Je te remercie pour avoir mis à disposition les informations de la station météo. Elles ont été essentiels pour mon travail.

Je voudrais remercier les locataires de m'avoir permis de mener à bien la campagne de mesure. Aurèlie et Joyce, il était initialement prévu d'importuner les locataires le moindre possible, avec le relevé des données à distance. Merci à vous deux, car ces prévisions n'ont pas tenu la route, vous m'avez toujours ouvert vos portes, vous m'avez toujours chaleureusement accueilli, vous avez été très patients envers moi. Muchas gracias a ambas.

Je remercie l'équipe du laboratoire CMGPCE, les gens qui y sont passés et ceux qui d'une manière ou d'une autre ont apporté à la réussite de ce projet.

Je remercie ma famille qui malgré la distance, m'a toujours encouragé, ustedes son mi constante fuente de motivación. Merci Andresito pour tout.

Table des matières

Liste des figures	vii
Liste des tableaux	xv
Nomenclature	xvii
Introduction	1
I APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1 Le bâtiment ancien et la rénovation thermique	7
1.1 Propriétés hygrothermiques des matériaux dans les bâtiments anciens	7
1.1.1 Inertie thermique	7
1.1.2 Propriétés hygriques des matériaux dans les constructions anciennes	9
1.2 La rénovation dans le bâtiment ancien	11
1.2.1 Enjeux de la rénovation thermique dans un contexte réglementaire	12
1.2.2 Stratégies de rénovation et leurs performances	13
1.2.3 Postes visés dans les interventions de rénovation	14
1.2.4 Enjeux de la rénovation thermique dans un contexte évolutif du climat	16
2 Simulation thermique dynamique des bâtiments anciens	19
2.1 État de l'art des logiciels de simulation thermique et dynamique de bâtiments	19
2.2 Finesse des modèles simulation thermique dynamique (STD)	20
2.3 Les outils de simulation thermique dynamique (STD)	22
2.3.1 Description	22
2.3.2 Les outils STD existants	23
2.3.3 Outil adopté pour les simulations : Energyplus (EP)	26
2.4 Fiabilité des outils de simulation	31
2.5 Les outils de simulation et le calage des modèles	32
3 Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans les matériaux poreux	35
3.1 Transfert de chaleur et de masse dans le domaine du bâtiment	35
3.1.1 Stockage et transfert de chaleur	37
3.1.2 Le stockage et les transferts de masse	37
3.2 État de l'art des méthodes d'évaluation de transferts de chaleur et de masse à l'échelle de la paroi	39
3.3 Modèle de transferts de chaleur et de masse dans une paroi multicouche	41
3.4 Analyse des données modélisées	44

3.4.1	Description	44
3.4.2	L'analyse en composantes principales (ACP)	44
Conclusions partie I		47
 II CONSTRUCTION D'UN MODÈLE THERMIQUE DYNAMIQUE DE LOGEMENTS ANCIENS RÉNOVÉS À PARIS		 49
4	Cas d'étude : bâtiment ancien en moellon calcaire rénové avec de l'isolation thermique par l'intérieur (ITI) et par l'extérieur (ITE)	51
4.1	Description	51
4.2	Propriétés des matériaux	53
4.3	Approche expérimentale et données (scénario hypothétique)	56
4.3.1	Campagne de mesure : conditions à l'intérieur des logements	56
4.3.2	Données météorologiques	60
4.3.3	Enquête comportement des usagers	62
5	Résultats expérimentaux et numériques	65
5.1	Données enregistrées	66
5.1.1	Périodes d'occupation et inoccupation	66
5.1.2	Analyse des données enregistrées	67
5.2	Données simulées : calage du modèle	74
5.2.1	Méthode et hypothèses du modèle	75
5.2.2	Identification des paramètres sensibles	77
5.2.3	Résultats du processus de calage du modèle	79
5.3	Validation du modèle	86
5.3.1	En inoccupation	87
5.3.2	En occupation	93
5.3.3	Hypothèses d'occupation : effet de l'occupant	95
5.4	Évaluation des logements rénovés sous des conditions de vague de chaleur	96
5.4.1	Scénario 1 : Vague de chaleur en situation d'inoccupation	97
5.4.2	Scénario 2 : vague de chaleur en période d'occupation	100
5.5	Évaluation des conditions intérieures : première approche du confort	102
5.5.1	Description	102
5.5.2	Deux indicateurs du confort thermique	103
 Conclusions partie II		 109
 III CONSTRUCTION D'UN MODÈLE DE TRANSFERTS DE CHA-		

LEUR ET DE MASSE À L'ÉCHELLE DE LA PAROI	111
6 Implémentation d'un modèle de transferts de chaleur et de masse dans un outil de modélisation	113
6.1 Présentation du modèle KÜNZEL	113
6.1.1 Mise en forme des équations	113
6.1.2 Conditions aux limites	116
6.1.3 Hypothèses du modèle	117
6.2 Adaptation du modèle sur un outil de modélisation COMSOL	117
6.3 Validation/vérification du modèle	119
6.3.1 Le benchmark HAMSTAD	119
7 Cas d'étude : caractéristiques des parois	127
7.1 Description des configurations	127
7.1.1 Présentation des matériaux	128
7.1.2 Propriétés hygrothermiques des matériaux	131
7.2 Description des conditions aux limites et initiales	136
7.2.1 Conditions aux limites	136
7.3 Variables étudiées	139
8 Analyse des données : résultats de la modélisation à l'échelle de la paroi	141
8.1 Analyse en composantes principales (ACP)	141
8.1.1 Flux de chaleur à la surface intérieure	144
8.1.2 Flux de masse à la surface intérieure	147
8.1.3 Teneur en humidité dans la pierre calcaire	151
8.1.4 Humidité relative à l'interface entre la pierre et l'isolant	153
8.1.5 Température à l'interface entre la pierre et l'isolant	157
8.2 Comportement hygrothermique des parois soumises à des conditions "cas 2014" et de "vague de chaleur"	158
8.2.1 Résultats des simulations des parois rénovées avec ITI et ITE dans des conditions "cas 2014"	159
8.2.2 Résultats des simulations des parois rénovées avec ITI et ITE dans des conditions "vague de chaleur"	171
Conclusions partie III	179
Conclusions générales et perspectives	180
A Fichier météo EnergyPlus	184
B Humidité relative en vague de chaleur	185
C Comparaison des données enregistrées : choix du pas de temps	186
D Équations et coefficients Benchmark N°5	187

E	Conditions aux limites “cas 2014”	189
E.1	Conditions aux limites à la surface intérieure	189
E.2	Conditions aux limites à la surface extérieure	190
F	Conditions aux limites “vague de chaleur”	192
F.1	Conditions aux limites à la surface intérieure	192
F.2	Conditions aux limites à la surface extérieure	193
G	Pression de vapeur “Cas 2014”	195
G.1	Différence de pression de vapeur Intérieur et extérieur	195
G.2	Pression de vapeur Interface pierre-isolant paroi ITI et ITE	196
	Bibliographie	197

Liste des figures

1.1	Évolution des températures extérieure et intérieure en période d'été (28 et 29 juin 2005) d'une maison individuelle en maçonnerie en pierre dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur [Royet <i>et al.</i> 2007]	8
1.2	Teneur en humidité de quatre matériaux. Comparaison de w calculée à partir de l'équation (1.3) (points vides) et des valeurs mesurées des expériences de stress en sorption et succion (points noirs) [Künzel <i>et al.</i> 2005] (version en français)	10
1.3	Schéma de présentation du dispositif général de la réglementation thermique des bâtiments existants [Molle & Patry 2013]	13
2.1	Composition interne du logiciel EnergyPlus (Adapté de [Abelé <i>et al.</i> 2009], [EnergyPlus 2013])	27
2.2	Représentation de la transmission ($T_{i,j}$ transmittance à travers les couches), réflexion ($R_{i,j}^f$ et $R_{i,j}^b$ réflectance en avant et en arrière) et adsorption (A_j) du rayonnement solaire d'une surface vitrée composée de plusieurs couches (Adapté de [EnergyPlus 2013])	30
2.3	Besoins en chauffage et puissance de chauffage maximale en fonction de différentes valeurs du coefficient convectif (Adapté de [Brun <i>et al.</i> 2009])	31
2.4	Consommation et économies d'énergie en refroidissement (Adapté de [Judkoff <i>et al.</i> 2010a])	33
2.5	Calage d'un modèle de bâtiment. Température simulée et mesurée dans une zone sur la façade nord pendant le mois de janvier (adapté de [Mustafaraj <i>et al.</i> 2014])	34
3.1	Isotherme de sorption et désorption : comportement hygroscopique d'un matériau poreux en fonction de l'humidité relative (Adaptée de [Abelé <i>et al.</i> 2009], [Guimarães <i>et al.</i> 2012])	38
3.2	À gauche : profil d'humidité relative et teneur en humidité dans une paroi bicouche. À droite : isothermes de sorption de deux matériaux (adapté de [Tariku <i>et al.</i> 2010])	41
3.3	Exemple avec 2 variables (p_1, p_2), n -individus dispersés dans le plan et représentation de la droite a que minimise les distances orthogonales entre n_i et a (adapté de [Peña 2002])	45
3.4	(a) Nuage des individus représentés dans un espace \mathbb{R}^p et nuage des variables représentées dans l'espace \mathbb{R}^n (adapté de [Lebart <i>et al.</i> 1995])	46
4.1	Plan de densification des bâtiments construits à Paris avant 1914. Localisation du bâtiment étudié et de la station météo. Source du plan : APUR	51

4.2	Bâtiment étudié et son environnement proche : en gris foncé le bâtiment et les logements étudiés (ouest : logement avec isolation thermique par l'extérieur (ITE), est : logement avec isolation thermique par l'intérieur (ITI)), en violet les bâtiments voisins avec des conditions adiabatiques et en gris clair les bâtiments environnants (interface graphique DesignBuilder)	52
4.3	Plan architectural des logements ITI et ITE étudiés (3ème étage et comble 4ème étage). Localisation des capteurs de mesure dans chaque zone	53
4.4	Matériaux logement ITI. (a) mur en moellon calcaire (façade sud en ITI et ITE); (b) plancher avec des solives et lattes en bois; (c) poutres métalliques (remplacées) et en bois (existantes). Source : EQUATEUR Architecture . . .	54
4.5	Matériaux logement ITE. (a) mur en moellon et colonnes en béton (façade sud); (b), (c) mur en parpaing sans et avec isolation en polystyrène (façade nord); (d) armature en acier pour dalle en béton. Source : EQUATEUR Architecture	54
4.6	Test de précision des capteurs par rapport à la moyenne	58
4.7	Test de précision des capteurs avec une sonde thermométrique à résistance . .	59
4.8	Station météo rue Ramponeau avec les capteurs de mesure	61
4.9	Exemple planning type 7/12 pour une journée (mercredi) type dans le logement ITI	63
5.1	Données de dioxyde de carbone (CO ₂) en ITI et ITE. Identification des périodes d'inoccupation en été 2014.	66
5.2	Températures enregistrées dans la chambre enfant (comble aménagé avec fenêtres de toit) en ITE, les salles de bain (zone non-exposée), les salons (zone exposée) en ITE et ITI durant les mois de juillet ((a) occupation) et août ((b) inoccupation) 2014.	68
5.3	Détail des zones identifiées dans la figure 5.2a : températures enregistrées pendant deux jours en occupation : le 12 et 19 juillet 2014	69
5.4	Détail des zones identifiées dans la figure 5.2b : températures enregistrées pendant deux jours en inoccupation : le 5 et 13 août 2014	70
5.5	Humidités relatives enregistrées dans la chambre enfant (comble aménagé) en ITE, la salle de bain (zone non-exposée), le salon (zone exposée) en ITE et ITI durant les mois de juillet 2014 (a) période d'occupation et août 2014 (b) période d'inoccupation	72
5.6	Détail des zones identifiées dans la figure 5.2a : humidités relatives enregistrées pendant deux jours en occupation : le 12 et 19 juillet 2014	73
5.7	Humidités relatives enregistrées en ITE dans le salon, la salle de bain et la chambre enfant (comble aménagé) durant les mois de février 2015, en inoccupation.	73
5.8	Détail des zones identifiées dans la figure 5.2b : humidités relatives enregistrées pendant deux jours en inoccupation : le 5 et 13 août 2014	75
5.9	Processus manuel de calage du modèle	76
5.10	Débit bouche d'extraction d'air Minimale, Maximale et standard VMC (source : CSTB Avis Technique 14/13-1909)	78

5.11	Test : effet de la différence du volume d'air (7,5% supérieur en ITE) sur la température et l'humidité relative dans le salon ITI	80
5.12	Résultats après calage du modèle en terme de température pour le salon et la salle de bain	81
5.13	Valeurs de température maximales (T_{max}), minimales (T_{min}) et moyennes (T_{moy}) obtenues par simulation et par mesure. Calibration du modèle	83
5.14	Résultats après calage du modèle en terme d'humidité relative pour le salon et la salle de bain	85
5.15	Valeurs d'humidité relative maximales (φ_{max}), minimales (φ_{min}) et moyennes (φ_{moy}) obtenues par simulation et par mesure. Calage du modèle	86
5.16	Validation du modèle en terme de température dans le logement avec de l'isolation thermique par l'extérieur (ITE)	88
5.17	Validation du modèle en terme de température dans le logement avec de l'isolation thermique par l'intérieur (ITI)	88
5.18	Valeurs de température maximales (T_{max}), minimales (T_{min}) et moyennes (T_{moy}) obtenues par simulation et par mesure. Validation du modèle	89
5.19	Validation du modèle en terme d'humidité relative dans le logement avec de l'isolation thermique par l'extérieur (ITE)	90
5.20	Validation du modèle en terme d'humidité relative dans le logement avec de l'isolation thermique par l'intérieur (ITI)	92
5.21	Valeurs d'humidité relative maximales (φ_{max}), minimales (φ_{min}) et moyennes (φ_{moy}) obtenues par simulation et par mesure. Validation du modèle	93
5.22	Validation du modèle en occupation ITE : Température dans une zone exposée et une zone non-exposée au rayonnement solaire : Cuisine et salle de bain	94
5.23	Validation du modèle en occupation ITI : Température dans une zone exposée et une zone non-exposée au rayonnement solaire : salon et chambre des parents	94
5.24	Validation du modèle en occupation ITE : Humidité relative dans une zone exposée et une zone non-exposée au rayonnement solaire : salon et chambre des parents	95
5.25	Validation du modèle en occupation ITI : Humidité relative dans une zone exposée et une zone non-exposée au rayonnement solaire : salon et chambre des parents	95
5.26	Température mesurée et simulée en période d'occupation (gauche) et d'inoccupation (droite) avec des hypothèses de l'occupation (courbe jeune pointillée) : évaluation de l'effet d'occupant en ITE	96
5.27	Température mesurée et simulée en période d'occupation (gauche) et d'inoccupation (droite) avec des hypothèses de l'occupation (courbe jeune pointillée) : évaluation de l'effet d'occupant en ITI	96
5.28	Période d'inoccupation : cumul d'heure dans une zone exposée au rayonnement solaire (Salon) en ITI et ITE durant le mois d'août (744 heures) . Données simulées	98

5.29	Période d'inoccupation : différence de température entre les conditions standard et vague de chaleur (ΔT_{int}) : pour une zone exposée. Température extérieure (T_{ext}) avec et sans l'effet de la vague de chaleur	98
5.30	Période d'inoccupation : différence de température entre les conditions standard et vague de chaleur (ΔT_{int}) pour une zone non-exposée. Température extérieure (T_{ext}) avec et sans l'effet de la vague de chaleur	99
5.31	Période d'occupation : cumul d'heure dans une zone exposée au rayonnement solaire (Salon) en ITI et ITE durant le mois d'août (744 heures) . Données simulées	100
5.32	Période d'occupation : différence de température conditions standard et vague de chaleur (ΔT) zones exposées. Température extérieure (T_{ext}) avec et sans l'effet de la vague de chaleur	101
5.33	Période d'occupation : différence de température entre les conditions standard et vague de chaleur (ΔT_{int}) pour une zone non-exposée. Température extérieure (T_{ext}) avec et sans l'effet de la vague de chaleur	101
5.34	Diagramme de Givoni. Données mesurées pendant l'été (du 16 juillet au 16 août 2014) dans le salon des deux logements ITI et ITE	105
5.35	Diagramme de Givoni. Données simulées dans le salon dans des conditions standard et en vague de chaleur (Meteonorm) pendant l'été (du 16 juillet au 16 août). Présentation séparée des données pour des conditions standard et de vague de chaleur	105
5.36	Diagramme de Givoni. Données simulées dans le salon dans des conditions standard et de vague de chaleur (Meteonorm) pendant l'été (du 16 juillet au 16 août). Présentation séparée des données pour la période d'occupation et la période d'inoccupation	106
5.37	Température opérative (T_o) dans le salon du 16 juillet au 3 août (occupation) et du 04 août au 16 août (inoccupation) 2014, calculée à partir des températures de l'air et radiant mesurées	106
5.38	Température opérative (T_o) dans le salon du 16 juillet au 3 août (occupation) et du 04 août au 16 août (inoccupation). T_o simulée à partir de la base des données de Meteonorm pour les deux conditions standards et vague de chaleur	107
6.1	Illustration du <i>benchmark</i> HAMSTAD N°2	120
6.2	Résultats <i>benchmark</i> HAMSTAD N°2. Comparaison avec les résultats obtenus par [Tariku <i>et al.</i> 2010]	122
6.3	Résultats <i>benchmark</i> HAMSTAD N°2. Comparaison avec les résultats obtenus par l'école polytechnique de Chalmers (CTH), l'Université de Leuven (KUL), le conseil national de recherches Canada (NRC) et l'Université technique de Dresden (TUD) [Hagentoft 2002]	123
6.4	Illustration <i>benchmark</i> HAMSTAD N°5	123

6.5	Résultats benchmark HAMSTAD N°5 à 60 jour. Comparaison avec les résultats obtenus par : l'Université technique de Dresden (TUD), Le Technion - Institut israélien de technologie (Technion), l'Université de Leuven (KUL), L'Université technique d'Eindhoven (TUE), l'école polytechnique de Chalmers (CTH) et le conseil national de recherches Canada (NRC) [Hagentoft 2002]	125
7.1	Composition des parois de référence : parois anciennes rénovées avec isolation thermique par l'intérieur (ITI) et par l'extérieur (ITE). Conditions aux limites et dimensions des couches	128
7.2	Teneur en humidité w des matériaux constituant les parois modélisées [Samri 2008] et WUFI [Fraunhofer IBP 2014]	135
7.3	Structure microscopique de la laine minérale pour différentes densités a) 44 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, b) 112 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et c) 145 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [Vrána 2007]	136
7.4	Conditions aux limites type échelon	137
7.5	Conditions aux limites sinusoïdale	138
7.6	Points d'observation des variables étudiées	140
8.1	Représentation des matrices X' ($n' \times p'$) pour les variables de flux de chaleur, d'humidité relative et de température	141
8.2	Effet Guttman observé dans le nuage des individus. Condition aux limites type échelon en terme de teneur en humidité (w). Paroi avec isolation thermique extérieure (ITE)	142
8.3	Lecture globale des résultats d'une analyse en composantes principales (ACP)	143
8.4	ACP des résultats de simulation des configurations (en ITI et en ITE) en terme de flux de chaleur traversant la surface intérieure	145
8.5	Flux de chaleur traversant la surface intérieure. Configurations de parois en ITE (Polystyrène PSE et chanvre HLC1) et ITE (Laine minérale (LM) et chanvre HLC1) référence 5P1H, 5P1V, 10P1H, 10P1V, 20P1H, 20P2H, 20P2H1Vb. Condition aux limites sinusoïdale	146
8.6	ACP des résultats de simulation des configurations (en ITI et en ITE) en terme de flux de chaleur traversant la surface intérieure pour ITI et ITE	148
8.7	Flux de masse traversant la surface intérieure. Configurations de parois en ITE (Polystyrène PSE et béton de chanvre HLC1) et ITI (Laine minérale (LM) et béton de chanvre HLC1) référence 5P1H, 5P1V, 10P1H, 10P1V, 20P1H, 20P2H, 20P2H1Vb obtenu avec des conditions aux limites type échelon	149
8.8	Flux de masse traversant la surface intérieure. Configuration de paroi 10P1H isolée par l'intérieur avec du chanvre HLC1. Évaluation de l'effet du frein-vapeur et du revêtement	150
8.9	ACP des résultats des simulations des configurations (en ITI et en ITE) en terme de teneur en humidité dans la pierre calcaire	152
8.10	Teneur en humidité dans la pierre calcaire w pour les configurations de parois en ITE (Polystyrène PSE et chanvre HLC1) et ITE (Laine minérale (LM) et chanvre HLC1) référence 5P1H, 20P2H1V avec des conditions aux limites sinusoïdale	153

8.11	ACP des résultats en terme d'humidité relative (φ) à l'interface entre la pierre calcaire et l'isolant. Isolation thermique par l'intérieur (ITI) groupe I : configurations avec isolation en béton de chanvre HLC1 ; groupe II : configurations avec isolation en laine minérale. Isolation thermique par l'extérieur (ITE) groupe I : configurations avec isolation en béton de chanvre HLC1 ; groupes II, III et IV : configurations avec isolation en polystyrène PSE (φ observée dans les joint) ; groupe V : configurations avec isolation en polystyrène PSE (φ observée dans la pierre)	154
8.12	Humidité relative à l'interface entre la pierre et l'isolante. Isolation thermique par l'intérieur (ITI) : laine minérale et béton de chanvre HLC1. Isolation thermique par l'extérieur (ITE) : polystyrène PSE et béton de chanvre HLC1. . .	155
8.13	ACP des résultats d'humidité relative φ observée à l'interface entre la pierre calcaire et l'isolation par l'intérieur (ITI) en laine minérale. Groupe I : toutes les configurations φ observée dans la pierre et dans les joints.	156
8.14	ACP des résultats d'humidité relative φ à l'interface (ITI) (isolant en béton de chanvre HLC1). Groupe I : toutes les configurations φ dans la pierre et dans les joints.	157
8.15	ACP des résultats en terme température (T)	158
8.16	Teneur en humidité dans la pierre calcaire paroi ITI "cas 2014". Conditions aux limites extérieures et intérieures	161
8.17	Teneur en humidité dans la pierre calcaire paroi ITE "cas 2014". Conditions aux limites intérieures et extérieures	162
8.18	Humidité relative (φ) à l'interface entre la paroi en pierre calcaire et l'isolation intérieure (ITI) : isolation en laine minérale et béton de chanvre HLC1 avec et sans frein-vapeur, dans des conditions "cas 2014". Conditions aux limites extérieures	164
8.19	Détail deux jours : humidité relative (φ) à l'interface entre la paroi en pierre calcaire et l'isolation intérieure (ITI)	165
8.20	Humidité relative (φ) à l'interface entre la paroi en pierre calcaire et l'isolation extérieure (ITE) : isolation en polystyrène PSE et béton de chanvre HLC1, dans des conditions "cas 2014". Conditions aux limites extérieures	166
8.21	Détail deux jours : : humidité relative (φ) à l'interface entre la paroi en pierre calcaire et l'isolation extérieure (ITE)	167
8.22	Parois avec isolation thermique par l'intérieur (ITI) en laine minérale avec frein-vapeur et en béton de chanvre HLC1 sans frein-vapeur	168
8.23	Température à la surface intérieure (lignes continues et pointillées en couleur). Température de l'air du salon (ligne pointillée en noir), dans des conditions "cas 2014"	169
8.24	Flux de chaleur échangé à la surface intérieure (lignes continues et pointillés en couleur), dans des conditions de "cas 2014"	170
8.25	Teneur en humidité (w) dans la pierre calcaire paroi ITI soumise à des conditions "vague de chaleur". Conditions aux limites intérieures et extérieures . . .	172

8.26	Teneur en humidité w dans la pierre calcaire paroi ITE soumise à des conditions “vague de chaleur”. Conditions aux limites intérieures et extérieures	173
8.27	Humidité relative interface pierre-isolant paroi ITI “cas vague de chaleur”. Conditions aux limites extérieures	174
8.28	Humidité relative interface pierre-isolant paroi ITI “cas vague de chaleur”. Conditions aux limites extérieures	175
8.29	Température à la surface intérieure (lignes continues et pointillées en couleur). Température de l’air (ligne pointillée en noir) dans des conditions de “vague de chaleur”	177
8.30	Flux de chaleur échangé à la surface intérieure (lignes continues et pointillés en couleur), dans des conditions de “vague de chaleur”	177
A.1	Fichier météo EnergyPlus (.epw) - données mesurées dans la station météo	184
B.1	Période d’inoccupation : différence d’humidité relative entre les conditions standard et vague de chaleur ($\Delta\varphi_{int}$) : pour une zone exposée. Humidité relative extérieure (φ_{ext}) avec et sans l’effet de la vague de chaleur	185
B.2	Période d’inoccupation : différence d’humidité relative entre les conditions standard et vague de chaleur ($\Delta\varphi_{int}$) : pour une zone non-exposée. Humidité relative extérieure (φ_{ext}) avec et sans l’effet de la vague de chaleur	185
C.1	Données enregistrées à des pas de temps de 10 minutes et de l’heure. Période d’hiver : du 01 janvier 2015 au 03 janvier 2015	186
C.2	Données enregistrées à des pas de temps de 10 minutes et de l’heure. Période d’été : du 15 juillet 2015 au 15 juillet 2015	186
E.1	Température (T) simulée dans le salon des logements en ITI et en ITE dans des conditions obtenues par les simulations durant l’année 2014	189
E.2	Humidité relative (φ) simulée dans le salon des logements en ITI (courbe bleu) et en ITE (courbe verte) dans des conditions obtenues par les simulations durant l’année 2014	190
E.3	Température extérieure enregistrée par la station météo durant l’année 2014	190
E.4	Humidité relative extérieure enregistrée par la station météo durant l’année 2014	191
F.1	Température (T) simulée dans le salon des logements en ITI et en ITE dans des conditions de “vague de chaleur”	192
F.2	Humidité relative (φ) simulée dans le salon des logements en ITI (courbe bleu) et en ITE (courbe verte) dans des conditions de “vague de chaleur”	193
F.3	Température extérieure Meteonorm des conditions de “vague de chaleur”	193
F.4	Humidité relative extérieure Meteonorm conditions de “vague de chaleur”	194
G.1	Différence de pression de vapeur Intérieur et extérieur	195
G.2	Pression de vapeur Interface pierre-isolant paroi ITI	196
G.3	Pression de vapeur Interface pierre-isolant paroi ITI	196

Liste des tableaux

2.1	Outils de simulation du bâtiment, F : Fin, I : Intermédiaire, G : Grossier, N : Non défini/ Non calculé (Adapté de [Janssens <i>et al.</i> 2008], [Tittlein 2012], [Spitz 2012])	20
3.1	Mécanismes de transport de chaleur et d'humidité [Künzel 1995]	36
4.1	Épaisseur des matériaux utilisés pour la façade sud	55
4.2	Caractéristiques des capteurs données par le constructeur Delta OHM	57
4.3	Caractéristiques de mesure des capteurs placés à l'intérieur des logements	59
4.4	Caractéristiques des capteurs station météo (adapté de [Hendel <i>et al.</i> 2015a])	61
5.1	Propriétés de matériaux de la façade principale, après calage du modèle	80
5.2	Calage du modèle en ITE en terme de température : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale	83
5.3	Calage du modèle en ITI en terme de température : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale	84
5.4	Calage du modèle en ITE en terme d'humidité relative : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale	85
5.5	Calage du modèle en ITI en terme d'humidité relative : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale	86
5.6	Validation du modèle en ITE en terme de température : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale	89
5.7	Validation du modèle en ITI en terme de température : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale	89
5.8	Validation du modèle en ITE en terme d'humidité relative : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale	91
5.9	Validation du modèle en ITI en terme d'humidité relative : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale	91
6.1	Propriétés hygrothermiques du matériau A (figure 6.1) benchmark HAMSTAD N°2	121

6.2	Propriétés hygrothermiques des matériaux (figure 6.4) benchmark HAMSTAD N°5	124
7.1	Configurations des parois. Part volumique et direction du joint. N° de référence des configurations modélisées pour chaque parois de base (en ITI et en ITE)	129
7.2	Coefficient c_{pente} : valeur de la conductivité thermique en fonction de la teneur en humidité dans le matériau	133
7.3	Propriétés thermiques du béton de chanvre HLC1	133
7.4	Propriétés hygriques des matériaux : résistance à la vapeur d'eau μ_m et coefficient de transmission de vapeur δ_p (équation (1.4))	134
7.5	Coefficients d'échange de chaleur et de masse aux surfaces intérieure et extérieure ([Künzel 1995])	137
8.1	Différence de teneur en humidité (Δw) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] dans la pierre calcaire entre l'instant initial et l'instant final de chaque année. Parois avec isolation en laine minérale et en béton de chanvre. *fv : frein-vapeur	168
D.1	Propriétés hygrothermiques des matériaux benchmark HAMSTAD N°5 (figure 6.4). Matériau *sec, **humide et ***saturé	187
D.2	Paramètres généraux benchmark HAMSTAD N°5 (figure 6.1)	188

Nomenclature

	Description	Unité
α	Diffusivité thermique	$m^2 \cdot s^{-1}$
\bar{x}_h	Moyenne autour de l'heure de la donnée mesurée	-
β_s	Coefficient d'échange de masse	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
β_{ext}	Coefficient d'échange de masse à l'extérieur	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
β_{init}	Coefficient d'échange de masse à l'intérieur	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
δ_a	Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau de l'air	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
δ_p	Coefficient de diffusion de vapeur (perméabilité du matériau)	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
\dot{m}_i	Débits d'air entre les zones	$kg \cdot s^{-1}$
\dot{m}_{inf}	Débits d'air par les infiltrations	$kg \cdot s^{-1}$
\dot{m}_{sys}	Débit massique d'air provenant des systèmes	$kg \cdot s^{-1}$
\dot{Q}_i	Charges convectives internes	W
\hat{x}	Valeur de référence	-
λ	Coefficient de conductivité thermique	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{humid}	Conductivité thermique du matériau	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{sec}	Conductivité thermique du matériau sec	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
μ	Coefficient de résistance à la vapeur d'eau du matériau	-
ρ	Masse volumique	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_w	Densité de l'eau	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	$kg \cdot m^{-3}$
φ	Humidité relative	-
φ_{ext}	Humidité relative à l'extérieur	-
φ_{int}	Humidité relative à l'intérieur	-
A	Constante 1 pour le thermomètre à résistance de platine	$^{\circ}C^{-1}$
A_i	Aire de i	m^2
B	Constante 2 pour le thermomètre à résistance de platine	$^{\circ}C^{-2}$
b	Facteur d'approximation	-
c_p	Capacité thermique massique	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

c_w	Multiplicateur de la capacité d'humidité	
c_{pente}	Pente de conductivité thermique	-
D_w	Coefficient de diffusion de l'eau liquide	$m^2 \cdot s^{-1}$
D_φ	Coefficient de conduction de liquide	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
E	Effusivité thermique	$kJ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$
e	Épaisseur du matériau	m
g_v	Densité de flux de la diffusion de la vapeur	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
g_w	Densité de flux sous forme liquide	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
g_h	Flux de chaleur échangé à la surface	$W \cdot m^{-2}$
g_m	Flux de masse échangé à la surface	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
H	Enthalpie totale	$J \cdot m^{-3}$
h_i	Coefficient convectif	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
H_s	Enthalpie du matériau sec	$J \cdot m^{-3}$
h_s	Coefficient d'échange thermique	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h_v	Enthalpie de changement d'état massique	$J \cdot kg^{-1}$
H_w	Enthalpie de l'eau	$J \cdot m^{-3}$
h_{ext}	Coefficient d'échange thermique à l'extérieur	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h_{int}	Coefficient d'échange thermique à l'intérieur	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h_{mi}	Coefficient de transfert convectif massique	$m \cdot s^{-1}$
K_1	Coefficient de perméabilité de l'eau liquide	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
K_2	Coefficient de conduction capillaire	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$
K_w	Coefficient de conduction de l'eau liquide	$m^2 \cdot s^{-1}$
$kg_{m_{sl}}$	Planning des charges internes	$kg \cdot s^{-1}$
n	Nombre de données	-
N_{sl}	Nombre de charges internes	-
N_{surf}	Nombre de surfaces qu'entourent la zone	-
N_{zones}	Nombre de zones	-
p	Pas de temps auxquelles ont été recueilli les données	<i>heure/minutes</i>
P_k	Pression de succion capillaire	Pa
P_l	Pression de l'air	Pa

p_v	Pression de vapeur	Pa
p_{sat}	Pression de saturation	Pa
p_{vs}	Pression de vapeur à la surface de la paroi	Pa
p_{vz}	Pression de vapeur de l'air dans la zone	Pa
q	Densité de flux de chaleur	$W \cdot m^{-2}$
R	Résistance thermique	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
R_0	Résistance à T_{90}	Ω
R_D	Constante du gaz parfait	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
R_T	Résistance inconnue (sonde thermométrique de référence)	Ω
S_h	Terme source ou puits de chaleur	$W \cdot m^{-3}$
S_w	Terme source ou puits de vapeur	$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$
sd	Résistance à la diffusion de vapeur	m
T	Température absolue de l'air	K
t	Temps	heure/minutes
T_s	Température à la surface de la paroi	$^{\circ}C$
T_z	Température de l'air	K
T_{90}	Température (échelle international de température 1990)	$^{\circ}C$
T_{∞}	Température de l'air extérieur	K
$T_{eq,e}$	Température équivalente à l'extérieur (benchmark N°2)	$^{\circ}C$
$T_{eq,i}$	Température équivalente à l'intérieur (benchmark N°2)	$^{\circ}C$
T_{ext}	Température à l'extérieur	$^{\circ}C$
T_{int}	Température à l'intérieur	$^{\circ}C$
T_m	Température du matériau A (benchmark N°2)	$^{\circ}C$
T_{si}	Température de la surface i	K
T_{sup}	Température de l'air provenant des systèmes	K
T_{zi}	Température de la zone i	K
V_z	Volume de la zone	m^3
w	Teneur en humidité hygroscopique	$kg \cdot m^{-3}$
w_f	Saturation libre de l'eau	$kg \cdot m^{-3}$
W_z	Taux d'humidité dans la zone	$kg \cdot kg^{-1}$

W_z^t	Taux d'humidité dans la zone à l'instant actuel	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
W_∞	Taux d'humidité de l'air provenant de l'extérieur	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
W_{sup}	Taux d'humidité libérée par les systèmes	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
W_{surfs_i}	Taux d'humidité dans la surface i	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
x_i	Valeur mesurée	-

Introduction

En France, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire confondus) représente environ 45% de la consommation de l'énergie finale¹ et est responsable de plus de 20% des émissions de gaz à effet de serre (GES) [ADEME 2014]. À l'issue du Grenelle de l'environnement, l'État a fixé des objectifs de réduction des consommations d'énergie d'au moins 38% à l'horizon 2020 dans le parc de l'existant². Concernant les émissions de GES, la France s'est fixée l'objectif de diviser par 4 son empreinte à l'horizon 2050 ("facteur 4"). Dans ce contexte, l'état a lancé en 2013 le plan de rénovation énergétique de l'habitat qui cherche à mettre en place des actions pour atteindre l'objectif de rénovation thermique du parc de l'existant au rythme de 500 000 logements par an à l'horizon 2017³. Dans le cas de Paris, la ville porte également ses engagements en terme d'économies d'énergie et de lutte contre le dérèglement climatique à travers le plan d'action "Plan Climat de Paris". Ce plan a pour objectif de réduire les émissions de GES et la consommation d'énergie de 25% à l'horizon 2020⁴. Concrètement, le Plan Climat Paris a promu des opérations de rénovation thermique d'environ 4 500 logements par an entre 2007 et 2012. Dans la continuité de ce plan, le Plan Climat Énergie Paris a été mis en place en 2012. Ce dernier cherche à maintenir la dynamique de rénovation thermique (4 500 logements par an) à l'horizon 2020.

À Paris environ 82% des logements ont été construits avant la première réglementation thermique (RT1974) et 44% avant 1914 [Bigorgne *et al.* 2011]. Ainsi, le parc de l'existant constitue un grand potentiel en matière d'économies d'énergie et de lutte contre le réchauffement climatique. Les bâtiments anciens (datant d'avant 1914) ont été construits avec des murs épais (non isolés) avec des matériaux poreux e.g. la pierre calcaire. Les matériaux utilisés dans les constructions anciennes sont caractérisés par une forte inertie thermique et des propriétés hygroscopiques qui les rendent sensibles à la vapeur d'eau contenue dans l'air environnant. Les propriétés hygrothermiques de ces matériaux ont donc des effets : (i) qui confèrent aux bâtiments de bonnes qualités thermiques en période estivale et (ii) qui contribuent à réguler la température et l'humidité relative intérieure. En France, les politiques d'économie d'énergie et la réglementation thermique ont abouti à la mise en place de l'isolation thermique (dont la majorité constituée de matériaux non-hygroscopiques) afin de réduire les consommations d'énergie pendant l'hiver. Or, l'installation de ce dispositif dans la rénovation des bâtiments existants peut poser des difficultés qui sont du type pratique et de performance. L'isolation thermique par l'intérieur (ITI) réduit la surface de la zone de vie et risque de générer des ponts thermiques. L'ITI peut également engendrer des dégradations des performances des parois en période estivale et altérer leur comportement vis-à-vis de l'humidité. Concernant l'installation de l'isolation thermique par l'extérieur (ITE), cette solution est souvent limitée ou interdite en raison de l'héritage patrimonial et architectural

1. INSEE : Bilan énergétique de la France en 2014 <http://www.insee.fr/>

2. Chiffre donnée par rapport à l'année de référence 2009

3. Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer

4. Par rapport à 2004, année de référence

des façades dans une vieille ville comme Paris. D'autre part, dans les années à venir, il est prévu une augmentation des conditions extrêmes de chaleur avec des épisodes caniculaires et de vague de chaleur plus fréquents ; des conditions qui se sont déjà manifestées. En 2003, la France a été frappée par une vague de chaleur qui a fait 14 800 décès liés à la chaleur caniculaire (avec un pourcentage très élevé chez les personnes âgées) [Hémon *et al.* 2003]. En été 2015, l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) a rapporté 3 300 décès supplémentaires occasionnés par des conditions extrêmes de chaleur avec des températures atteignant les 39,7°C (enregistrées à Paris le 1^{er} juillet). Ainsi, l'ilot de chaleur urbain et les évolutions possibles du climat devraient être intégrés dans l'évaluation des performances des stratégies de rénovation du bâti ancien.

Ce travail de thèse porte sur l'évaluation du comportement hygrothermique des constructions anciennes en pierre calcaire⁵ rénovées, dans des conditions météorologiques actuelles et de vague de chaleur. Cette évaluation est réalisée à travers le cas d'étude de deux logements dans un bâtiment construit à la fin du XIXe siècle et rénovés en 2012. Ce sont deux logements avec des caractéristiques architecturales proches qui ont fait l'objet d'une rénovation thermique différente : sur la façade principale un des logements a été rénové avec ITI et l'autre avec ITE. Ce cas d'étude offre la possibilité de comparer les données obtenues par mesure et par simulation.

Concernant la méthodologie, ce travail de thèse porte sur une étude multiéchelle dans laquelle on évalue le comportement hygrothermique au niveau des logements et au niveau de la paroi. Ainsi, un modèle à l'échelle des logements a été construit sur un outil de simulation thermique dynamique. Le modèle a été calé et validé à l'aide des données de température et d'humidité relative mesurées dans chaque zone des logements. À cette échelle les transferts d'humidité ont été calculés tenant compte des infiltrations, de la ventilation (mécanique et naturelle) et des échanges entre les zones (bilan aéraulique). Cette hypothèse permet d'évaluer les transferts de chaleur et de masse à l'échelle de la paroi, en utilisant comme conditions aux limites à la surface intérieure les évolutions trouvées (de température et humidité relative) dans le volume d'air. À l'échelle de la paroi, un modèle basé sur le bilan de chaleur et de masse a été adopté et intégré dans un outil de simulation afin d'étudier le comportement hygrothermique des parois anciennes rénovées (parois poreuses multicouches).

Ce travail est alors structuré en trois grandes parties :

- *Une première partie* d'approche bibliographique qui comprend l'étude des propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés dans les bâtiments anciens ainsi que l'état de l'art sur la rénovation thermique avec les principaux postes visés dans les mesures de rénovation. Ensuite on fait la transition vers les outils de simulation thermique dynamique (STD) utilisées dans le domaine du bâtiment afin d'étudier leur capacité à prédire le comportement des bâtiments anciens rénovés. Dans cette partie on introduit

5. À Paris, la maçonnerie en pierre calcaire est, en effet, une des typologies les plus répandues et largement utilisée durant la période haussmannienne.

le modèle de transferts de chaleur et de masse qui est à la base du modèle adopté pour les simulations à l'échelle de la paroi.

- *Une deuxième partie* présente le cas d'étude et les résultats du modèle thermique dynamique à l'échelle des logements construit dans l'environnement EnergyPlus et DesignBuilder. Ce modèle est calé avec des données mesurées en 2014 et validé à l'aide des données mesurées en 2015. Ensuite une analyse comparative est réalisée afin d'évaluer le comportement des logements dans des conditions de vague de chaleur. À la fin de cette deuxième partie, on présente une première approche du confort thermique. Les résultats obtenus dans cette partie ont servi de données d'entrée pour la construction d'un modèle à l'échelle de la paroi exposée dans la dernière partie de cette thèse.
- *Une troisième partie* est consacrée à l'étude des transferts de chaleur et de masse des parois multicouches. En vue d'étudier le comportement hygrothermique des parois anciennes rénovées avec des isolants thermiques (ITI et ITE) des modélisations de différentes configurations de parois ont été effectuées. Dans cette partie on propose l'adaptation originale d'une méthode d'analyse des données (l'analyse en composantes principales, ACP) afin d'étudier des configurations dans l'ensemble et de distinguer les possibles effets de la nature, la position des couches isolantes et l'effet de la part volumique et direction des joints sur le flux de chaleur et d'humidité. Les modélisations, réalisées dans l'environnement COMSOL, ont été effectuées avec trois types de conditions aux limites : échelon, sinusoïdale et dans des conditions météorologiques à Paris, issues des simulations réalisées dans la deuxième partie (comme mentionné précédemment).

Première partie

APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE

À Paris, environ 44% des bâtiments ont été construits avant 1914 avec des murs épais non isolés et des matériaux poreux (e.g. la pierre calcaire), caractérisés par une forte inertie thermique. En France, les politiques d'économie d'énergie et la réglementation thermique des bâtiments (et la hausse du prix d'énergie) ont abouti à la mise en place de l'isolation thermique afin de réduire les consommations d'énergie en hiver, période durant laquelle les bâtiments sont les plus énergivores. Cependant, l'installation de ce dispositif peut avoir des effets défavorables sur les conditions intérieures, en période d'été. L'étude du comportement des logements anciens rénovés devient un enjeu majeur, d'autant plus si l'on considère que des conditions météorologiques extrêmes sont prévues, avec le réchauffement climatique, en période estivale (e. g., augmentation de la température moyenne accompagnée d'épisodes de vague de chaleur plus fréquentes). Cette partie présente l'état de l'art des propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés dans les bâtiments anciens en lien avec les enjeux de la rénovation thermique de ce type de constructions. Ensuite, les outils de simulation thermique dynamique des bâtiments et leur capacité à évaluer les performances des bâtiments anciens rénovés sont exposés. Finalement, dans le chapitre 3, la modélisation des transferts de chaleur et de masse en milieux poreux est présentée.

Le bâtiment ancien et la rénovation thermique

1.1 Propriétés hygrothermiques des matériaux dans les bâtiments anciens

Le caractère local des techniques de construction a donné lieu à des typologies très diversifiées dans le bâtiment ancien. En France, on distingue cependant quatre grandes familles de typologies constructives répandues avant la révolution industrielle : pisé en terre crue, brique en terre cuite, maçonnerie en pierre et murs en pan de bois [MEDDE 2013]. À Paris, trois typologies se sont développées avant 1914 : le pan de bois avec remplissage en moellon grossier-caillasse-plâtre, la maçonnerie en brique apparente (immeuble de type ouvrier) et la maçonnerie en pierre, cette dernière très répandue pendant la période Haussmannienne [Bigorgne *et al.* 2011]. À l'origine de ce caractère local des typologies, on trouve des matériaux très hétérogènes, dont les propriétés hygrothermiques sont difficiles à évaluer avec précision.

Concernant les enduits et les liants utilisés dans les bâtiments anciens, on trouve principalement trois matériaux : la chaux, le plâtre et l'argile. Pour les typologies en pan de bois et maçonnerie en pierre, les enduits extérieurs étaient réalisés à base de chaux ou de mélange de chaux et plâtre. Les enduits intérieurs étaient réalisés principalement en plâtre. Les liants utilisés dans la maçonnerie en pierre étaient constitués de mortiers à base d'argile, de plâtre ou de chaux, seuls ou mélangés. La caractéristique principale de ces matériaux vis-à-vis de l'humidité est une perméabilité importante à la vapeur d'eau, mais faible à l'eau sous forme liquide. Par exemple, dans le cas du plâtre appliqué à l'intérieur, ce matériau dit hygroscopique permet de réguler l'humidité à l'intérieur du local en absorbant l'excès et en le libérant lorsque l'air devient très sec [Cantin & Guarracino 2012].

1.1.1 Inertie thermique

1.1.1.1 Définition

Le bâti ancien est constitué de murs épais, caractérisé par sa robustesse et sa masse, ce qui lui confère une forte inertie thermique. L'inertie thermique est la capacité d'un matériau à ralentir et amortir une perturbation. Ce phénomène se traduit par le déphasage du pic de température intérieure par rapport au pic de température extérieure combiné à un effet

d'amortissement de l'amplitude de cette température. Plus la valeur de l'inertie est élevée, plus le matériau a la capacité d'absorber, de stocker et de restituer l'énergie dans le temps. [Royet *et al.* 2007], [Stéphane *et al.* 2014] ont mesuré, dans des bâtiment anciens non isolés, en période estivale, des écarts de température extérieure et intérieure entre 6 à 10°C avec des déphasages de 5 à 8 heures. La figure 1.1 illustre l'inertie thermique d'une maison ancienne construite avant 1900 en pierre calcaire. Sur la figure, on observe un lissage du pic de la température extérieure; le point de d'inflexion des deux températures (intérieure et extérieure) possède un déphasage de 8 heures. L'écart entre T_{max} extérieure et T_{max} intérieure est d'environ 6°C.

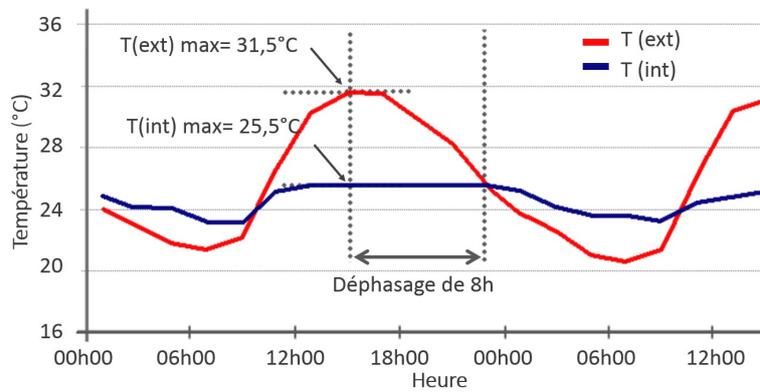


FIGURE 1.1 – Évolution des températures extérieure et intérieure en période d'été (28 et 29 juin 2005) d'une maison individuelle en maçonnerie en pierre dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur [Royet *et al.* 2007]

L'inertie thermique permet de réguler les systèmes (de chauffage et de climatisation) ou de retarder sa mise en route [Ferrari 2007]. Ainsi les bâtiments avec une masse thermique importante (et donc de l'inertie) offrent un potentiel pour économiser de l'énergie, spécialement en période d'été, tout en assurant des conditions intérieures optimales. Cependant pour que ce potentiel soit exploitable, l'inertie thermique doit être combinée à d'autres paramètres qui jouent un rôle important dans les stratégies (ou méthodes) passives telles que les échanges d'air et les gains solaires [Orosa & Oliveira 2012], [Aste *et al.* 2009], ainsi que l'isolation thermique.

1.1.1.2 Comment quantifier l'inertie thermique

Les propriétés permettant de quantifier l'inertie thermique d'un matériau sont liées à la valeur du coefficient de conductivité thermique λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], à la capacité thermique massique (à pression constante) c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] et à la masse volumique ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]. Deux propriétés thermiques permettant de quantifier l'inertie thermique d'un matériau dérivent des propriétés précédentes : la diffusivité et l'effusivité thermique.

Diffusivité thermique α [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] : représente la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. La diffusivité thermique fait intervenir la conductivité thermique λ et la capacité thermique massique c_p . Plus la valeur de α est faible, plus le front de chaleur prendra du temps à traverser le matériau, et donc plus l'inertie thermique sera importante. La diffusivité thermique est calculée à partir de l'expression (1.1) ci-bas :

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p} \quad (1.1)$$

Effusivité thermique E [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] : indique la capacité d'un matériau à absorber ou restituer plus au moins rapidement un apport de chaleur, *i.e.* la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie avec son environnement. L'effusivité thermique caractérise la sensation de chaud ou de froid que donne un matériau au toucher. Ainsi, plus la valeur de E est élevée, plus le matériau absorbe rapidement l'énergie sans se réchauffer (notamment en surface). Ceci est le cas de la pierre et du métal. L'effusivité thermique est calculée à partir de la valeur de λ , c_p et ρ , définie par l'équation (1.2) :

$$E = (\lambda \cdot \rho \cdot c_p)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

1.1.2 Propriétés hygriques des matériaux dans les constructions anciennes

Comme mentionné dans 1.1 les parois de bâtiments anciens sont constituées de matériaux poreux sensibles vis-à-vis de l'humidité. Dans le transfert d'humidité, la différence de pression (Δp) et les variations de l'humidité relative ($\Delta \varphi$) sont les forces motrices : l'air humide migre à travers la paroi de la zone dont la pression est plus élevée, vers la zone dont la pression est moins élevée. Les échanges d'humidité entre la paroi et l'air ambiant agissent donc comme des mécanismes de régulation à travers des cycles d'absorption¹ et de restitution (ou cycles de sorption/désorption). La quantité de masse échangée, entre la paroi et l'air, est fonction des propriétés hygriques des matériaux qui la composent.

1.1.2.1 Teneur en humidité hygroscopique (w)

Au sein d'un matériau, l'humidité peut être présente dans les trois états : solide, liquide ou gazeux². Cependant, déterminer ou mesurer leurs ratios s'avère difficile, car il est constamment soumis aux changements des conditions environnantes. [Künzel *et al.* 2005] réunit dans un seul terme l'état de l'eau : la teneur en humidité w [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] du matériau. w est une propriété qui caractérise sa capacité à stocker ou à restituer de l'humidité. Cette propriété est directement liée à la structure du matériau, notamment le type de réseau poreux et la taille de pores. Par conséquent, un matériau ayant un réseau de pores fins et

1. En physique l'*absorption* est la diffusion dans le solide, alors que l'*adsorption* reste un phénomène de surface.

2. A l'intérieur du matériau, le mouvement n'est possible qu'en état liquide ou gazeux

ouverts, sera plus sensible à la sorption d'humidité, donc avec des propriétés hygroscopiques importantes.

[Künzel 1995] propose une expression pour calculer la valeur de la teneur en humidité d'un matériau (à une humidité relative donnée) à travers un facteur d'approximation et à partir de la valeur de saturation libre de l'eau dans le matériau (équation (1.3)). Dans la figure 1.2 il compare les isothermes de sorption calculées et mesurées de quatre matériaux : brique de silice de chaux, béton cellulaire, brique en argile et plaque de plâtre.

$$w = w_f \cdot \frac{(b - 1) \cdot \varphi}{b - \varphi} \quad (1.3)$$

Avec w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] teneur en humidité en équilibre, w_f [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] saturation libre de l'eau³, b [-] facteur d'approximation ($b > 1$) et φ [-] humidité relative de l'air.

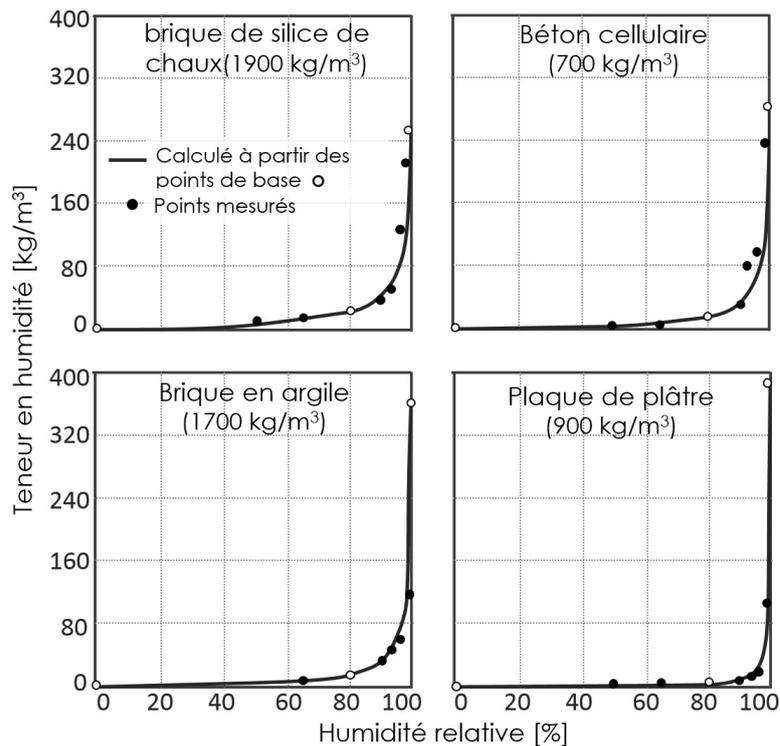


FIGURE 1.2 – Teneur en humidité de quatre matériaux. Comparaison de w calculée à partir de l'équation (1.3) (points vides) et des valeurs mesurées des expériences de stress en sorption et succion (points noirs) [Künzel *et al.* 2005] (version en français)

³. La saturation libre de l'eau est l'état de saturation le plus élevé que peut atteindre un matériau, pour des humidités relatives proches de 100%

1.1.1.2 Perméabilité à la vapeur d'eau (δ_p)

La perméabilité d'un matériau est définie comme la capacité de celui-ci à laisser transiter un gaz (dans ce cas de la vapeur d'eau) sous l'effet d'une différence de pression [Abelé *et al.* 2009]. La perméabilité à la vapeur d'eau δ_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] met en relation deux coefficients, l'un lié aux propriétés de l'air et l'autre lié aux propriétés du matériau : le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau de l'air δ_a [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] et le coefficient de résistance à la vapeur d'eau du matériau μ [-] .

Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau de l'air δ_a : Par transposition, le coefficient de diffusion à la vapeur d'eau de l'air est la capacité de l'air à laisser transiter de l'eau sous forme gazeuse par des mécanismes qui seront abordés dans le chapitre 3 de cette partie. δ_a peut être déterminé à partir de l'équation (1.4) qui met en relation la température de l'air et sa pression [Künzel 1995].

$$\delta_a = 2,0 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{T^{0.81}}{P_l} \quad (1.4)$$

où P_l [Pa] est la pression de l'air et T [K] est la température absolue de l'air.

Coefficient de résistance à la vapeur d'eau du matériau μ : représente la capacité du matériau à empêcher la vapeur d'eau de le franchir. Ce coefficient représente une barrière pour la vapeur d'eau, *i.e.* plus la valeur de μ est élevée, plus le matériau est étanche. Dans le cas des matériaux utilisés dans la construction des bâtiments anciens, la valeur de μ est souvent faible, *i.e.* ce sont souvent des matériaux perméables [Abelé *et al.* 2009]. Dans le marché des matériaux de construction il est plus commun de trouver la valeur de sd [m] ou résistance à la diffusion de vapeur qui met en relation le coefficient de résistance à la vapeur d'eau μ avec l'épaisseur e [m] du matériau ⁴ : $sd = \mu \cdot e$.

La perméabilité du matériau δ_p met en relation la diffusion de la vapeur d'eau de l'air δ_a et le coefficient de résistance à la vapeur d'eau du matériau μ par l'expression (1.5) :

$$\delta_p = \frac{\delta_a}{\mu} \quad (1.5)$$

1.2 La rénovation dans le bâtiment ancien

La rénovation de bâtiments existants représente un potentiel en terme environnemental, économie d'énergie et amélioration de la qualité des conditions intérieures. L'adoption de stratégies de rénovation adaptées et une bonne connaissance du comportement des constructions anciennes sont nécessaires pour atteindre les performances recherchées [Acre & Wyckmans 2015], [Chantrelle *et al.* 2011], [Poel *et al.* 2007]. Dans la littérature

4. <http://www.energieplus-lesite.be/>

de nombreuses recherches ont été développées pour étudier la rénovation thermique des bâtiments anciens. Ces recherches ont été axées principalement sur l'optimisation des mesures adoptées au travers de l'analyse de sensibilité paramétrique et l'utilisation d'outils d'aide à la décision multicritère [Stéphane *et al.* 2013], [Brown *et al.* 2013], [Rivallain *et al.* 2012], [Chantrelle *et al.* 2011], [Ouyang *et al.* 2009], sur l'évaluation de la rentabilité et le temps de retour de l'investissement [Wang *et al.* 2015], [Juan *et al.* 2010], [Ouyang *et al.* 2009], sur les limites des politiques de rénovation de bâtiments [Wang *et al.* 2015], [Galvin 2012] et sur les effets de la rénovation face à scénarios du climat futur [Chow *et al.* 2013].

1.2.1 Enjeux de la rénovation thermique dans un contexte réglementaire

1.2.1.1 Les politiques environnementales

En France les politiques environnementales ont été inspirées d'une part des conventions issues du Sommet de la terre tenu à Rio de Janeiro en 1992⁵ et d'autre part par les objectifs fixés dans le protocole de Kyoto⁶. La France a affirmé ses engagements de lutte contre le changement climatique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) à travers deux grands projets : le Plan Climat et le Grenelle de l'environnement⁷. Le secteur du bâtiment, étant un des plus gros consommateurs d'énergie (avec 45% de l'énergie finale consommée en France⁸), est une des principales cibles du Grenelle de l'environnement et du Plan Bâtiment Durable. La réglementation thermique s'inscrit ainsi dans une démarche environnementale et vient renforcer les engagements consignés dans le Grenelle de l'environnement pour atteindre les objectifs de réduction des consommations d'énergie.

1.2.1.2 La réglementation thermique et la rénovation du bâtiment ancien

Concernant le parc des bâtiments existants (résidentiel et tertiaire), la réglementation thermique⁹ (RT) stipule deux cas possibles sous conditions de surface, prix de l'intervention et date de construction du bâtiment : application de la RT existante globale ou élément par élément. La figure 1.3 résume les cas d'application de la RT dans la rénovation des bâtiments existants.

5. Sous l'influence du Sommet de Rio la France a intégré le développement durable comme objectif directeur inscrit dans la loi Barnier (1995) [Lacroix & Zaccàï 2010]. La Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) a été adoptée et ratifiée plus tard par 196 parties, dont la France. La 21ème édition de la conférence des parties (COP), organe suprême de la convention, a eu lieu à Paris en décembre 2015 la COP21 <http://www.cop21.gouv.fr/>

6. Première période 2008-2012 (entrée en vigueur le 16 février 2005), seconde période 2012-2020 <http://www.cop21.gouv.fr/fr/node/245>

7. Le Grenelle de l'environnement s'est concrétisé en deux lois : le Grenelle I (loi n° 2009-967 du 3 août 2009) et Grenelle II (Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>)

8. INSEE : Bilan énergétique de la France en 2014 <http://www.insee.fr/>

9. En application depuis 2007 avec la *RT2005*

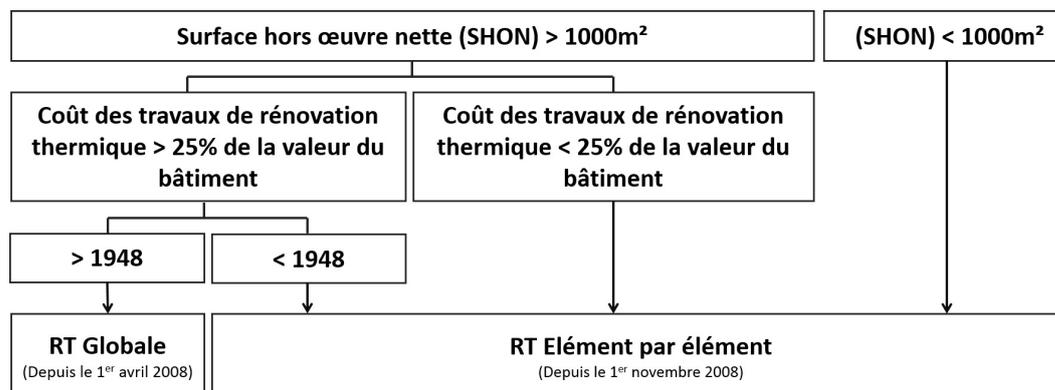


FIGURE 1.3 – Schéma de présentation du dispositif général de la réglementation thermique des bâtiments existants [Molle & Patry 2013]

Dans la figure 1.3 on observe que pour toute construction conçue avant 1948, les exigences de performances énergétiques de la réglementation thermique sont fixées soit pour les seuls systèmes (e.g. chauffage, eau chaude sanitaire (ECS)) ou soit par les composantes renouvelées indépendamment (e.g. les parois, les fenêtres)¹⁰, i.e., RT élément par élément. Cette condition fait partie du principe de précaution adopté par le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Cette condition cherche à éviter d'imposer le type de travaux à réaliser dans la rénovation, comme un outil des protection des constructions anciennes¹¹. Par conséquent, les propriétés hygrothermiques et les caractéristiques liées aux typologies constructives ne sont pas prises en considération de manière spécifique pour l'application de la réglementation ; l'effet d'une intervention sur le comportement global du bâtiment est également négligé. Par exemple, lorsque des travaux de rénovation sont prévus dans un mur extérieur du bâtiment avec de l'isolation thermique par l'intérieur (ITI), la réglementation thermique, exige une résistance thermique R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] minimale (égale en ITE qu'en ITI, e.g., dans les murs extérieurs ou dans la toiture dont la pente est supérieure à 60° $R \geq 2,3 \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) ; les échanges hygriques entre la paroi et l'air sont négligés.

1.2.2 Stratégies de rénovation et leurs performances

Dans une perspective d'amélioration des performances énergétiques et de la qualité des conditions intérieures, la rénovation des bâtiments anciens fait intervenir une série de paramètres axés principalement sur le type de parois et d'isolation, le type de vitrage et d'ossature, le type de ventilation et la performance des systèmes de chauffage et climatisation [Brown *et al.* 2013], [Stéphane *et al.* 2013]. Cependant d'autres paramètres liés aux modes de gestion et au comportement des usagers deviennent des paramètres importants pour évaluer la performance des bâtiments rénovés [Vorger 2015], [Yan *et al.* 2015]. Par ailleurs, [Brown *et al.* 2013], [Cantin & Guarracino 2012] ont mis en évidence l'existence d'une

10. Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants <http://www.legifrance.gouv.fr/>

11. http://www.territoires.gouv.fr/IMG/pdf/atheba_exigences.pdf

corrélation entre les paramètres mentionnés précédemment. À titre d'exemple, les stratégies portant sur les fenêtres et l'ossature ont une influence à la fois sur le débit de ventilation, la qualité de l'air intérieur, la luminosité de l'espace et sur les gains solaires.

Les études réalisées à ce sujet convergent sur le fait que la solution la plus efficace implique une minimisation des transferts thermiques à travers la paroi, associée aux stratégies de ventilation et de l'intégration d'équipements performants. Un autre constat aussi important est le rapport directement proportionnel entre efficacité et coût d'investissement, i.e., de manière générale, la stratégie la plus efficace peut s'avérer la plus coûteuse [Brown *et al.* 2013], [Cantin & Guarracino 2012], [Ouyang *et al.* 2009], [Rivallain *et al.* 2012]. Concernant les stratégies de rénovation adoptées dans les bâtiments anciens (particulièrement ceux qui ont été construits avant 1914), elles ne sont pas toujours les plus appropriées pour garantir les économies d'énergie requises ou assurer une qualité de l'air intérieur [Stéphane *et al.* 2013].

1.2.3 Postes visés dans les interventions de rénovation

1.2.3.1 Le renouvellement d'air

D'après [Chenu *et al.* 2005] la gestion des échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur devient un des aspects les plus importants dans la rénovation, il est d'autant plus important si une isolation est mise en place. Un débit (optimal) de ventilation non garanti pourrait engendrer des problèmes pathologiques liés à l'humidité. Le renouvellement d'air a un impact sur la qualité de l'air intérieur, l'évolution de la température et de l'humidité relative de l'air.

Concernant la ventilation naturelle, en période estivale, [Chenu *et al.* 2005] a mis en évidence l'effet du renouvellement d'air en débit nocturne sur la température intérieure pendant la période d'été. Par exemple, dans la zone climatique H2d, pour des températures extérieures allant jusqu'à 32,5°C, avec un débit nocturne de $5vol \cdot h^{-1}$ (trois fois supérieur au débit journalière $\sim 1.5vol \cdot h^{-1}$), la température intérieure dépasse rarement les 27°C, contre des températures allant jusqu'à 30°C pour un débit nocturne de $1,5vol \cdot h^{-1}$ (similaire au débit journalier). D'autre part, [Cantin *et al.* 2010] affirme que des caractéristiques liées à l'architecture des constructions anciennes ont une influence sur la ventilation naturelle et sur la qualité de l'air intérieur ; ainsi les logements traversants possèdent des conditions adéquates pour une circulation d'air naturelle.

1.2.3.2 L'enveloppe du bâtiment et l'isolation thermique

La fonction de l'isolant est, d'une part, de limiter les pertes énergétiques (lorsque le volume d'air intérieur est sous l'effet d'un système chauffage ou de climatisation) et d'autre part, réduire l'influence des conditions extérieures [Stazi *et al.* 2013], [Yilmaz 2007]. Le bâtiment ancien est très sensible à son environnement climatique et aux variations de conditions extérieures [Royet *et al.* 2007]. La mise en place d'une couche isolante vient perturber le

comportement des anciennes constructions et peut engendrer la dégradation de la paroi si des mesures adaptées ne sont pas prises en considération [Cantin *et al.* 2010]. L'installation de l'isolation thermique pose deux difficultés majeures : premièrement, lorsqu'elle est mise à l'intérieur la surface de vie est réduite, des ponts thermiques peuvent être générés à l'intersection des différents éléments (paroi + plancher, paroi + cadre des fenêtres, ...) et l'effet de l'inertie thermique est affecté [Manyes *et al.* 2013]; deuxièmement, l'isolation thermique par l'extérieur, dans de multiples cas, n'est pas envisageable (ou très complexe à mettre en œuvre) à cause de l'héritage patrimonial et architectural des façades, ceci est le cas de multiples immeubles à Paris.

Au regard des propriétés hygriques des matériaux de constructions anciennes, l'installation d'une isolation thermique par l'intérieur s'avère la plus risquée vis-à-vis de l'humidité, elle pourrait engendrer des problèmes de condensation à l'interface des deux matériaux [Héberlé *et al.* 2014], [Berger *et al.* 2012], [Bigorgne *et al.* 2011], [Aelenei & Henriques 2008]. Pour illustrer cette situation, en période d'hiver, une paroi avec isolation thermique intérieure est soumise à d'importants changements de température et d'humidité. Durant cette période, l'interface mur/couche isolante est souvent dans des conditions de température et d'humidité optimales engendrant de la condensation [Maugard 2013].

D'autre part, la performance thermique des différentes configurations de murs isolés et leur effet sur le chauffage et le refroidissement ont été étudiés par différents auteurs. Les résultats ont montré que les parois avec isolation thermique extérieure (ITE) ont une meilleure performance que celles avec isolation thermique par l'intérieure (ITI). Ce comportement est lié aux propriétés dynamiques, la quantité de masse et l'arrangement spécifique ou la répartition des couches constituant la paroi [Kossecka & Kosny 2002], [Ozel 2014]. Ce dernier a étudié trois configurations de parois dans lesquelles une couche isolante en polystyrène extrudé (XPS) est mise à l'intérieur, à l'extérieur et au milieu d'une paroi en brique. Dans ses résultats l'auteur constate que la solution avec isolation thermique par l'extérieur permet d'obtenir les meilleures performances. [Kolaitis *et al.* 2013] a comparé les performances d'un bâtiment avec ITI et ITE (en brique et polystyrène PSE) pour un bâtiment sans isolation thermique (paroi en brique). L'auteur a constaté que des économies d'énergie des systèmes avec isolation (ITI ou ITE) peuvent varier en fonction du comportement de l'occupant (entre 21% et 89%). Cependant indépendamment du comportement de l'occupant, avec ITE les économies d'énergie sont en moyenne 8% supérieures à celles obtenues avec ITI.

1.2.3.3 Les surfaces vitrées

Dans les stratégies de rénovation du bâti ancien, le passage du simple vitrage au double ou triple vitrage, avec basse émissivité et avec des lames d'air ou d'argon, fait partie des solutions permettant d'améliorer la performance de ce type de constructions [Verbeeck & Hens 2005]. Par exemple, [Chenu *et al.* 2005] a montré que le passage d'un simple vitrage à double ou triple vitrage peu émissif à lames d'argon et châssis en bois

non renforcé permet de gagner environ 4 à $6kWh.m^{-2}.an^{-1}$ (double vitrage) et de 9 à $11kWh.m^{-2}.an^{-1}$ (triple vitrage) avec châssis renforcé pour une maison localisée à Mulhouse.

1.2.4 Enjeux de la rénovation thermique dans un contexte évolutif du climat

Comme mentionné précédemment, la rénovation thermique des bâtiments anciens s'inscrit dans une démarche environnementale qui cherche à réduire l'impact de ce secteur en matière de consommation d'énergie¹²[Yin *et al.* 2011]. L'état de l'art réalisé au chapitre 1.1 donne un aperçu de la portée des mesures de rénovation thermique sur les performances énergétiques, principalement en hiver (période pendant laquelle les bâtiments sont plus dépendants d'énergie) et pour des zones climatiques spécifiques [Ouyang *et al.* 2009], [Brown *et al.* 2013], [Ferrante & Semprini 2011], [Morelli *et al.* 2012]. De plus, [Dascalaki & Santamouris 2002] ont souligné que les performances du bâtiment sont fortement dépendantes des conditions climatiques du site d'implantation. Les résultats d'évaluation sont donc difficilement transposables. D'autre part, dans la littérature on trouve peu d'études prospectives sur l'impact de la rénovation thermique sur les bâtiments dans des climats futurs. [Lemonsu *et al.* 2013] a étudié l'évolution du climat urbain de Paris à partir des données enregistrées entre 1970 et 2007 afin de prédire des conditions climatiques futures en se basant sur deux scénarios climatiques : A1B et A2¹³. Les auteurs insistent sur le fait que dans les années à venir, les effets du changement climatique et l'évolution des activités en ville, vont conduire à des changements du climat urbain avec des températures plus élevées quel que soit le scénario. Ceci aura des conséquences variées en termes de ressources, de confort, de pollution et de consommation d'énergie. Par exemple, à Paris dans des zones urbaines résidentielles (suburbaines), en période d'hiver, les températures dans le scénario A1B (optimiste) et A2 (pessimiste) seront respectivement de minimum $+1,8^{\circ}C$ et de $+2,24^{\circ}C$ par rapport aux températures moyennes présentes. En été ces prédictions sont plus significatives par rapport à l'hiver : une augmentation de la température de minimum $2,92^{\circ}C$ en scénario A1B et de $4,12^{\circ}C$ en scénario A2. [Lemonsu *et al.* 2013] conclue son étude par des indices qui montrent une décroissance du nombre des jours de froid, très froid, de gel et de glace en France. À

12. En France, à l'issue du Grenelle de l'environnement, l'État a fixé des objectifs de réduction des consommations d'énergie d'au moins 38% à l'horizon 2020 dans le parc de l'existant (par rapport à l'année de référence 2009) <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Batiments-existants-.html>. Concernant les émissions de gaz à effet de serre (GES), la France s'est fixé l'objectif de diviser par 4 son empreinte à l'horizon 2050 : "facteur 4". Dans le secteur du bâtiment résidentiel ce facteur vise à réduire les émissions de 86,3% par rapport aux émissions de 1990 correspondant à environ 12,1% des émissions directes (18% résidentiel et tertiaire) [Brunetière *et al.* 2013]

13. Le SRES (Special Report on Emissions Scenarios) est un rapport publié par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) où quatre familles de scénarios ont été simulées afin de prédire les évolutions d'émissions de GES des climats futurs. Parmi ces quatre familles on trouve le scénario **A1B** qui se caractérise pour une rapide croissance économique, 9 milliards d'habitants en 2050 (suivi d'un déclin), rapide développement des technologies, un monde convergent avec une phase d'équilibre sur toutes les ressources. Un autre scénario, le **A2** désigne un monde divisé avec une orientation de développement économique local et une population en constante croissance

l'opposé, pour les jours d'été, les scénarios étudiés montrent qu'à l'horizon 2099, les jours chauds et très chauds seront plus fréquents avec des risques de vagues de chaleur.

En 2003, la France a été frappée par une vague de chaleur qui a fait 14800 décès liés à la chaleur caniculaire avec un pourcentage très élevé chez les personnes âgées [Hémon *et al.* 2003]. En été 2015, l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) a rapporté 3300 décès supplémentaires, occasionnés par les 3 épisodes de canicule de cette année. Dans des conditions de vague de chaleur et caniculaires, les températures extérieures sont anormalement élevées pendant une période prolongée de jours et de nuits¹⁴. En ville, les vagues de chaleur et leur impact sur la santé sont aggravés par l'îlot de chaleur urbain (ICU) [Smargiassi *et al.* 2009]. Concernant les systèmes de chauffage et refroidissement, [Santamouris *et al.* 2001] montre dans une étude réalisée à Athènes que sous l'effet de l'ICU, la charge de refroidissement des bâtiments localisés dans les zones urbaines denses peut atteindre le double, alors que pendant la période d'hiver la charge de chauffage décroît de 30% dans la même zone par rapport aux zones rurales. Dans ce type de conditions, [Tremeac *et al.* 2012] montre le rôle des systèmes de climatisation pour la prévention de la mortalité, mais attire aussi l'attention sur la gestion de ces systèmes et sur l'impact des rejets thermiques de la climatisation dans le climat urbain. [Chow *et al.* 2013] a étudié l'effet de la rénovation thermique (portant sur la performance des surfaces opaques et vitrées) sur la demande en chauffage et climatisation des climats futurs (2020, 2050 et 2080 recréés à partir de TRY¹⁵) dans la région de Ningbo en Chine (côte est). Cette région présente des conditions extrêmes en hiver et en été, avec un niveau élevé d'humidité. Les résultats montrent une brusque tendance à la hausse de la demande de climatisation, contre une réduction progressive et moins sévère de la demande en chauffage dans des climats à l'horizon 2080. Avec une tendance accentuée au réchauffement, accompagnées de périodes estivales plus prolongées (auxquelles s'ajoutent les effets de l'ICU et les vagues de chaleur), les scénarios du climat futur deviennent un sujet clé dans l'évaluation des performances des bâtiments rénovés.

14. L'alerte vigilance caniculaire est déclenchée par Météo-France lorsque les seuils des indices biométéorologiques (IBM) minimales et maximales (pour chaque ville) sont atteints pour trois jours consécutifs. A Paris le seuil pour la moyenne de températures minimales et maximales correspond au couple 21-31°C [Lemonsu *et al.* 2013], [Laaidi *et al.* 2012]

15. Test Reference Years ; Années de référence

Simulation thermique dynamique des bâtiments anciens

2.1 État de l’art des logiciels de simulation thermique et dynamique de bâtiments

Les outils de calcul énergétique dans le domaine du bâtiment sont des outils incontournables pour évaluer l’efficacité énergétique, les choix des constructions ou les stratégies de rénovation énergétique, mais aussi la conformité avec la réglementation thermique, entre autres [Spitz 2012]. Selon l’ADEME¹ il existe quatre familles d’outils de calcul énergétique ou thermique de bâtiment : les logiciels de détermination des performances énergétiques tels que les DPE², les logiciels de calcul réglementaire, les logiciels de bilan thermique et les logiciels de simulation thermique dynamique (STD). Dans le cadre de ce projet de recherche, seuls les outils de simulation thermique dynamique font l’objet d’analyse. Les STD utilisent des modèles numériques détaillés permettant d’évaluer l’évolution temporelle et thermique du bâtiment [Crawley *et al.* 2008], contrairement aux outils de calcul thermique stationnaire (outils de conformité réglementaire ou de DPE), les STD permettent de tenir compte de l’inertie thermique du bâtiment dans les simulations. Cependant il faut savoir qu’un modèle est la représentation abstraite et simplifiée d’un phénomène réel qu’induit des hypothèses simplificatrices [Faisandier 2014]. [Royet *et al.* 2007] a réalisé une analyse des performances des différentes typologies de constructions anciennes, localisées dans différentes régions en France. Dans son étude, il a constaté des écarts très importants, entre 54% et 260%, entre les données calculées (par un moteur de calcul réglementaire) et les données mesurées par rapport à la consommation en chauffage et eau chaude sanitaire (ECS). D’où l’importance d’adopter des outils de simulation thermique dynamique (performants et fiables) pour évaluer les performances des constructions anciennes. Ces outils prennent en considération des caractéristiques thermiques déterminantes pour mieux prédire le comportement de ce type de construction.

La simulation thermique dynamique permet de prédire les charges sensibles et latentes pour estimer les besoins en chauffage ou en climatisation. Au cours des dernières années les codes de calcul ont fait des avancées significatives pour mieux estimer les charges sensibles, contrairement aux estimations des charges latentes. Concernant ces dernières, les outils de

1. Agence de l’environnement et de la maîtrise de l’énergie ADEME : les logiciels de calcul énergétique. <http://www.ademe.fr>

2. diagnostic de performance énergétique

simulation ont développés le calcul à travers l'estimation du contenu d'humidité dans l'air principalement par rapport aux sources/puits internes, en négligeant les échanges avec les composants (parois, meubles,..) du bâtiment. Cet aspect conduit à des résultats d'évaluation de l'humidité peu ou pas fiables [Woods *et al.* 2013]. D'ailleurs, certains outils de simulation thermique dynamique ne prennent en considération que les transferts de chaleur, i.e., les transferts de masse sont complètement négligés [Salomon *et al.* 2005].

Dans le cadre du projet IE ECBCS Annex 41 [Janssens *et al.* 2008] un classement des logiciels en fonction de leur domaine d'application et de la granularité du modèle a été réalisé (tableau 2.1). Ce répertoire a été complété avec d'autres logiciels analysés dans le cadre des travaux réalisés par [Spitz 2012], [Tittlein 2012]. Ce classement donne un aperçu des logiciels STD les plus utilisés dans la simulation des performances thermiques du bâtiment.

Tableau 2.1 – Outils de simulation du bâtiment, F : Fin, I : Intermédiaire, G : Grossier, N : Non défini/ Non calculé (Adapté de [Janssens *et al.* 2008], [Tittlein 2012], [Spitz 2012])

Nom	Licence	Transfert	Finesse du modèle									
			Volume d'air				Enveloppe					
			F	I	G	N	F	I	G	N		
BSim	Commerciale	Chaleur Masse		X					X			
EnergyPlus v.8.1.	Libre	Chaleur Masse		X					X			
ESP-r	Libre	Chaleur Masse		X					X			
IDA-ICE	Commerciale	Chaleur Masse		X					X			
SPARK 2.01	Libre	Chaleur Masse	X	X					X			
TRNSYS 16.00	Commerciale	Chaleur Masse		X					X		X	
Pléiades+Comfie	Commerciale	Chaleur Masse		X			X		X			X
CoDyBa	Libre	Chaleur Masse		X					X			X

2.2 Finesse des modèles simulation thermique dynamique (STD)

Concernant la finesse du modèle il faut distinguer deux composants : le volume d'air et l'enveloppe. Dans ces deux composants on trouve des finesses des modèles qui vont du très

fin au grossier. Lorsque les simulations visent l'ensemble du bâtiment, des hypothèses sont appliquées de manière à assurer une bonne précision des résultats pour un temps de calcul raisonnable. La finesse indique la manière dont le volume d'air est discrétisé ou la dimension de la discrétisation spatiale de l'enveloppe. Ci-après les types de modèles développés par rapport à leur granularité [Janssens *et al.* 2008].

1. Modèle très fin³

Du point de vue thermique, l'avantage qu'offre ce type de modèle est la possibilité de détecter les points faibles dans l'enveloppe (e.g. ponts thermiques). Cependant, ils demandent une description détaillée de la géométrie, un temps de simulation considérable et peuvent présenter des problèmes de convergence. Ces modèles sont particulièrement utilisés pour évaluer des aspects critiques et pour de courtes périodes de simulation.

- *Enveloppe* : modèle 3D, il permet de calculer le flux de masse et de chaleur, ainsi que les ponts thermiques en 3D, discrétisation en volume ou éléments finis.
- *Volume d'air* : modélisation *CFD*⁴ pour étudier la température, la vitesse et les concentrations dans le volume d'air. La discrétisation se fait par volumes finis, dans chaque volume on applique les équations de conservation.

2. Modèle fin⁵

Ce type de modèle permet de simuler des volumes non homogènes avec des temps de calcul raisonnables. Cependant, l'adaptation de lois empiriques est nécessaire pour évaluer les points critiques.

- *Enveloppe* : modèle 2D.
- *Volume d'air* : utilise le modèle zonal. Dans chaque zone, le volume est discrétisé en volume fini.

3. Modèle intermédiaire⁶

C'est un modèle qui permet de faire des simulations relativement rapides pour l'ensemble d'un bâtiment multizone. Il permet d'évaluer la performance du bâtiment pour de longues périodes (e.g. saison, année). Cependant, ce modèle ne tient pas compte des gradients de température dans une zone, le volume d'air est représenté par un point et l'évaluation des points critiques est négligée.

3. Very fine-grained model

4. Computational Fluid Dynamics

5. Fine-grained model

6. Intermediate-grained model

- *Enveloppe* : modèle 1D.
- *Volume d'air* : modèle multizone avec des hypothèses de volume d'air parfaitement homogène. Il permet de modéliser un groupe de zones soumises aux mêmes conditions, ou bien entre zones ayant des conditions distinctes ; afin d'évaluer les échanges et les évolutions des grandeurs observées entre elles.

4. Modèle grossier⁷

Ce type de modèle permet d'avoir des estimations de la consommation d'énergie du bâtiment. Cependant il ne peut pas être adopté pour l'évaluation des bâtiments complexes.

- *Enveloppe* : modèle de fonction de transfert. Ce modèle néglige les conditions initiales dans l'enveloppe pour le calcul du flux de chaleur ou plus rarement de masse. Ce type de modèle peut cependant donner des bonnes estimations des consommations d'énergie dans le cas des bâtiments simples ou une seule zone.
- *Volume d'air* : modèle monozone ou le bâtiment tout entier est représenté par un volume d'air bien mélangé.

Dans le domaine du bâtiment, l'objectif premier du modèle est de prédire les fluctuations de température et les effets sur la consommation d'énergie. Dans ce cas, le modèle avec finesse intermédiaire s'adapte assez bien aux phénomènes thermiques étudiés [Janssens *et al.* 2008]. À l'opposé, en ce qui concerne la simulation des transferts de masse (et donc d'humidité), les modèles intégrés dans les outils STD sont en général des modèles très simplifiés [Künzel *et al.* 2005].

2.3 Les outils de simulation thermique dynamique (STD)

2.3.1 Description

L'environnement (ou code) du modèle des outils de simulation destiné à l'évaluation de la performance des bâtiments peut être classé en trois catégories : monolithique, modulaire et basés sur des systèmes d'équations. Les codes de calcul *monolithiques* sont, comme l'indique son nom, structurés dans un seul bloc algorithmique. Généralement ces codes possèdent une fonctionnalité bien définie et difficilement modifiable afin de répondre à un objectif précis défini dès le départ. L'utilisateur saisit les données d'entrée (ou les sectionne dans une bibliothèque déjà fournie) à travers une interface, dans la plupart des cas, graphique. Les environnements *modulaires* permettent de fragmenter le système en "modules" indépendants, i.e. composants autonomes et interconnectés qui composent le code et qui le rendent plus flexible pour des évolutions. Dans les environnements *basés sur des systèmes d'équations*

7. Coarse-grained model

le problème se formule par association de systèmes d'équations. Cette catégorie vise à résoudre un système d'équations afin d'obtenir un résultat. Les codes basés sur les systèmes d'équations sont non orientés, i.e. ils permettent la vérification d'un modèle (faisant partie de l'ensemble du système), sans lancer la simulation d'autres modèles [Mora 2003]. Les logiciels présentés dans le tableau 2.1 sont alors décrits ci-après. Ces outils STD sont les plus utilisés à l'heure actuelle en France et au niveau international.

Concernant les critères de choix de l'outil STD retenu pour les simulations des cas d'étude, ceux-ci sont orientés principalement sur la capacité du logiciel à tenir compte de la dynamique du bâtiment, à intégrer des facteurs environnants et de régulation, à tenir compte des évolutions de l'humidité dans le volume d'air (même si dans la première étape du projet les échanges paroi et volume d'air ne sont pas pris en considération) et sur la flexibilité dans le traitement des données d'entrée et des résultats observés à la sortie du modèle.

2.3.2 Les outils STD existants

2.3.2.1 Bsim

Bsim⁸ (Building simulation) est un outil de simulation thermique du bâtiment et de ses installations créé au Danemark. Ce logiciel permet d'analyser les conditions thermiques d'une zone, la consommation d'énergie, les conditions d'éclairage, entre autres. Bsim intègre un module de transfert d'humidité (couplé aux transferts de chaleur). Il possède une structure modulaire qui comprend : une interface d'édition graphique, des modèles pour simuler le rayonnement solaire et les masques, les transferts de chaleur et d'humidité dans l'air, l'éclairage naturel, un module CAO⁹ pour importer, un module pour vérifier la conformité des installations au Danemark et un module avec une base de données des matériaux et leurs propriétés.

2.3.2.2 ESP-r

ESP-r est un outil STD créé en langage C++ dans les années 70 par des chercheurs de l'université de Strathclyde à Glasgow. ESP-r est un environnement monolithique basé sur la méthode des volumes finis et des lois de conservation d'énergie. Le logiciel intègre la simulation thermique, acoustique et d'éclairage. ESP-r permet de faire une évaluation des facteurs qui ont une influence sur le comportement thermique du bâtiment tels que la forme du bâtiment, les matériaux, le flux d'air, la végétation, les conditions du site, l'occupation, etc. L'utilisateur peut définir la résolution spatiale et temporelle et saisir la géométrie du bâtiment à l'aide d'un outil CAO pour l'exporter vers le logiciel.

8. Danish building research institut <http://sbi.dk/en/bsim/about-bsim#bv98>

9. CAO : Conception assistée par ordinateur ; CAD : Computer-aided design

Le logiciel est devenu open source afin d'ouvrir les possibilités de développement dans la communauté scientifique [Tittlein 2012].

2.3.2.3 IDA-ICE

IDA-ICE¹⁰ (Indoor Climate and Energy¹¹) est un environnement de simulation des performances du bâtiment de l'environnement IDA créé en Suède, dont la première version a été lancée en 1998 à partir des travaux de thèse réalisés par Per Sahlin. IDA-ICE est un outil STD multizone qui permet de simuler le comportement d'un bâtiment en intégrant les systèmes et leur régulation. L'environnement IDA est basé sur le système d'équations différentielles algébriques¹². Le principe du logiciel est de permettre un accès au modèle à l'utilisateur où chaque équation sous-jacente peut être consultée, et chaque variable peut être connectée [Sahlin 1996], [Sahlin & Bring 1991], [Tittlein 2012].

2.3.2.4 SPARK 2.01

SPARK (Simulation Problem Analysis and Research Kernel) est un environnement de simulation qui s'est développé dans les années 80 au Berkeley lab.¹³ aux États Unis. SPARK permet de simuler et résoudre des systèmes d'équations algébriques différentielles non linéaires. Le langage de programmation du logiciel est orienté objet lequel permet de décomposer le modèle et de l'interconnecter. Grâce à cette structure, SPARK peut être utilisé dans différents domaines de l'ingénierie, autre que le bâtiment, où des systèmes peuvent être décrits en termes d'équations différentielles et algébriques. Dans le domaine du bâtiment SPARK permet de simuler les systèmes de chauffage, de climatisation et faire l'analyse des transferts de chaleur [SPARK 2003] , [Spitz 2012].

2.3.2.5 TRNSYS

TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation) a été développé dans les années 70 à l'Université du Wisconsin-Madison aux États Unis en langage FORTRAN¹⁴. La diffusion du logiciel en France est assuré par le CSTB¹⁵. TRNSYS est un outil STD pour simuler des systèmes d'énergie thermique et électrique qui intègre un module permettant de simuler le bâtiment et son équipement (chauffage et climatisation). La structure modulaire et ouverte du logiciel permet d'intégrer de manière flexible des composants (modèles mathématiques décrivant le

10. <http://www.equa.se/en/ida-ice>

11. Climat intérieur et énergie

12. DAE : Differential algebraic equations

13. Lawrence Berkeley National Laboratory ; Laboratoire national Lawrence Berkeley

14. Depuis la version 15, possibilité d'intégrer d'autres langages de programmation, afin d'étendre les capacités

15. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

comportement physique d'un système) et le connecter aux composants existants¹⁶, lesquels comprennent un grand nombre de systèmes tels que solaire, photovoltaïque, et des systèmes chauffage, ventilation et climatisation (CVC). Le bâtiment est représenté par un modèle multizone, le type 56, qui permet de simuler le comportement thermique du bâtiment et de le coupler aux systèmes (définis dans les composants/types), mais aussi à d'autres outils de modélisation (e.g. COMIS, pour simuler l'aspect aéraulique). L'avantage de ce logiciel est que chaque modèle possède sa propre méthode de résolution. L'ordre de résolution est géré par un gestionnaire qui lit les connexions choisies par l'utilisateur [KEILHOLZ & SETTE 2005], [Tittlein 2012].

2.3.2.6 Pléiades+Comfie

Pléiades+Comfie est un environnement monolithique. Cet outil de simulation thermique dynamique (STD)¹⁷ a été développé à la fin des années 80 par le Centre Efficacité énergétique des systèmes (CES) de MINES-ParisTech. Le logiciel basé sur un modèle aux différences finies réduit par analyse modale permet de simuler un bâtiment multizone (40 zones thermiques max.) avec un pas de temps paramétrable. Le logiciel intègre une interface graphique Alcyone qui permet de saisir la géométrie du bâtiment (avec visualisation en 3D), la composition des parois opaques et vitrées, et de définir les masques et le type de zone thermique. Comme dans les hypothèses de nombreux outils STD, le logiciel estime que la température¹⁸ dans la zone est homogène (il néglige les phénomènes de stratification liée à la hauteur de la pièce). D'autre part, l'analyse des évolutions de l'humidité dans les zones n'est pas intégrée dans les simulations, ainsi que le calcul des infiltrations. Concernant les équipements et les besoins énergétiques, la simulation se fait de manière très simplifiée : une puissance de chauffage ou de refroidissement est calculée à chaque pas de la simulation pour assurer une température de consigne définie dans une pièce, i. e. le fonctionnement réel dynamique des systèmes n'est pas pris en compte [Vorger 2015], [Tittlein 2012], [Spitz 2012], [Salomon *et al.* 2005].

2.3.2.7 CoDyBa

CoDyBa (Comportement Dynamique des Bâtiments) a commencé son développement au CETHIL¹⁹ en 1985 à partir des travaux de thèse réalisés par J.J. ROUX [Roux 1984]. CoDyBa est un outil de simulation dynamique, d'environnement monolithique qui permet d'estimer le flux thermique d'un bâtiment. Le logiciel prédit, à partir d'une température de consigne, la puissance de chauffage ou de refroidissement, ou calcule la température lorsque ces systèmes sont insuffisants. Le logiciel permet aussi de calculer les évolutions d'humidité dans le volume d'air. CoDyBa se présente comme un logiciel modulaire, dans lequel l'uti-

16. 50 familles de composants font partie de la bibliothèque fournie avec le logiciel

17. Le logiciel intègre aussi un module de calcul réglementaire

18. Le logiciel ne calcule pas la température dans l'air, mais la température résultante, avec une pondération de la température de l'air et de la température des parois

19. Centre de Thermique de Lyon <http://cethyl.insa-lyon.fr/>

lisateur saisit les entrées de géométrie du bâtiment à partir des éléments de base (volume d'air, murs, fenêtres), indique la localisation avec les données météorologique (plusieurs sites en France sont fournis avec le logiciel), ainsi que les charges internes et le type de régulation. Concernant le modèle physique, le logiciel représente le volume d'air par une température d'air, une température radiante et une humidité spécifique. Le mur est simulé par le modèle de paroi simplifié 1R2C²⁰. Cet outil a montré, à travers le benchmark BESTEST²¹, une fiabilité par rapport aux autres logiciels du marché. Cependant, malgré la puissance dans le calcul thermique multizone, le logiciel possède un modèle très simplifié des équipements [Noël *et al.* 2005], [Noël & Roux 2007], [Spitz 2012].

2.3.3 Outil adopté pour les simulations : Energyplus (EP)

2.3.3.1 Description du logiciel

EnergyPlus (EP) est l'outil de simulation adopté pour réaliser les simulations des cas d'étude dans ce manuscrit. EP²² est un logiciel à code source ouvert²³ créé en 1996 par le DOE²⁴. Cet outil de simulation a été développé à partir des caractéristiques améliorées des outils de simulation déjà existants à l'époque : DOE-2 et BLAST²⁵ (développés entre les années 70 et 80). L'idée de créer un nouveau logiciel est née d'un besoin d'optimiser le processus de simulation des performances du bâtiment et des équipements associés. Le résultat est un logiciel de simulation thermique dynamique des bâtiments, avec un code modulé et structuré sur Fortran 90. La structure modulaire d'EP facilite ainsi l'addition des fonctionnalités et des liens vers d'autres programmes et offre de nouveaux outils pour une utilisation plus élargie et en développement continu [Crawley *et al.* 2001].

EP simule le comportement thermique d'un bâtiment et le confort thermique, modélise l'éclairage et la ventilation, et dimensionne les systèmes de chauffage et de climatisation, en tenant compte des conditions environnementales, des conditions opérationnelles, des sources internes, du rayonnement solaire et des propriétés du matériau, entre autres. La structure modulaire du logiciel permet aux utilisateurs de contrôler les entrées et programmer les sorties à des pas de temps souhaités (au-dessous du pas de temps horaire). Le cœur du logiciel est construit sur le principe fondamental du bilan thermique dans lequel un gestionnaire de solution intégrée rassemble un gestionnaire de bilan de chaleur surfacique, un gestionnaire de bilan de chaleur dans l'air et un gestionnaire de simulation des systèmes, tous les trois résolus de manière simultanée (Figure 2.1) [EnergyPlus 2013], [Spitz 2012].

20. Modèle par conduction dans la paroi qui signifie 1 résistance, 2 capacités

21. Building Energy Simulation TEST

22. Dans le cadre de cette thèse CIFRE ce logiciel est utilisé par Manaslu Ing., financeur du projet

23. Open source code

24. United States Department of Energy ; Département de l'énergie des États Unis

25. Building Loads Analysis and System Thermodynamics ; Analyse des charges du bâtiment et systèmes thermodynamiques

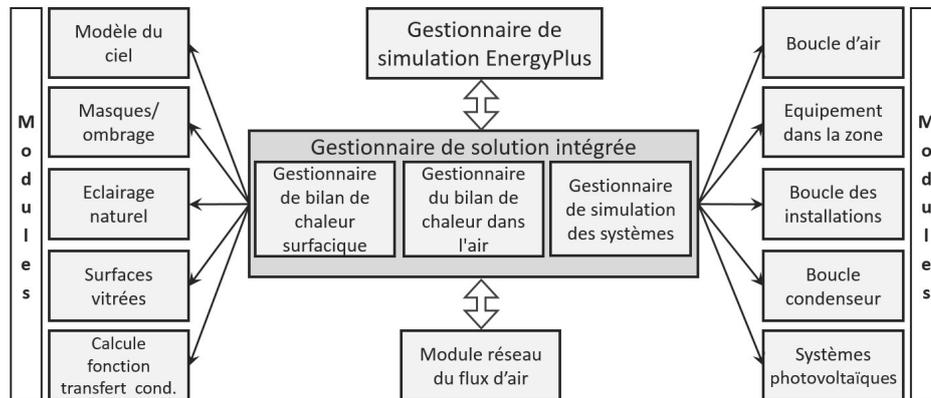


FIGURE 2.1 – Composition interne du logiciel EnergyPlus (Adapté de [Abelé *et al.* 2009], [EnergyPlus 2013])

Les principales fonctionnalités intégrées dans le logiciel sont [EnergyPlus 2013], [Crawley *et al.* 2001] :

- Structure modulaire qui permet de développer des modules parallèles sans intervenir avec le fonctionnement du logiciel et avec une connaissance minimale de sa structure globale (Figure 2.1)
- Contrôle réaliste des systèmes.
- Pas de temps défini par l'utilisateur (inférieur à l'heure)
- Code ASCII pour le fichier météorologique, les fichiers d'entrées et des sorties
- Modèles de transfert de chaleur et de masse combinés.
- Intégration de modèles de confort thermique.
- Flux d'air entre les différentes zones.
- Calcul avancé de transferts par rayonnement à travers les surfaces vitrées
- Simulation de l'éclairage, du confort thermique et du flux thermique.

Dans le domaine de la simulation du bâtiment, une large gamme de logiciels a été conçue pour prédire les évolutions de température et des consommations d'énergie. Cependant, le modèle développé en EP a été conçu pour simuler les évolutions d'humidité relative dans le volume d'air tenant compte des échanges de masse entre celui-ci et les murs. Pour cela, le modèle a intégré deux approches : (i) la profondeur effective de la pénétration de l'humidité²⁶ qui est un modèle simplifié et (ii) le modèle couplé de transferts de chaleur et de masse²⁷ qui est un modèle intermédiaire. Dans le cadre de cette thèse seuls les transferts provenant des infiltrations, des échanges entre les zones et avec l'extérieur sont prises en considération à l'échelle du bâtiment. Cette hypothèse permet d'évaluer les transferts de chaleur et de masse à l'échelle de la paroi, en utilisant comme conditions aux limites à la surface intérieure les évolutions trouvées (de température et humidité relative) dans le volume d'air à l'aide des

26. EMPD Effective moisture penetration depth

27. HAMT combined heat and moisture transfer

simulations à l'échelle du bâtiment (réalisées sur EP).

2.3.3.2 Les transferts thermiques dans le volume d'air

Concernant les simulations dans le volume d'air, le modèle utilisé par EnergyPlus est basé sur les équations du bilan thermique. Une des hypothèse fondamentales de ce modèle est que, contrairement aux modèles CFD²⁸, l'air dans chaque zone est prise comme étant homogène avec une température uniforme. Concernant le bilan de chaleur surfacique, les hypothèses générales sont : une température de surface uniforme, rayonnement grande et courte longueur d'onde uniforme, rayonnement diffus des surfaces et transferts de chaleur par conduction unidirectionnelle [Crawley *et al.* 2001].

Les bilans de chaleur et d'humidité dans la zone sont formulés et résolus à travers des équations différentielles ordinaires qui utilisent une approche prédicteur-correcteur intégrant l'air de la zone et l'air provenant des systèmes. Cette approche consiste à résoudre les équations de bilan en deux étapes : l'une des étapes pour prédire et l'autre pour corriger. Dans l'étape de prédiction le modèle estime (prédit) la valeur de la variable des pas de temps suivant à partir du pas de temps courant. L'étape de correction consiste à mettre à jour (corriger) la valeur prédite en utilisant un schéma correcteur et à répéter le processus jusqu'à ce que la convergence du modèle soit atteinte [EnergyPlus 2013].

L'équation (2.1) décrit le bilan de chaleur :

$$\begin{aligned} \rho_{air} c_p V_z \frac{dT_z}{dt} = & \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surf}} h_i A_i (T_{si} - T_z) \\ & + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} c_p (T_\infty - T_z) + \dot{m}_{sys} c_p (T_{sup} - T_z) \end{aligned} \quad (2.1)$$

où ρ_{air} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] est la masse volumique de l'air, c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] est la capacité calorifique, V_z [m^3] est le volume de la zone, T_z [K] est la température de l'air, \dot{Q}_i [W] sont les charges convectives internes, N_{sl} est le nombre de charges internes, h_i [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] est le coefficient convectif, A_i [m^2] est l'aire de i , T_{si} [K] est la température de la surface i , N_{surf} est le nombre de surfaces qu'entourent la zone, N_{zones} est le nombre de zones, \dot{m}_i et \dot{m}_{inf} [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$] sont les débits d'air entre les zones et les débits d'air par les infiltrations, T_{zi} [K] est la température de la zone i , T_∞ [K] est la température de l'air extérieur, \dot{m}_{sys} [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$] est le débit massique d'air provenant des systèmes et T_{sup} [K] est la température de l'air provenant des systèmes.

Le bilan de chaleur (équation (2.1)) est donc déterminé par la somme des charges convectives internes, la somme des transferts convectifs avec les surfaces, la somme des

28. Computational fluid dynamics ; mécanique des fluides numériques. Ce modèle a été cependant intégré dans le logiciel DesignBuilder (interface graphique d'EP) pour simuler les gradients de température, la vitesse et la direction de l'air dans une zone <http://www.designbuildermaroc.com/cfd.php>

transferts de l'air des autres zones, le transfert par infiltration et les sorties des systèmes. Le terme à gauche de l'équation représente le stockage.

Le bilan de masse est estimé à partir de l'expression (2.2) :

$$\begin{aligned} \rho_{air} V_z c_W \frac{dW_z}{dt} = & \sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{m_{sl}} + \sum_{i=1}^{N_{surf}} A_i h_{mi} \rho_{air} (W_{si} - W_z^t) \\ & + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_\infty - W_z^t) + \dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

où c_W [-] est le multiplicateur de la capacité d'humidité²⁹, W_z [kg·kg⁻¹] est le taux d'humidité de la zone, $k g_{m_{sl}}$ [kg·s⁻¹] est le planning des charges internes, h_{mi} [m·s⁻¹] est le coefficient de transfert convectif, $W_{surf_{si}}$ [kg·kg⁻¹] est le taux d'humidité dans la surface i , W_z^t [kg·kg⁻¹] est le taux d'humidité dans la zone à l'instant actuel, W_∞ [kg·kg⁻¹] est l'humidité de l'air provenant de l'extérieur et W_{sup} [kg·kg⁻¹] est l'humidité libérée par les systèmes.

Le bilan d'humidité (équation (2.2)) est donc calculé par la somme des charges latentes internes, la somme des flux par convection avec les surfaces, la somme des flux par mélange d'air avec les autres zones, le flux d'air par infiltrations et provenant des systèmes.

2.3.3.3 Les transferts thermiques à travers les surfaces vitrées

Le comportement thermique du bâtiment dépend de multiples facteurs, parmi lesquels le flux solaire qui est l'un des plus influents. Comme il a été mentionné dans la description du logiciel, EP intègre un gestionnaire de bilan de chaleur surfacique dans lequel le flux par rayonnement (grande longueur d'onde (GLO) et courte longueur d'onde (CLO)), les flux convectif et par conduction sont simulés. Dans l'équation (2.1), la température des surfaces T_{si} est le terme qui prend en compte ces flux. Le rayonnement solaire, donc les apports solaires, pénétrant dans la zone à travers les fenêtres extérieures est traité dans le logiciel en fonction des propriétés optiques, à savoir, la transmittance, la réflectance et l'adsorption solaire des surface vitrées (figure 2.2). En ce qui concerne la méthode de simulation du rayonnement entrant par la fenêtre, deux approches sont intégrées dans le logiciel : (i) le logiciel prend en considération les propriétés optiques de chacune des couches (approche couche par couche) et (ii) le logiciel utilise ces propriétés pour simuler la fenêtre comme étant un seul élément représenté par U-value et un coefficient de gains solaires (propriétés thermiques de la fenêtre)³⁰.

Le calcul du bilan de chaleur tient donc compte du flux absorbé par la fenêtre (et ses composants) et du flux transmis par les vitres aux surfaces intérieures. Dans la part du

29. C_W est un outil mis dans l'équation de bilan de masse dans l'air, afin de tenir compte de la capacité de stockage (de humidité) de l'air. Par exemple une C_W égale à 1, indique que la capacité est celle de l'air humide dans le volume de la zone spécifique. Pour plus d'information [EnergyPlus 2013]

30. SHGC : Solar heat gain coefficient

rayonnement solaire (de courte longueur d'onde) atteignant une surface intérieure, une partie est absorbée en fonction de la valeur d'absorbance du matériau et une autre partie est réfléchi. Le rayonnement réfléchi par cette surface est alors additionné au rayonnement diffus et transmis à toutes les surfaces intérieures de manière uniforme. Le bilan de chaleur des surfaces intérieures comprend quatre termes : (i) la conductivité à travers les composants, (ii) la convection avec l'air, (iii) le rayonnement de courte longueur d'onde absorbé et réfléchi et (iv) le rayonnement de grande longueur d'onde échangé entre les différentes surfaces [EnergyPlus 2013].

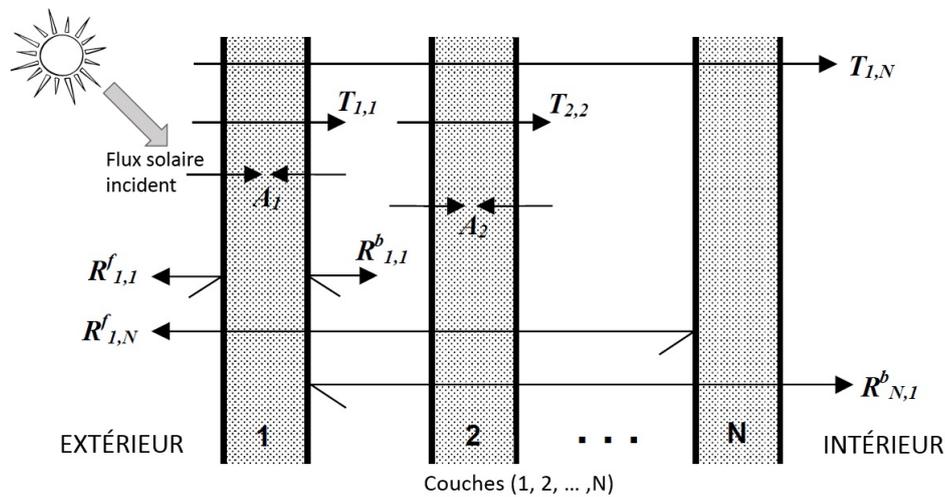


FIGURE 2.2 – Représentation de la transmission ($T_{i,j}$ transmittance à travers les couches), réflexion ($R_{i,j}^f$ et $R_{i,j}^b$ réflectance en avant et en arrière) et adsorption (A_j) du rayonnement solaire d'une surface vitrée composée de plusieurs couches (Adapté de [EnergyPlus 2013])

EnergyPlus ne possède cependant pas une interface graphique propre. D'autres outils de simulation se sont développés ayant comme moteur de calcul EP, parmi lesquels DesignBuilder (la version utilisée dans le cadre de cette thèse est 4.0). Cet outil de simulation possède une interface graphique 3D conviviale qui permet aussi la gestion des données d'entrée du modèle, tels que la composition des parois, les propriétés des matériaux, le type d'occupation, le planning d'activités, les apports internes, etc. DesignBuilder (DB) génère un fichier des données d'entrées (IDF³¹) dans lequel les spécifications, la description et l'information du modèle et les données de sorties requises sont consignées.

31. Input data file

2.4 Fiabilité des outils de simulation

BESTEST³² développé par l'IEA³³ est une procédure qui permet d'évaluer, de diagnostiquer et d'identifier les sources de désagrément prédictif des logiciels de simulation énergétique des bâtiments pour des fins de validation [Judkoff & Neymark 1995]. La validation de ces outils se fait soit par comparaison entre eux, soit par des comparaisons avec des valeurs mesurées. Plusieurs logiciels exposés précédemment ont fait l'objet de validation à travers BESTEST. Des écarts sont constatés lors de la mise en place de la procédure avec différents logiciels, bien que des conditions similaires soient appliquées. Ces écarts sont principalement dus aux hypothèses concernant les entrées ou par l'effet de l'occupation [Maile *et al.* 2007].

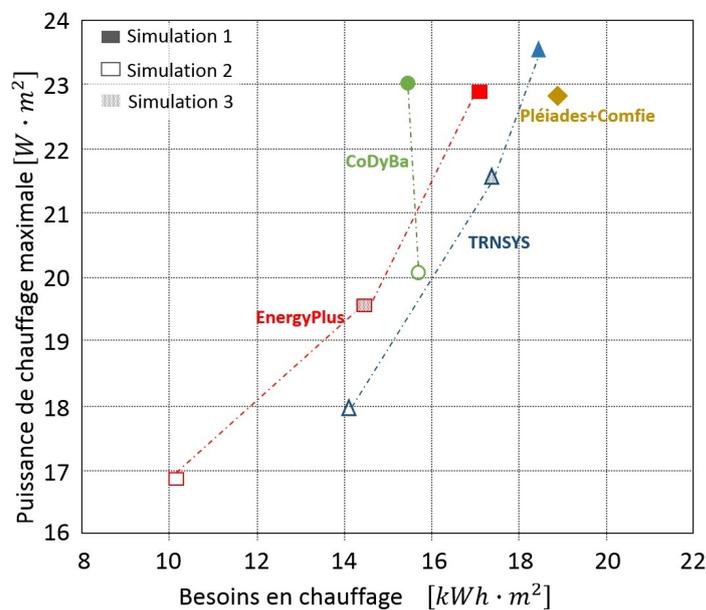


FIGURE 2.3 – Besoins en chauffage et puissance de chauffage maximale en fonction de différentes valeurs du coefficient convectif (Adapté de [Brun *et al.* 2009])

Dans le cadre d'une étude réalisée par [Brun *et al.* 2009], les logiciels EnergyPlus V.3.1., TRNSYS V.16., CoDyBa V.6.0. et Pléiades+Comfie V. 2.9., ont passé le test BESTEST (figure 2.3). Les résultats des différents outils ont été comparés entre eux sur l'évaluation des performances d'une maison basse consommation (BBC). Pour l'ensemble des outils, les entrées concernant le système de chauffage, la ventilation naturelle, la ventilation mécanique, les propriétés des surfaces opaques et vitrées, le type d'occupation et les charges internes cherchaient à respecter les mêmes valeurs. Trois cas d'étude étaient envisagés dans lesquels la valeur du coefficient d'échange convectif variait : *simulation 1*, valeur constante et égale à la valeur imposée par le logiciel Pléiades+Comfie (ceci pour chaque type de surface intérieure et extérieure : plancher bas, parois verticales,...) ; *simulation 2*, valeurs calculées avec EnergyPlus

32. Building Energy Simulation TEST

33. International Energy Agency ; Agence internationale de l'énergie

avec des algorithmes de convection détaillés qui ont donné la valeur moyennée pendant l'année ; *simulation 3* valeurs par défaut du logiciel (simulation lancée seulement sur EnergyPlus et TRNSYS)³⁴. L'objectif était d'évaluer l'effet du coefficient sur la consommation du bâtiment (maison BBC). L'auteur conclut son étude en soulignant la sensibilité des outils vis-à-vis de ce coefficient. Lorsque le coefficient est constant (simulation 1) les résultats de l'ensemble des logiciels sont similaires en termes de température et de puissance de chauffage, mais des variations importantes sont observées lorsque la valeur du coefficient change dans les simulations 2 et 3 (Figure 2.3).

2.5 Les outils de simulation et le calage des modèles

En 2010 une procédure visant la certification des méthodes de calage est apparue : le BESTEST-EX. Cette procédure a évolué vers une procédure permettant de tester la fiabilité et précision des outils pour évaluer les performances de maisons rénovées. BESTEST-EX permet de comparer les prédictions des logiciels par rapport aux outils de référence : EnergyPlus, SUNREL³⁵ et DOE2.1. BESTEST-EX permet de quantifier l'impact des incertitudes liées aux entrées du logiciel. Le principe de BESTEST-EX est de pouvoir comparer les résultats obtenus avec le logiciel en question aux résultats de référence fournis avec la procédure, ou bien le comparer à des mesures de rénovation qui ont été déjà évaluées [Judkoff *et al.* 2010b], [Judkoff *et al.* 2010a]. La figure 2.4 montre les résultats de la procédure pour différents types de rénovations envisagées dans une maison de référence. On observe que les résultats obtenus avec les trois logiciels restent dans des valeurs proches. Cependant on peut constater de légers écarts entre le logiciel EnergyPlus et DOE par rapport au logiciel SUNREL. Ceci possiblement dû au fait qu'EnergyPlus a été créé à partir de DOE-2.

Le calage³⁶ d'un modèle construit dans un environnement de simulation thermique dynamique du bâtiment est central pour l'analyse et l'évaluation des stratégies appliquées à la rénovation thermique des bâtiments. Le calage est un processus qui consiste à ajuster des paramètres associés à un modèle développé dans un code ou environnement de simulation afin que les résultats simulés et les données mesurées soient les plus concordantes [Trucano *et al.* 2006]. Le calage d'un modèle du bâtiment est un processus complexe, non discriminatoire où des solutions multiples associées à des degrés d'incertitude sont possibles, i.e., il est très complexe d'identifier une solution exacte. Dans le processus de calage des modèles, différentes approches sont acceptables, e.g. par le biais manuel, en suivant une méthodologie standard, par fixation des tolérances maximales, entre autres [Cipriano *et al.* 2015], [Pan *et al.* 2007], [Pedrini *et al.* 2002]. D'ailleurs l'application des méthodologies plus encadrées pour le calage des modèles en STD est récente grâce aux avancés

34. Les valeurs des coefficients convectifs sont données dans l'article [Brun *et al.* 2009]

35. Moteur de simulation qui permet d'estimer les consommations dans un bâtiment à des pas de temps horaires. Il a été créé par des scientifiques en collaboration avec le laboratoire national de l'énergie renouvelable (the National Renewable Energy Laboratory (NREL))

36. En anglais : calibration

dans le domaine de l'analyse d'incertitude³⁷ et l'analyse de sensibilité³⁸ [Cipriano *et al.* 2015].

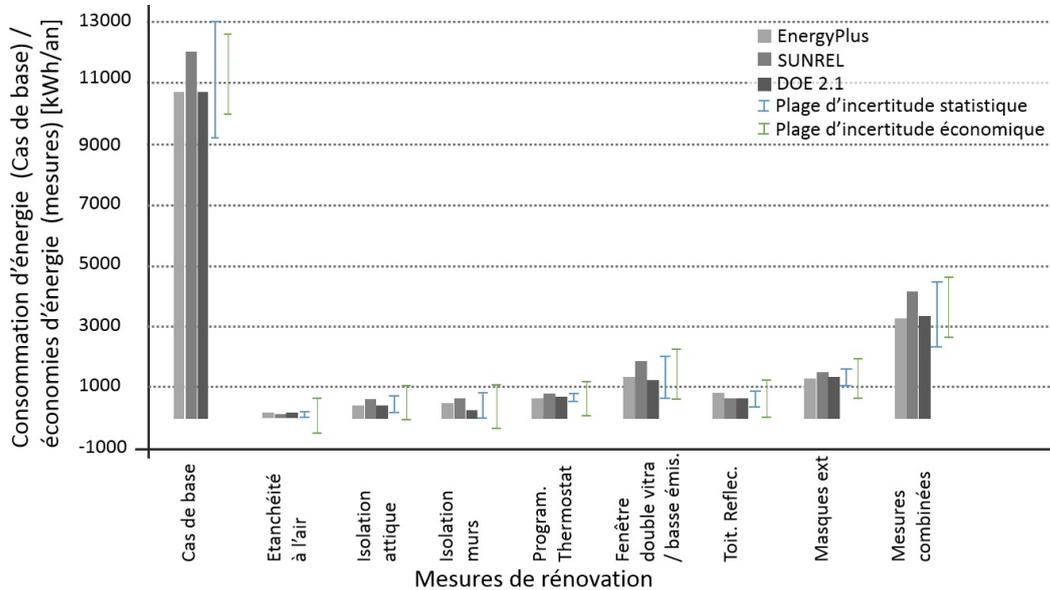


FIGURE 2.4 – Consommation et économies d'énergie en refroidissement (Adapté de [Judkoff *et al.* 2010a])

Dans ses travaux, [Cipriano *et al.* 2015] propose une méthodologie pour le calage d'un modèle d'un bâtiment inoccupé, dans des conditions flottantes (i.e. dans des conditions de consommation d'énergie non réelles), considérant un nombre réduit de paramètres à ajuster et en faisant l'hypothèse que l'incertitude des données mesurées est négligeable. Sa méthodologie consiste à appliquer de manière itérative les étapes suivantes : construire un modèle initial avec les paramètres connus et non connus ; estimer la valeur initiale des paramètres et attribuer une fonction de densité de probabilité pour définir le rang de variation des paramètres, appliquer une méthode qui permet de calculer de manière aléatoire des valeurs pour les paramètres inconnus (dans le rang assigné) ; simuler les combinaisons avec les valeurs calculées du pas de temps précédent ; appliquer une méthode d'analyse des résultats simulés qui permet de les comparer aux données mesurées ; calculer les paramètres qui ont le plus d'influence (paramètres forts) ; assigner de nouvelles valeurs aux paramètres en réduisant le rang de variation.

[Heo *et al.* 2012] ont appliqué une méthodologie de calage des modèles afin d'évaluer les performances d'un bâtiment rénové et de prédire les consommations annuelles d'énergie en utilisant le logiciel EnergyPlus et un modèle normatif³⁹. Les auteurs soulignent les limites des outils de simulation pour l'analyse des performances de bâtiments dans le cadre de la

37. Uncertainty Analysis (UA)

38. Sensitivity Analysis (SA)

39. Définie en CEN-ISO standards

rénovation et affirme que ce processus vient ajouter des incertitudes supplémentaires dues aux interventions de rénovation et à la méconnaissance des propriétés et des conditions des matériaux dans leur état actuel.

Certains auteurs ont adopté le calage du modèle afin de prédire le comportement de nouvelles constructions pendant une période de temps donnée (variant entre une semaine et un mois), principalement en termes de besoins d'énergie et d'évolutions de température [Mustafaraj *et al.* 2014], [Harmer & Henze 2015], [Royapoor & Roskilly 2015], [Dudley 2010]. Dans la littérature peu d'information a été trouvée concernant le calage de modèle en termes d'humidité relative et température (simultanément). Par exemple [Mustafaraj *et al.* 2014] a effectué le calage du modèle d'un bâtiment tertiaire localisé à Cork en Irlande en termes de consommation d'énergie (système de chauffage et électricité) et de température (par zone) pour deux scénarios : le premier concerne des simulations réalisées avec des conditions attendues au départ ; le deuxième utilise des données enregistrées, i.e. avec des conditions réelles, par exemple la performance des équipements. La figure 2.5 illustre les résultats simulés obtenus avec les deux scénarios comparés à des données mesurées pour une zone située en façade nord pendant le mois de janvier durant deux semaines. On constate que, dans les deux scénarios simulés, la température tend à être sous estimée. Cependant le scénario construit à partir de données enregistrées est plus proche des valeurs mesurées.

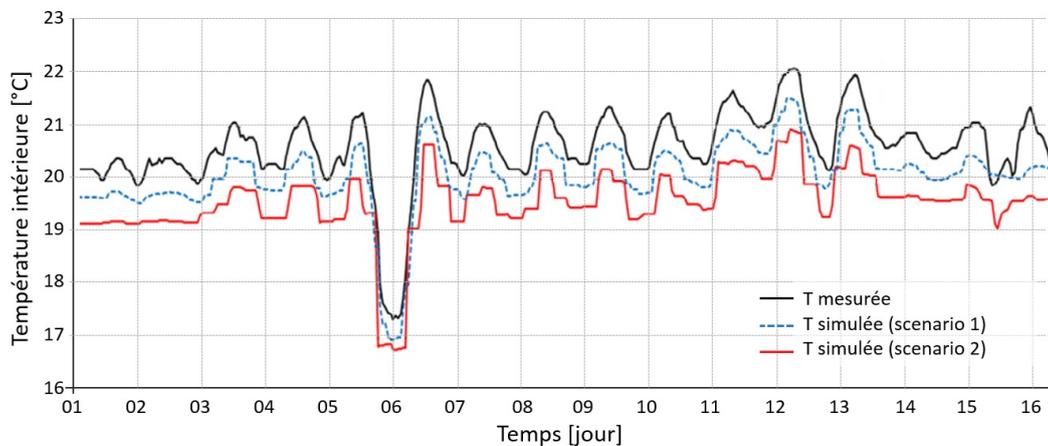


FIGURE 2.5 – Calage d'un modèle de bâtiment. Température simulée et mesurée dans une zone sur la façade nord pendant le mois de janvier (adapté de [Mustafaraj *et al.* 2014])

Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans les matériaux poreux

Les transferts de chaleur et de masse en milieu poreux sont des phénomènes qui intéressent de nombreux domaines et applications, par exemple, dans l'extraction de pétrole, le séchage de bois et des matériaux granulats, l'étude des sols, l'absorption des polluants, entre autres. Dans le domaine du bâtiment, ces phénomènes sont d'une grande importance dans l'évaluation des performances thermiques, du confort thermique, de l'analyse des consommations d'énergie et de la pérennité du bâtiment. Un des premiers modèles qui a été développé pour étudier les transferts de masses en milieu poreux, en considérant l'influence du gradient de température, est celui de [Philip & De Vries 1957]. Ce modèle macroscopique, qui permet de relier les forces thermodynamiques à des coefficients de transport, a servi de référence pour des modèles développés plus tard [Kiefl 1983], [Künzel & Kiefl 1996] [Mendes *et al.* 2002], [Mendes & Philippi 2005].

Dans le modèle proposé par [Philip & De Vries 1957] les forces motrices sont les gradients de température et la variation de la teneur en humidité. Dans le cas des parois multicouches, la variation de la teneur en humidité présente cependant un inconvénient : ce terme génère une discontinuité entre les différents matériaux qui composent la paroi. La teneur en humidité est fortement liée aux propriétés hygroscopiques des matériaux, i.e. un matériau soumis aux mêmes conditions d'humidité relative et de température, avec une hygroscopicité plus élevée a la capacité de retenir plus d'humidité qu'un matériau avec une hygroscopicité basse. Des recherches réalisées sur l'étude des transferts de masse (humidité) proposent la pression capillaire, la pression de vapeur ou le gradient d'humidité relative comme forces motrices à la place de la teneur en humidité [Pedersen 1992], [Künzel 1995].

3.1 Transfert de chaleur et de masse dans le domaine du bâtiment

Dans le domaine du bâtiment, les différents phénomènes qui agissent dans les parois et les meubles sont classés en trois familles : transferts de chaleur, transferts d'humidité sous forme liquide et sous forme de vapeur. Dans le tableau 3.1 on trouve les mécanismes de transfert et leur force motrice.

Tableau 3.1 – Mécanismes de transport de chaleur et d’humidité [Künzel 1995]

TRANSFERT	MÉCANISME	FORCE MOTRICE
<i>Transfert de chaleur</i>	Conduction	Différence de température (de part et d’autre d’un solide)
	Rayonnement	Différence de température (entre deux surfaces)
	Convection	Pression totale, différence de masse volumique
	Flux enthalpique	Diffusion de vapeur avec changement d’état et transport liquide avec champ de température
<i>Transfert d’eau sous forme de vapeur</i>	Diffusion de gaz	Pression de vapeur
	Transport moléculaire	Pression de vapeur
	Diffusion en solution	Pression de vapeur
	Convection	Gradient de pression totale
<i>Transport d’eau sous forme liquide</i>	Transport capillaire	Succion capillaire
	Diffusion de surface	Humidité relative
	Drainage	Gravité
	Flux hydraulique	Pression différentielle totale
	Électrocinétique	Champs électrique
	Osmose	Concentration d’ions

Dans la modélisation des transferts appliquée au bâtiment, certains phénomènes sont négligés ou pris en compte de manière simplifiée. Parmi les quatre mécanismes de transfert de chaleur listés dans le tableau 3.1, le transfert par conduction reste l’un des phénomènes le plus important. Ce phénomène est lié à la conductivité thermique d’un matériau, laquelle permet de caractériser son comportement vis-à-vis du transfert du flux de chaleur. C’est une des propriétés qui permet d’évaluer les performances thermiques de l’enveloppe. Le calcul du flux de chaleur transmis par conduction à travers la paroi est donc réalisé avec la valeur du coefficient de conductivité thermique λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] et de l’épaisseur e [m] de chaque couche qui la compose. Dans le cas d’un bâtiment ancien, l’estimation avec précision du coefficient λ reste cependant difficile à réaliser, particulièrement lorsque la paroi est composite. Ils existent des sources écrites et des valeurs relevées *in situ* (issues des recherches dans le bâtiment ancien en France) qui peuvent être utilisées en référence dans les modèles de simulation du bâtiment [Cantin & Guarracino 2012], [MEDDE 2013], [Stéphane *et al.* 2014]. Il faut néanmoins préciser que l’adoption des ces valeurs reste une source d’incertitude.

Le flux enthalpique avec changement de phase de la vapeur d’eau est liée à l’enthalpie de changement d’état massique h_v [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] de l’eau contenue dans le matériau. Ce flux est considéré dans la modélisation des transferts en lien avec la diffusion de la vapeur. Les transferts de chaleur par convection et par rayonnement sont considérés comme des

phénomènes de surface (échanges de chaleur entre la paroi et le volume d'air) [Künzel 1995].

Concernant le transfert de masse sous forme liquide, les phénomènes liés au drainage, flux hydraulique, électrocinétique et osmose sont tous négligés, car ce sont des phénomènes rares ou analysés dans des cas particuliers dans le domaine du bâtiment. A contrario, l'analyse des mécanismes de transferts d'humidité sous forme de vapeur est essentielle pour comprendre le comportement des matériaux de construction poreux, spécialement pour le couplage avec le transfert de chaleur [Künzel 1995].

3.1.1 Stockage et transfert de chaleur

Dans le cadre de ce manuscrit, le transfert de chaleur est abordé en considérant l'effet de l'humidité contenue ou traversant le matériau. Les matériaux poreux sont constitués d'une matrice solide et de pores. Ces pores sont remplis soit avec de l'air humide, soit avec de l'eau liquide (l'état dans lequel se trouve l'humidité est cependant difficile à déterminer). Dans le calcul du bilan de chaleur le terme de variation d'enthalpie apparaît pour représenter le terme de stockage. Dans ce type de matériaux, l'enthalpie peut être calculée par l'addition des enthalpies du matériau sec et l'enthalpie de l'eau emmagasinée dans les pores [Künzel 1995]. Concernant le transfert de chaleur par conduction, la valeur de la conductivité thermique du matériau est affectée par la présence d'humidité dans ses pores. Dans la dernière partie de ce manuscrit est exposée l'expression qui met en relation la teneur en humidité du matériau avec la conductivité thermique.

3.1.2 Le stockage et le transferts de masse

Dans le domaine du bâtiment, les phénomènes de transferts de masse, particulièrement les fluctuations d'humidité sous forme de vapeur, sont fortement influencés par la structure du matériau [Tariku *et al.* 2010]. Dans les bâtiments anciens ceux-ci sont des matériaux poreux et donc très hygroscopiques, i. e., ils ont la capacité de stocker de l'humidité dans des quantités non négligeables.

3.1.2.1 Stockage d'humidité

Les mécanismes de transport de l'humidité à travers les murs constitués de matériaux poreux sont complexes. Les matériaux hygroscopiques ont la capacité d'absorber de l'eau sous forme de vapeur jusqu'à établir l'équilibre avec l'air ambiant. La teneur en humidité du matériau permet d'évaluer la capacité du matériau à stocker de l'eau en son sein. Cette capacité de stockage est représentée par les isothermes de sorption (figure 3.1). Dans le domaine du bâtiment, l'effet de la température sur les phénomènes d'absorption/desorption est négligé [Künzel 1995], raison pour laquelle les courbes de teneur en humidité du matériau

en fonction de l'humidité relative sont calculées à température constante [Gnip *et al.* 2006].

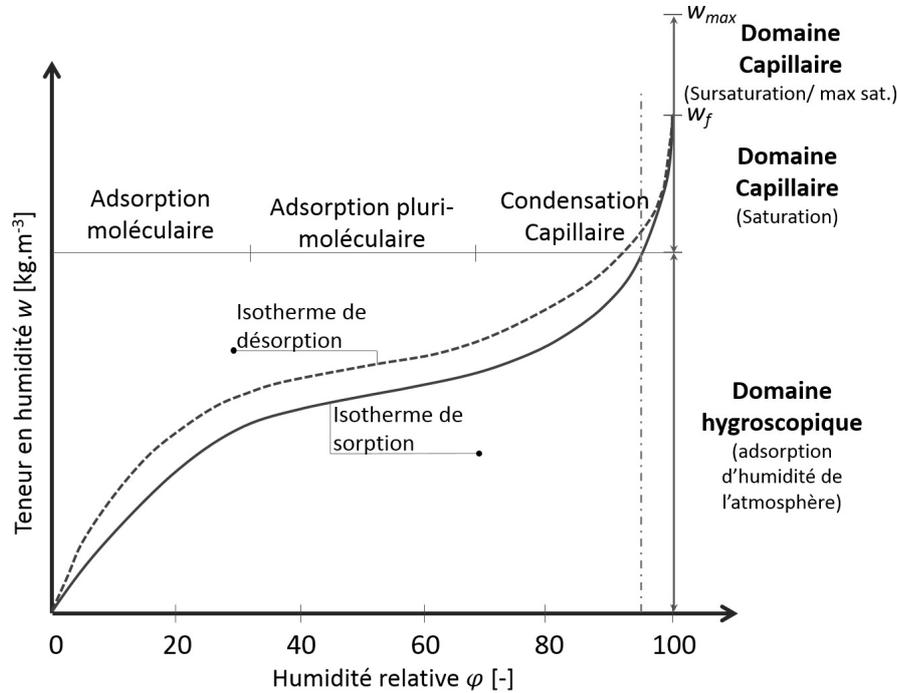


FIGURE 3.1 – Isotherme de sorption et désorption : comportement hygroscopique d'un matériau poreux en fonction de l'humidité relative (Adaptée de [Abelé *et al.* 2009], [Guimarães *et al.* 2012])

Les isothermes de sorption de matériaux de construction hygroscopiques¹ et active-capillaire² sont divisées en trois régions (figure 3.1) : une *première région*, dans le domaine hygroscopique ($0 < \varphi < 95\%$)³ où un matériau, en état initial sec, se charge en humidité par absorption. Dans cette région on trouve des phénomènes de diffusion de la vapeur d'eau mais aussi de la condensation capillaire. Cette région est caractérisée par les forces de Van der Waals, lesquelles font que les molécules d'eau constituent une monocouche en état rigide jusqu'à couvrir la surface des pores. Une *deuxième région*, dans le domaine capillaire ($95\% < \varphi < 100\%$), où l'absorption continue, jusqu'à la saturation libre de l'eau (w_f). Une *troisième région*, dans le domaine capillaire de super-saturation, qui n'est atteinte que par des conditions d'application de pression en laboratoire ou par des mécanismes de diffusion par gradient thermique. Donc cette région n'est pas atteinte dans des conditions normales de succion. Des conditions de condensation sont atteintes dès la région capillaire sans que le matériau soit complètement saturé.

1. L'hygroscopicité d'un matériau fait référence à la capacité de celui-ci à absorber de l'humidité contenue dans l'air environnant, dans ce cas il s'agit de l'eau sous forme de vapeur

2. La capillarité fait référence à la manière dont l'eau sous forme liquide s'introduit dans les pores du matériau

3. φ est l'humidité relative

Concernant les matériaux peu ou non-hygroscopiques, e.g. certains isolants, il est possible de trouver de l'eau sous forme liquide (troisième région), lorsque les conditions de point de rosée sont atteintes ($\varphi = 100\%$), i.e., les valeurs de teneur en humidité w dans les régions 1 et 2 sont très proches de zero, voire zero, et dans la région 3, la teneur en humidité w de ce type de matériaux atteint sa valeur maximale [Künzel 1995], [Jannot 2008], [Abelé *et al.* 2009].

3.1.2.2 Diffusion de la vapeur d'eau

La diffusion de la vapeur d'eau en milieu poreux est régie par la taille de pores. Sous l'effet d'un gradient de pression partielle, dans ce cas la pression de vapeur (la pression totale étant constante), le mouvement des molécules d'eau se produit à travers deux mécanismes (i) la diffusion moléculaire ou diffusion de Fick et (ii) l'effusion ou diffusion de Knüdsen. Lorsque la taille des pores est suffisamment grande⁴ (diamètre $>10^{-6}$ m) pour que la collision entre les molécules soit plus importante que la collision entre les molécules et les parois des pores, on parle de diffusion moléculaire; dans le cas où le mouvement des molécules est dominé par la collision entre celles-ci et les parois des pores, on parle d'effusion qui se produit dans des pores avec un rayon⁵ $<5 \cdot 10^{-9}$ m. Pour les pores de taille intermédiaire, la diffusion de Fick et l'effusion se produisent simultanément [Künzel 1995], [Abelé *et al.* 2009]. Dans le domaine du bâtiment, les mécanismes de transferts ici introduits, sont pris en compte à travers un coefficient qui caractérise la perméabilité ou résistance à la vapeur d'eau de chaque matériau. L'évaluation de la diffusion de la vapeur dans le matériau à travers les coefficients de diffusion n'est valable que pour des conditions de pression de vapeur 10% égale ou inférieure à la pression totale. Elle est d'ailleurs indépendante de la température du matériau [Künzel 1995]. Le transfert de vapeur au sein du matériau est exposé dans la section 3.3.

3.1.2.3 Transfert de l'eau liquide

Le transfert d'eau sous forme liquide dans les pores des matériaux est régi par la loi de Darcy qui décrit l'écoulement laminaire d'un fluide sous l'effet d'une différence de pression de succion capillaire. Le transport d'eau sous forme liquide est exposé dans la section 3.3 du présent chapitre.

3.2 État de l'art des méthodes d'évaluation de transferts de chaleur et de masse à l'échelle de la paroi

En régime stationnaire, une des premières méthodes qui a été développée est la méthode Glaser. Cette méthode suppose que la diffusion de la vapeur obéit à la loi de Fick et que le transfert de chaleur est défini par la loi de Fourier. Cette méthode permet de prédire les

4. Si la taille du pore est supérieure au libre parcours moyen qui caractérise la distance moyenne parcourue par une particule avant collision

5. Rayon inférieur au libre parcours moyen

risques de condensation d'eau dans la paroi. Le principe indique que si la pression de vapeur partielle, calculée en fonction de la température humide, est égale ou dépasse la valeur de la pression de vapeur saturante, il existe alors un risque de condensation [Tadeu *et al.* 2003]. Cette méthode ne tient pas compte, cependant, de l'état initial de la paroi, de la capacité de stockage du matériau, aspects nécessaires pour l'évaluation des performances des bâtiments constitués de matériaux poreux. En milieu poreux d'autres méthodes en régime dynamique se sont développées, ces méthodes permettent de tenir compte des propriétés des matériaux vis-à-vis de l'humidité.

Afin d'évaluer l'effet des couches isolantes installées dans l'enveloppe des bâtiments anciens rénovés, la modélisation dynamique des transferts de chaleur et de masse en milieu poreux devient fondamentale. Ces modèles sont connus comme modèles couplés de transferts de chaleur et de masse (humidité)⁶. Dans le domaine du bâtiment, les transferts de chaleur et de masse sont décrits par le biais de modèles macroscopiques et par les lois de conservation de la masse et de chaleur comme il a été énoncé dans le présent chapitre (3). Certains auteurs ont développé des méthodes qui permettent de résoudre le système d'équations du modèle basé sur les travaux de [Philip & De Vries 1957].

[Mendes *et al.* 2002] propose une approche afin de résoudre les équations d'un modèle de transfert de chaleur et de masse fortement couplés en milieu poreux. Son étude est plus centrée sur la méthode de résolution numérique que sur le modèle des transferts en lui-même. Il compare sa méthode à une méthode dite traditionnelle. Dans cette dernière, les équations de conservation sont couplées et résolues de manière itérative, en utilisant les résultats de la température et de la teneur en humidité de l'itération précédente pour calculer le terme source. Dans ce type d'approche, la stabilité du modèle est assurée par la maîtrise du pas de temps. La méthode proposée par [Mendes *et al.* 2002] est conçue pour préserver la stabilité numérique à l'aide de deux conditions : premièrement, les échanges de vapeur entre la surface du mur et le volume d'air sont une fonction linéaire de la température et de la teneur en humidité, deuxièmement, la méthode introduit un nouvel algorithme générique qui permet de sauvegarder simultanément les équations gouvernant les phénomènes de transfert de chaleur et de masse.

Dans le modèle de base développé par [Philip & De Vries 1957], la force motrice pour les transferts de masse est la teneur en humidité du matériau, laquelle génère une discontinuité aux interfaces dans le cas d'une paroi composée des différentes couches (figure 3.2). D'autre part, les hypothèses formulées dans le modèle de [Philip & De Vries 1957] sont : dissociation des flux sous forme liquide et sous forme de vapeur (cela permet de les additionner) ; le flux sous forme liquide est régi par la loi de Darcy et seul le transport capillaire est pris en compte dans le transfert d'eau sous forme liquide ; le transfert de vapeur par effusion (Knudsen transport) est négligé, i.e. seule la diffusion moléculaire est prise en compte et la vapeur d'eau suit le comportement d'un gaz parfait [Mchirgui 2012].

6. Simultaneous heat and mass transfer

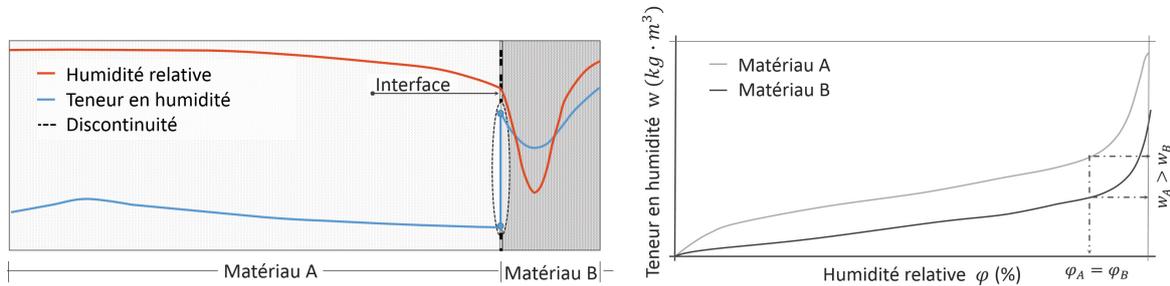


FIGURE 3.2 – À gauche : profil d’humidité relative et teneur en humidité dans une paroi bicouche. À droite : isothermes de sorption de deux matériaux (adapté de [Tariku *et al.* 2010])

Dans les modèles développés par [Pedersen 1992], [Künzel 1995], la pression de succion capillaire et le gradient d’humidité relative sont les forces motrices dans les phénomènes de transfert de masse. Ces deux grandeurs tiennent compte de la discontinuité dans le cas des parois multicouches, contrairement au modèle de base, i. e. le modèle développé par [Philip & De Vries 1957]. [Mendes & Philippi 2005] ont réalisé des études de transferts de chaleur et de masse dans les parois multicouches. Dans l’étude, les auteurs conservent la formulation de base avec la teneur en humidité (en % du volume) comme force motrice dans les transferts de masse. Deux cas sont évalués : un avec la prise en compte de la discontinuité et un autre qui néglige la discontinuité. Ils adoptent l’approche MTDMA⁷ afin de garantir une stabilité dans le modèle au moment de la résolution. Les principales hypothèses du modèle sont : résistance de contact (interface entre deux couches) négligée, linéarisation du rapport pression de saturation (P_{sat}) et température (T) en fonction de la température ($P_{sat}/T = f(T)$) et même concentration de vapeur à l’interface entre les deux matériaux. Deux types de conditions aux limites sont utilisées : (i) température et humidité relative constantes ($T, \varphi = cte$) et (ii) application d’une fonction sinusoïdale pour représenter la température et l’humidité relative. Les auteurs concluent que dans le cas de la négligence de la discontinuité, le modèle tend à surestimer les évolutions de teneur en humidité du matériau et que la prise en compte ou pas de la discontinuité a peu d’effet sur le profil de température.

3.3 Modèle de transferts de chaleur et de masse dans une paroi multicouche

Le modèle hygrothermique à l’échelle de la paroi adopté dans le cadre de cette thèse est basé sur celui développé par [Künzel 1995]. Ce modèle largement utilisé dans le domaine du bâtiment, permet de modéliser des parois multicouches, tenant compte de transferts d’humidité sous forme liquide et de vapeur. Ce modèle, basé sur le bilan de chaleur (équation

7. Multi TriDiagonal-Matrix Algorithm ; Algorithme pour des matrices tridiagonales

(3.1)) et de masse (équation (3.4)), décrit les transferts de chaleur et de masse à travers des équations aux dérivées partielles, où la variation de la température et de la teneur en humidité représentent les forces motrices, cette dernière assure la continuité dans les différentes couches.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla \cdot q + S_h \quad (3.1)$$

H [$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$] est l'enthalpie totale (enthalpie du matériau sec plus l'enthalpie de l'eau contenue dans les pores du matériau), q [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] représente la densité de flux de chaleur qui dérive de la loi de Fourier et de l'équation de chaleur (équation (3.2)) [Lienhard 2013], S_h [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$] est le terme source ou puits de chaleur (équation (3.3)). La densité de flux représentée par :

$$q = -\lambda \nabla T \quad (3.2)$$

La diffusion de la vapeur se produisant de manière simultanée avec le changement de phase dans les pores des matériaux, l'enthalpie d'évaporation peut, alors, être prise comme terme source (S_h), ce terme est alors calculé par (3.3) :

$$S_h = -h_v \nabla g_v \quad (3.3)$$

où h_v [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] est la chaleur latente de changement d'état et g_v [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] est la densité de flux de la diffusion de la vapeur.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla (g_w + g_v) + S_w \quad (3.4)$$

où w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] est la teneur en humidité du matériau, g_w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] est la densité de flux sous forme liquide et S_w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$] est le terme source ou puits. Au sein de la paroi, sauf cas d'infiltration, ce dernier terme peut être négligé.

Dans l'équation (3.4) la densité de flux de vapeur g_v est déterminée par la loi de Fick qui décrit la diffusion de la vapeur par différence de masse. Cette loi peut être simplifiée par l'introduction d'un coefficient de diffusion de vapeur propre au matériau ou par la perméabilité de vapeur du matériau notée δ_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$]. Ce dernier terme est calculé à partir de l'équation (1.5) :

$$g_v = -\frac{\delta_a}{\mu} \nabla p_v = -\delta_p \nabla p_v \quad (3.5)$$

Concernant la densité de flux sous forme liquide g_w , celle-ci est calculée à partir de la loi de Darcy qui est donnée par l'expression (3.6) :

$$g_w = K_1 \nabla P_k \quad (3.6)$$

où K_1 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] est le coefficient de perméabilité de l'eau liquide, P_k [Pa] est la pression de succion capillaire, laquelle peut être remplacée en appliquant la relation de Kelvin (3.7) :

$$\varphi = \exp\left(-\frac{P_k}{\rho_w R_D T}\right) \quad (3.7)$$

où φ [-] est l'humidité relative, ρ_w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] est la densité de l'eau (prise comme constante), R_D [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] est la constante du gaz parfait, T [K] est la température. On peut remplacer P_k dans l'équation (3.6), on obtient alors la densité de flux liquide sous la forme (3.8) :

$$g_w = -K_2 \frac{T}{\varphi} \nabla \varphi - K_2 \ln \varphi \nabla T \quad (3.8)$$

où K_2 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] est le coefficient de conduction capillaire et le produit de $K_1 \cdot \rho_w \cdot R_D$. Le deuxième terme à la droite de l'équation (3.8) est le transport capillaire lié au gradient de température, lequel est petit en comparaison avec le premier terme. De plus, quand φ s'approche à 1, le produit tend vers zéro. On peut alors négliger sa valeur. L'équation (3.8) pour calculer le flux liquide peut alors s'écrire (équation (3.9)) :

$$g_w = -D_\varphi \nabla \varphi \quad (3.9)$$

où D_φ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$] est finalement le coefficient de conduction de liquide. Ce terme peut être calculé à partir du coefficient de transport du liquide D_w [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] :

$$D_\varphi = D_w \frac{dw}{d\varphi}$$

En développant l'équation (3.1), l'équation de transfert de chaleur devient (équation (3.10)) :

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + h_v \nabla (\delta_p \nabla p_v) \quad (3.10)$$

En développant l'équation (3.4), l'équation de transfert de masse peut être écrite à travers l'expression (3.11) :

$$\frac{dw}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla (D_\varphi \nabla \varphi) + \nabla (\delta_p \nabla p_v) \quad (3.11)$$

3.4 Analyse des données modélisées

3.4.1 Description

Dans la partie III seront évalués les transferts de chaleur et de masse pour des configurations de parois isolées soumises à différents types de conditions aux limites et dans lesquelles on fait varier la position, le type d'isolant, l'orientation et la part volumique de joints. Dans cette partie cinq variables sont observées : la température, l'humidité relative, la teneur en humidité dans la pierre calcaire, le flux de chaleur et le flux de masse des surfaces intérieures. Ainsi, le jeu des données générées peut atteindre l'ordre de $1 \cdot 10^3$. Il devient donc très complexe d'analyser toutes les données, sans avoir recours à une méthode permettant d'avoir une vision globale de l'ensemble des configurations. Parmi les méthodes statistiques, l'analyse en composantes principales (ACP) permet de grouper les données par leur ressemblance en terme de variables et d'individus.

3.4.2 L'analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode de représentation des données qui consiste à réduire la dimension d'un problème de p -variables et n -observations (individus) à un problème de dimension r tel que $r < p$. La conception de cette méthode statistique est attribuée à Karl Pearson (1901). Elle a été intégrée à la statistique mathématique par Harold Hotelling (1933) mais son développement et utilisation sont survenus après les années 90 grâce au moyens de calcul modernes [Lebart *et al.* 1995], [Peña 2002], [Saporta 2006].

Dans l'analyse des données, le problème est généralement formulé de la manière suivante : on dispose de p -variables et n -individus (sur lesquels ces variables sont mesurées ou simulées) distribués dans une matrice X de dimension $n \times p$, où les variables figurent dans les colonnes et les individus dans les lignes. L'objectif de l'ACP est de trouver un sous-ensemble à dimension réduite (nouvelle variable sur laquelle les points (individus) projetés conservent leur structure initiale, i.e., avec la moindre distorsion possible). La figure 3.3 permet d'illustrer cette notion avec un problème à deux dimensions ($p=2$), projeté sur une nouvelle variable de dimension 1. La droite a est tracée afin que (i) la distance b entre l'ensemble des individus n et la droite soit la plus courte possible et (ii) que la distance relative entre ces individus soit préservée le mieux possible. En d'autre terme, a est la nouvelle variable (ou composante) qui minimise la distance orthogonale b entre les individus n et a . Dans le cas d'un problème avec une dimension $p > 2$, l'ACP crée des composantes principales sur lesquelles seront indiquées en pourcentage de représentativité des variables projetées. Ces composantes sont calculées par la combinaison linéaire des variables originales dont la variance est la plus grande. Les individus sont alors représentés par deux vecteurs ou composantes principales (composante 1 et 2) [Peña 2002].

L'analyse des données peut être alors abordée sous deux angles, soit par la notion de voisinage entre les individus, soit par la corrélation entre les variables [Chesné 2012]. Concer-

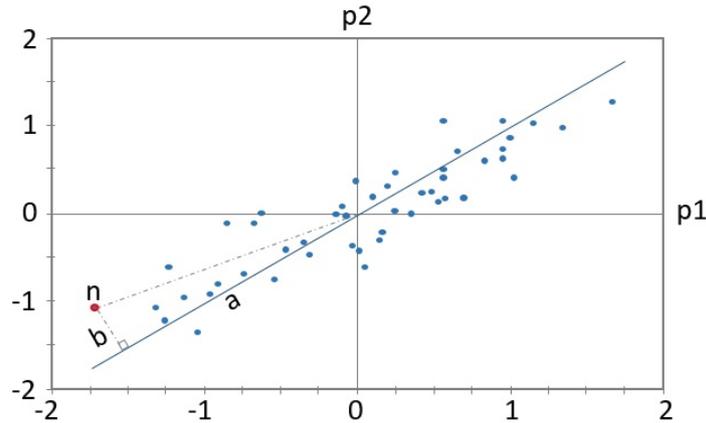


FIGURE 3.3 – Exemple avec 2 variables (p_1 , p_2), n -individus dispersés dans le plan et représentation de la droite a que minimise les distances orthogonales entre n_i et a (adapté de [Peña 2002])

nant les individus, la distance euclidienne classique, permet de calculer leur proximité et le coefficient de relation linéaire r , permet d'évaluer la corrélation entre une variable j_1 et j_2 (équations (3.12) et (3.13))⁸.

$$d^2(i_1, i_2) = \sum_{j=1}^p (x_{i_1j} - x_{i_2j})^2 \quad (3.12)$$

$$r(j_1, j_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij_1} \cdot x_{ij_2} \quad (3.13)$$

La représentation des données en terme de proximité entre individus et de corrélation entre variables ne peut pas être faite de manière simultanée. En ACP deux espaces représentés sur des axes factoriels sont créés : un pour les nuages de n -points individus et un pour les p -points variables. La lecture des données en terme des n -individus est faite à l'aide des p -variables et vice-versa, d'où l'impossibilité d'une représentation simultanée de n et p . Dans la figure 3.4 sont illustrés les deux espaces avec une ACP normée (centrée et réduite) à deux dimensions [Lebart *et al.* 1995].

Étant donné que l'ACP est normée (le diamètre du cercle dans lequel sont contenues les variables est égale à un), l'interprétation des données dans le plan de corrélation entre variables (figure 3.4(b)) est faite de la manière suivante : les variables qui se trouvent le plus proche du périmètre du cercle sont les mieux représentées car, comme il a été expliqué précédemment, la projection sur le plan factoriel cherche à maximiser leur distance. Par conséquent sur la figure 3.4(b), la variable 3 n'est pas représentée de manière optimale

8. Dans l'équation (3.13) les valeurs sont centrées et réduites.

dans le premier plan factoriel, à la différence des autres variables dont la longueur du vecteur est très proche de 1. Concernant la corrélation entre les variables, l'interprétation se fait suivant l'angle qui les sépare : (i) deux variables sont *corrélées* (positivement) si l'angle entre elles est proche de zéro, e.g. les variables 1 et 5, elles suivent un comportement similaire ; (ii) deux variables sont *anti-corrélées* (corrélées négativement) si l'angle est proche de 180° , e.g. les variables 1 et 4 (ou 5 et 4), ces jeu de variables se comportent de manière opposée ; (iii) deux variables sont *décorrélées* si leur angle est proche de 90° , e.g. les variables 5 et 2, la variable 2 est corrélée avec la composante v_2 et la variable 5 est corrélée avec la composante v_1 . D'autre part, la méthode de l'ACP permet de grouper les variables suivant leur tendance ou évolution globale, non pas par leur valeur. Dans la figure 3.4b, les variables 1 et 5 sont corrélées (i.e. elles ont un comportement similaire).

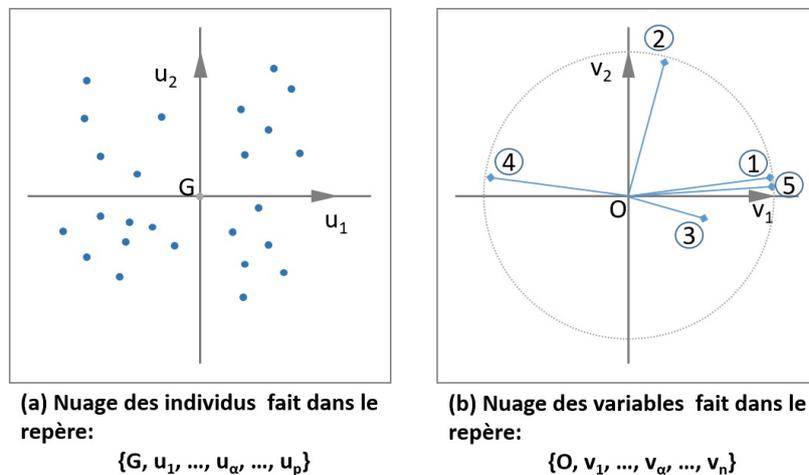


FIGURE 3.4 – (a) Nuage des individus représentés dans un espace \mathbb{R}^p et nuage des variables représentées dans l'espace \mathbb{R}^n (adapté de [Lebart *et al.* 1995])

Dans le cadre de ses travaux de thèse, [Chesné 2012] a appliquée la méthode de l'ACP à des indicateurs bioclimatiques (variables quantitatives) afin d'analyser le potentiel et les performances des parois (configurations-individus) par rapport au soleil dans des maisons BBC. A titre d'exemple, l'ACP appliquée à l'ensemble des données lui a permis de constater que, concernant les individus : (i) les surfaces vitrées et opaques doivent être analysées séparément car très discriminantes dans la distribution des individus (dans les résultats de l'ACP deux groupes d'individus sont formés), (ii) par rapport à la version du bâtiment (BBC ou construit avant 1974) et le site météorologique (Trappes ou Marseille) il n'est pas possible de faire une distinction des modalités des individus, en revanche (iii) l'orientation tend à séparer ces modalités. Concernant les variables, [Chesné 2012] a pu constater que les parois qui permettent de mieux couvrir des besoins en chauffage sont généralement celles qui génèrent plus de besoins en rafraîchissement.

Conclusions partie I

Cette première partie d'approche bibliographique est structurée en trois chapitres. Le chapitre 1 a permis d'aborder l'aspect de la rénovation thermique sous l'angle des propriétés hygrothermiques des matériaux et les performances que ceux-ci confèrent aux bâtiments anciens. Des propriétés, telles que l'inertie thermique et l'hygroscopicité des matériaux, sont nécessaires à prendre en considération à l'heure de la rénovation dans ce type de constructions. Cependant, on a pu constater que les interventions dans le bâti ancien semblent ne pas être bien encadrées du point de vue réglementaire. Dans le cas des bâtiments construits avant 1948, sous le principe de précaution, la réglementation thermique stipule une intervention élément par élément, sans que l'aspect hygrique soit intégré.

D'autre part, l'état de l'art sur la rénovation thermique a permis de constater que peu d'études prospectives intègrent les évolutions possibles du climat dans l'évaluation des performances thermiques de bâtiments anciens rénovés. L'étude de cet aspect devient majeure d'autant plus que l'ensemble de scénarios climatiques (GIEC) prévoit une augmentation de la température à l'horizon 2100. Ces prévisions s'accordent sur une augmentation de la température moyenne en été supérieure à celle en hiver. Cela se traduit par une augmentation significative des besoins de climatisation accompagnée d'une légère diminution des besoins de chauffage. D'où l'importance manifeste d'évaluer les conditions intérieures des bâtiments en période d'été et dans des conditions de vague de chaleur. À cette fin, on dispose d'une gamme d'outils de simulation thermique dynamique (STD) de bâtiments. Cependant certains d'entre eux sont peu ou pas appropriés pour simuler les performances des bâtiments anciens rénovés dans des scénarios du climat actuel et futur. Dans le chapitre 2 on a exposé les outils STD les plus répandus à l'heure actuelle. Cette étape a également permis d'orienter le choix de l'outil de simulation vers le logiciel Energyplus et l'interface DesignBuilder. Les fonctionnalités du logiciel sont alors introduites dans cette partie afin de comprendre la façon dont les aspects repérés dans l'état de l'art de la rénovation de bâtiments anciens sont pris en considération par le logiciel et faciliter ainsi le processus de calage du modèle dans la suite du travail (e.g. la gestion des apports de chaleur et d'humidité). Une procédure appliquée par [Judkoff *et al.* 2010b] montre des résultats fiables obtenus avec EnergyPlus dans la simulation des maisons rénovées. D'autre part, le calage d'un modèle construit dans un environnement de simulation est central. Dans la littérature on a trouvé divers approches envisageables : par le biais manuel ou en appliquant une méthode du domaine d'analyse de sensibilité des paramètres. D'ailleurs comme souligné par [Cipriano *et al.* 2015] il est très complexe, voire impossible, d'identifier la solution exacte dans le calage d'un modèle pour la simulation énergétique des bâtiments.

Comme énoncé dans l'introduction, ce travail de thèse comporte une partie d'analyse à l'échelle des logements et une partie à l'échelle de la paroi. À la fin de cette partie (chapitre 3) les mécanismes des transferts de chaleur et de masse à cette échelle ont été exposés. Cette

étape a également permis d'identifier les propriétés des matériaux associées aux phénomènes de transferts et le développement des équations avec les hypothèses qui permettent d'arriver à l'expression finale de transferts de chaleur et de masse qui sera développée dans la partie III de ce manuscrit. À la fin du chapitre on introduit une méthode d'analyse des données (analyse en composantes principales, ACP) qui permettra de traiter globalement les résultats à l'échelle de la paroi.

Ce chapitre a mis en évidence :

- Le manque de résultats scientifiques sur les bâtiments anciens rénovés dans la ville de Paris aussi bien pour des conditions météorologiques actuelles que futures.
- Les études multi-échelles (un cas d'étude regroupant à la fois l'étude à l'échelle du logement et des parois) sont peu nombreuses dans ce domaine.
- Très peu d'études utilisent la méthode ACP pour le traitement de données de simulations de flux de chaleur et de masse et aucune ne semble l'avoir utilisée sur des résultats de simulations dynamiques.

L'originalité de ce travail de thèse porte sur ces points.

Deuxième partie

CONSTRUCTION D'UN MODÈLE THERMIQUE DYNAMIQUE DE LOGEMENTS ANCIENS RÉNOVÉS À PARIS

Dans la première partie ont été présentées les propriétés hygrothermiques de bâtiments anciens et les enjeux de la rénovation de ce type des constructions ; ainsi que les outils de simulation à l'échelle du bâtiment. On a finalement introduit le modèle permettant d'évaluer les transferts de chaleur et de masse à l'échelle de la paroi. L'objectif de cette deuxième partie est d'évaluer les performances hygrothermiques de deux logements parisiens construits à la fin du XIX^e en pierre calcaire et rénovés en 2012. À cette fin, on a construit un modèle à l'échelle du bâtiment dans un outil de simulation thermique dynamique (STD), lequel a été calé et validé à travers des données expérimentales d'une campagne de mesure lancée en avril 2014. Ainsi, le calage du modèle (à l'échelle des logements) a été réalisé à l'aide des données enregistrées en 2014. Concernant la validation, les données enregistrées en 2015 ont permis de vérifier la précision du modèle à prédire le comportement des logements étudiés (constructions anciennes rénovées) soumis à différentes conditions météorologiques, notamment en période d'été. Comme exposé dans la partie I, il est prévu que des conditions extrêmes de chaleur deviennent plus fréquentes dans le futur, d'ailleurs en été 2015 une période caniculaire a été déclarée entre la fin de juin et le début de juillet. Afin d'évaluer le comportement des logements anciens rénovés dans des conditions extrêmes, un scénario hypothétique a été simulé et comparé à un scénario dans des conditions normales. Finalement, une première approche du confort thermique est exposée.

Cas d'étude : bâtiment ancien en moellon calcaire rénové avec de l'isolation thermique par l'intérieur (ITI) et par l'extérieur (ITE)

4.1 Description

Dans le cadre de ces travaux, deux logements occupés de $65,7\text{m}^2$ et $87,1\text{m}^2$ (3ème étage : 67m^2 + comble aménagé : $20,1\text{m}^2$), localisés dans le 20^e arrondissement de Paris au dernier étage d'un bâtiment de trois étages sont étudiés (figure 4.1). Le bâtiment, construit au XIX^e siècle et rénové en 2012, est entouré de bâtiments à plusieurs étages : à l'est un bâtiment de 2 étages, à l'ouest un bâtiment de 6 étages, au sud un bâtiment de 4 étages (figure 4.2).

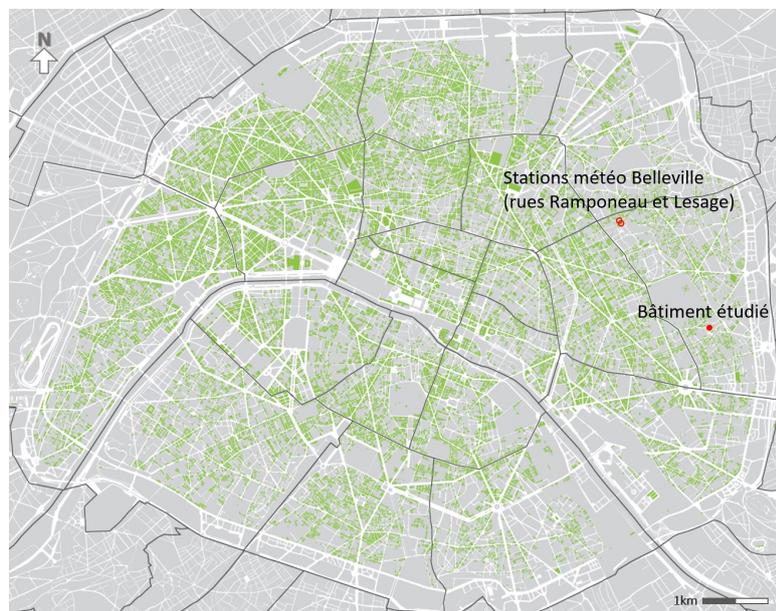


FIGURE 4.1 – Plan de densification des bâtiments construits à Paris avant 1914. Localisation du bâtiment étudié et de la station météo. Source du plan : APUR

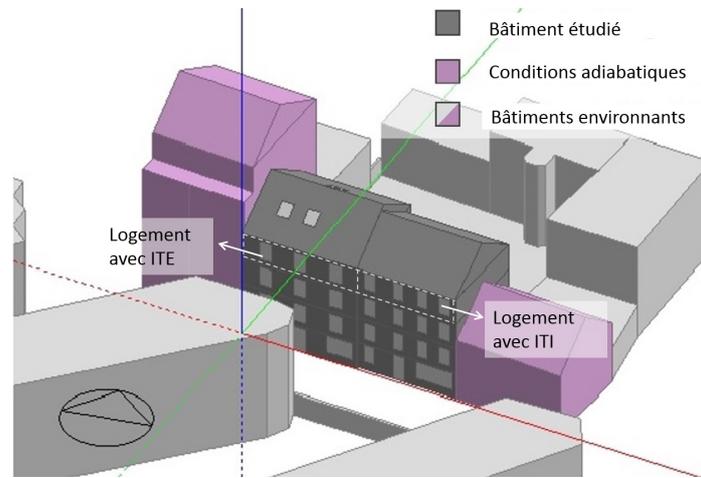


FIGURE 4.2 – Bâtiment étudié et son environnement proche : en gris foncé le bâtiment et les logements étudiés (ouest : logement avec isolation thermique par l'extérieur (ITE), est : logement avec isolation thermique par l'intérieur (ITI)), en violet les bâtiments voisins avec des conditions adiabatiques et en gris clair les bâtiments environnants (interface graphique DesignBuilder)

Durant la période d'été, la façade principale, le toit et particulièrement les surfaces vitrées des logements étudiés sont exposés au rayonnement solaire. L'ombre des bâtiments voisins atteint ces surfaces à la fin de la journée. Tenant compte de ce constat, l'évaluation du flux de chaleur par rayonnement joue un rôle important pour comprendre le comportement thermique des zones concernées.

Les logements étudiés se trouvent dans le même immeuble, ils sont adjacents et soumis aux mêmes conditions : la façade principale est orientée direction sud sud-ouest. Ces logements ont fait l'objet d'une rénovation thermique différente : sur la façade sud, le logement côté est a été rénové avec de l'isolation thermique par l'intérieur avec de l'isolant en laine minérale et le logement côté ouest a été rénové avec de l'isolation thermique par l'extérieur avec de l'isolant en polystyrène. Désormais, ces deux logements seront notés ITI et ITE en lien aux interventions sur la façade principale. Concernant la façade nord (sur cour), une isolation thermique par l'extérieur en polystyrène a été mise en place. Dans le logement ITI l'isolant de cette façade est posé sur un mur en pierre calcaire et dans le logement avec ITE, l'isolant a été posée sur un mur en parpaing. D'autre part, au 3^e étage, les zones sont distribuées de manière similaire (figure 4.3) : la cuisine et le salon sont localisés dans la zone exposée au rayonnement solaire ; les chambres, la salle de bain et les toilettes sont localisées à l'opposée, dans la zone non-exposée au rayonnement solaire.

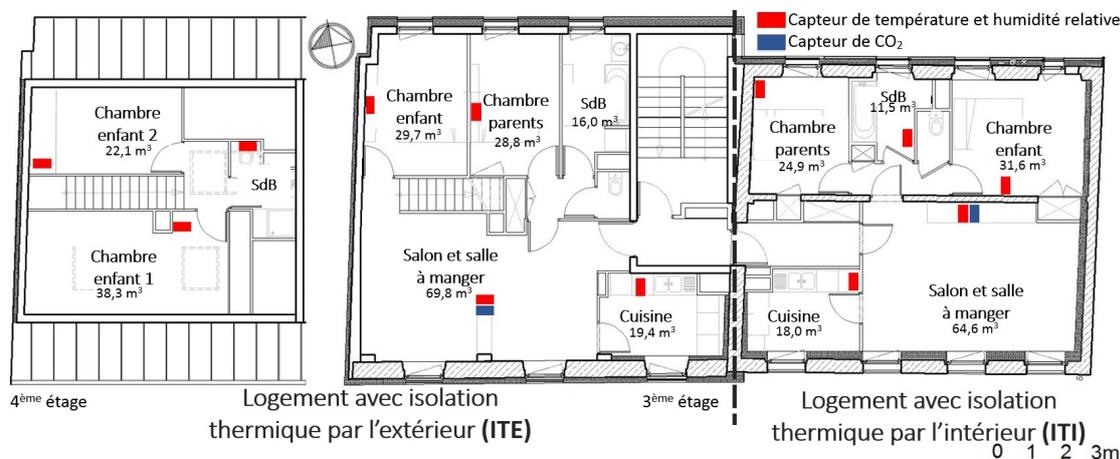


FIGURE 4.3 – Plan architectural des logements ITI et ITE étudiés (3^{ème} étage et comble 4^{ème} étage). Localisation des capteurs de mesure dans chaque zone

Les travaux de rénovation thermique comprenaient aussi le changement du type de fenêtre (de simple à triple vitrage), avec menuiserie en bois, l'installation d'un système de ventilation mécanique (VMC¹ hygroréglable) et le changement du système de chauffage (chauffage central avec des radiateurs à panneau en acier). Ainsi, soumis aux mêmes conditions et rénovés avec des techniques d'isolation différentes, ces logements offrent l'avantage de pouvoir évaluer l'impact de la couche isolante (nature et position) sur les conditions intérieures. Cependant il faut préciser que les données des consommations avant et après rénovation non pas été renseignées.

4.2 Propriétés des matériaux

Le bâtiment, construit durant le XIX^e siècle, est constitué de murs en moellons en calcaire. Les revêtements utilisés à l'intérieur et à l'extérieur étaient des enduits à base de chaux et de plâtre qui ont été supprimés au cours des travaux de rénovation et remplacés par du plâtre à l'intérieur et enduit à base de chaux-plâtre à l'extérieur. Ce matériau agit comme une barrière à l'eau liquide, mais elle reste perméable à la vapeur d'eau. La façade sud en ITI et ITE, et la façade nord en ITI sont constituées de moellons calcaires ébauchés à deux parements² [Velazques & Calberg-Ellen 2014] (figure 4.4a), hourdés avec un mortier de plâtre et chaux, les épaisseurs de murs qui en résultent vont jusqu'à 46 cm (table 4.1). Les matériaux utilisés à cette époque étaient prélevés localement, ce qui donnait lieu à une grande diversité de matériaux (non standardisés) avec des propriétés hygrothermiques méconnues et difficiles à évaluer avec précision. Dans une coupe transversale du mur de la façade principale réalisée lors de la rénovation, on constate des éléments

1. Ventilation mécanique contrôlée

2. Les moellons ébauchés sont des pierres calcaires taillées de manière à avoir la face du parement équarrie, i.e. une face grossièrement rectangulaire. Définition donnée sur http://www.pierreseche.com/vocabulaire_pierreseche_M.html

très hétérogènes qui génèrent des petites cavités d'air entre les deux parements (figure 4.4a). D'autre part, le bâtiment présente des traces de briques, de béton et de fer, comme conséquence des interventions subies au cours des années. Dans les planchers des logements rénovés en ITI, certains éléments structuraux ont été remplacés par des poutres métalliques et des solives en bois supportant des tôles métalliques et une dalle en béton (figure 4.4b et 4.4c).

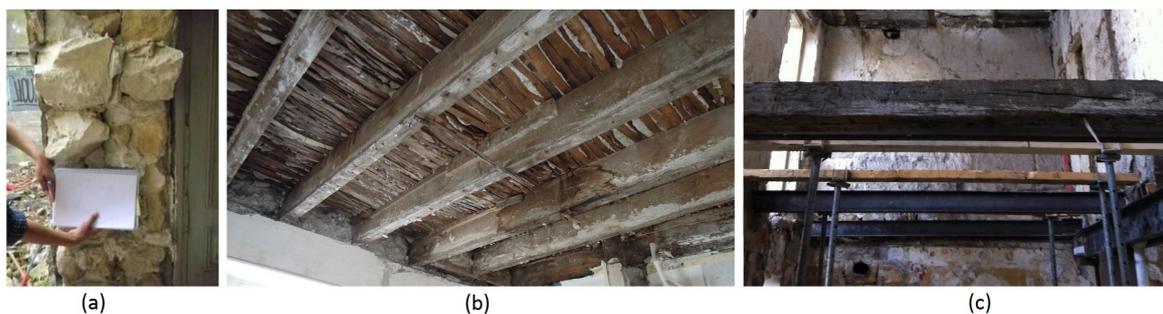


FIGURE 4.4 – Matériaux logement ITI. (a) mur en moellon calcaire (façade sud en ITI et ITE); (b) plancher avec des solives et lattis en bois; (c) poutres métalliques (remplacées) et en bois (existantes). Source : EQUATEUR Architecture³ et [Velazques & Calberg-Ellen 2014]

Concernant les planchers des logements en ITE, compte tenu de l'état de détérioration des éléments structuraux, le plancher a été démoli et reconstruit avec une dalle béton et armature en acier (figure 4.5d). La structure de ce côté du bâtiment est constituée des murs porteurs en parpaing et des poteaux en béton adossés à la façade afin de la renforcer (figure 4.5a, 4.5b). La façade nord a été rénovée avec de l'isolation thermique par l'extérieur en polystyrène (figure 4.5c) dans les deux types des logements.



FIGURE 4.5 – Matériaux logement ITE. (a) mur en moellon et colonnes en béton (façade sud); (b), (c) mur en parpaing sans et avec isolation en polystyrène (façade nord); (d) armature en acier pour dalle en béton. Source : EQUATEUR Architecture

3. Architecte en charge de la rénovation des logements

Comme mentionné précédemment, la façade sud a été rénovée en ITE avec du polystyrène, et en ITI avec de la laine minérale. La résistance thermique résultante est similaire dans les deux types de mur. La conductivité thermique initiale (valeur initiale dans le processus de calage du modèle) de la laine minérale était de $0,032\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, celle du polystyrène de $0,038\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ce qui donne des épaisseurs différentes (tableau 4.1) de manière à conserver une résistance thermique égale dans les deux types de parois (ITI et ITE) [Velazques & Calberg-Ellen 2014]. Dans le cadre de ce projet, aucun prélèvement d'échantillon n'a été envisagé pour mesurer les propriétés thermiques et hygriques des matériaux. Une fois les matériaux identifiés (photos, informations fournies par l'architecte EQUATEUR Architecture et un document d'évaluation [Velazques & Calberg-Ellen 2014]), les valeurs des propriétés ont été obtenues à partir de la littérature, sur des travaux réalisés dans le bâtiment ancien en France principalement de [Stéphane *et al.* 2013], [Abelé *et al.* 2009], [Treichsel 2001] et de la base de données des matériaux disponible dans le logiciel WUFI ®⁴ (version 3.4.2) [Fraunhofer IBP 2014]. Ces valeurs dites standards ont ensuite été ajustées, et seront exposées au chapitre 5.2.

Concernant les surfaces vitrées (environ 28% de la surface totale des façades), elles ont été entièrement rénovées : les fenêtres simple vitrage ont été remplacées par des fenêtres triple vitrage avec cadre en bois haute performance. Les propriétés thermiques sont enregistrées dans le dossier des ouvrages exécutés (DOE) : le coefficient de transmission U_w des fenêtres triple vitrage installées correspond à $0,9\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ (les propriétés optiques seront données dans le chapitre 5.2.2) ; environ trois fois plus performante qu'une fenêtre simple vitrage. D'autre part, des stores textiles ont été installés à l'extérieur des fenêtres, cependant ils ne sont pas toujours utilisés.

Tableau 4.1 – Épaisseur des matériaux utilisés pour la façade sud

Couche du mur (de l'int. vers l'ext.)	Épaisseur [cm]	
	ITI	ITE
Plâtre	1,5	1,5
Laine minérale	22	-
Pierre calcaire	46	46
Polystyrène	-	18
Enduit plâtre chaux	1,5	1,5

4. Logiciel de simulation transitoire de transfert de chaleur et de masse couplé pour des composants du bâtiments, développé par Fraunhofer IBP. Dans la suite du manuscrit le logiciel sera cité comme WUFI

4.3 Approche expérimentale et données (scénario hypothétique)

L'évaluation du comportement des logements anciens rénovés avec de l'isolation thermique est réalisée à l'aide des données enregistrées entre 2014 et 2015 (à l'intérieur, et à l'extérieur des logements). À l'intérieur une campagne de mesure a permis le suivi de l'évolution de température et d'humidité relative dans chaque zone. Ces données ont été utilisées dans le calage et la validation d'un modèle construit à l'échelle du logement (les données obtenues dans le modèle ont été comparées aux données mesurées). Concernant les données extérieures, elles ont été obtenues à l'aide d'une station météo située en ville. Ces données ont également servi dans le calage du modèle : elles ont été utilisées comme données d'entrée du modèle. Une fois le modèle validé, on étudie le comportement des logements dans des conditions extrêmes de chaleur. Pour cela, des conditions extérieures hypothétiques issues des simulations météorologiques ont été utilisées. Ces données correspondent à des scénarios de conditions extrêmes à Paris. Les résultats des simulations dans ces conditions ont été comparés à des résultats avec des conditions actuelles créées sur la même base, (i.e. simulations des conditions météorologiques). Elles sont appelées par la suite des conditions de "vague de chaleur" et "standard".

4.3.1 Campagne de mesure : conditions à l'intérieur des logements

4.3.1.1 Description des capteurs

En avril 2014 une campagne de mesure a été lancée dans les logements rénovés afin d'étudier les évolutions de température de l'air et d'humidité relative à l'intérieur. Des capteurs de température de l'air (T) et d'humidité relative (φ) ont donc été installés dans chaque zone des logements, plus un capteur de dioxyde de carbone (CO₂) et un capteur de température moyenne de rayonnement (TR), ces deux derniers ont été installés dans le salon. La position des enregistreurs de données a été étudiée de manière à respecter le critère suivant : éviter toute source de chaleur et de rayonnement solaire direct (figure 4.3).

Les logements étant occupés, une campagne de mesure non intrusive a été privilégiée. Le système de monitoring retenu est le système sans fils de Delta OHM avec des enregistreurs HD35 et une unité de recueil des données par radio fréquence (RF) HD35AP. Le système de mesure est composé de dispositifs à distance (connectés à des sondes de mesures ou des capteurs intégrés) qui enregistrent et stockent l'information dans une mémoire interne à des pas de temps réguliers allant de la seconde à l'heure. Dans le cadre de cette étude les données sont enregistrées durant les deux premiers mois (avril et mars 2014) toutes les 5 minutes ($\Delta t_{mesure} = 5\text{min}$) ; ensuite, compte tenu de la capacité de stockage des enregistreurs, du délai de prélèvement et temps de téléchargement des données, le pas de temps d'enregistrement a été changé à toutes les 10 minutes ($\Delta t_{mesure} = 10\text{min}$). Ce pas de temps d'enregistrement a été également choisi suivant le temps de réponse de la grandeur enregistrée lorsque le bâtiment est soumis à un changement de conditions extérieures ou lorsqu'un apport de chaleur ou de masse se produit. Les données stockées sont alors recueillies régulièrement à

travers l'unité d'acquisition par radio fréquence, laquelle transfère les données des capteurs au PC à travers le logiciel HD35AP-S. Ce logiciel permet d'observer les variables mesurées (T , φ , CO_2 et TR) ainsi que des variables calculées : la température de rosée [$^{\circ}\text{C}$], la température du bulbe humide [$^{\circ}\text{C}$], l'humidité absolue [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], l'humidité spécifique [$\text{g}_{\text{eau}}\cdot\text{kg}_{\text{airsec}}^{-1}$] et la pression de vapeur [Pa]. Dans le tableau 4.2 sont présentées les caractéristiques des capteurs, avec leur précision, plage de mesure et stabilité (données constructeur). Dans ce manuscrit ne seront présentées et traitées que les grandeurs suivantes : Température (de l'air et moyenne de rayonnement), humidité relative et dioxyde de carbone (tableau 4.2).

Tableau 4.2 – Caractéristiques des capteurs données par le constructeur Delta OHM

	Précision de mesure	Plage de mesure	Stabilité
Température [$^{\circ}\text{C}$]	$\pm 0,20^{\circ}\text{C}$ ($0^{\circ}\text{C} \dots 60^{\circ}\text{C}$)	$-40^{\circ}\text{C} \dots 105^{\circ}\text{C}$	$0,05^{\circ}\text{C}/\text{an}$
Humidité relative [-]	$\pm 0,018$ ($0 \dots 0,80$)	$0 \dots 1$	$< 0,0005/\text{an}$
Dioxyde de carbone [ppm]	$\pm 50\text{ppm} + 3\%$ de la mesure @ 20°C et 1013hPa	$0 \dots 5000\text{ppm}$	5% de la mesure/ 5 ans

4.3.1.2 Test de précision des capteurs en condition laboratoire

Avant l'installation des capteurs dans les logements, des mesures sur la température ont été réalisées au laboratoire dans une même pièce afin d'évaluer les écarts, dans un premier temps, par rapport à la moyenne et, dans un deuxième temps, par rapport à une sonde de référence calibrée. Sur la figure 4.6 sont tracées les courbes de température mesurées pendant plus de deux semaines. Le graphique du haut présente les données mesurées avec les capteurs⁵ installés dans le logement avec de l'isolation thermique extérieure (ITE, courbes en bleu). Le graphique du bas montre les évolutions de la température mesurées avec les capteurs installés dans le logement avec de l'isolation thermique par l'intérieur (ITI, courbes en vert). On observe qu'entre le 9 et le 11 décembre et à partir du 13 décembre le capteur 131 (installé en ITE, chambre enfant au comble aménagé) présente une légère augmentation par rapport à la température moyenne (\bar{T} , courbe rouge en pointillé) avec un écart maximal de $0,50^{\circ}\text{C}$. Concernant les capteurs installés en ITI on observe que pendant le 9, 10, 11 décembre et à partir du 13 jusqu'au 18 décembre, le capteur 190 (installé dans le salon) enregistre des températures inférieures à la moyenne avec un écart similaire à celui du capteur 131 (maximum de $0,60^{\circ}\text{C}$). Ce comportement se présente en régime de chauffage, les weekends, lorsque le chauffage est éteint au laboratoire et que la température chute à l'intérieur, les deux capteurs rejoignent les mêmes évolutions que les autres capteurs, avec des valeurs très proches de la moyenne dans les données enregistrées avec l'ensemble de capteurs.

5. Pour clarté de lecture des graphiques et des tableaux, les capteurs sont abrégé par la lettre c , accompagnée par leur numéro

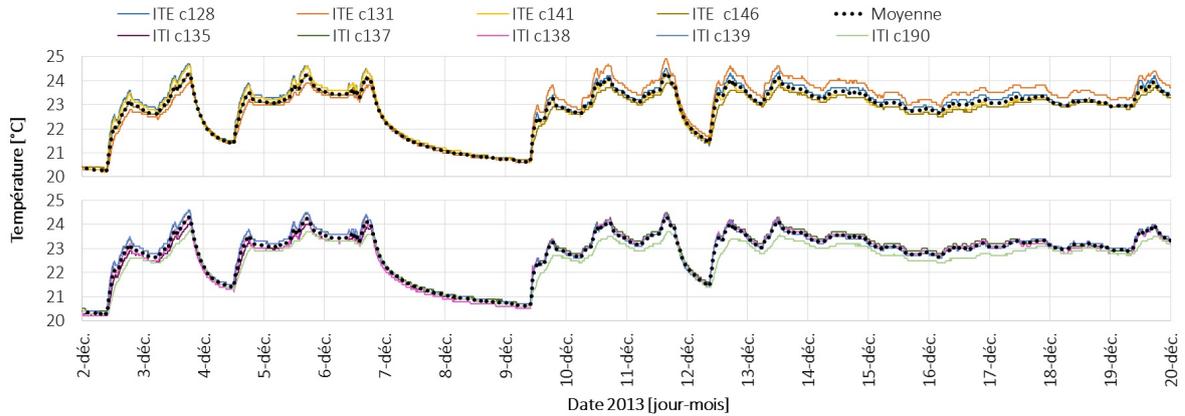


FIGURE 4.6 – Test de précision des capteurs par rapport à la moyenne

Suite à cette étape, un test de précision a été réalisé au laboratoire, avec une sonde thermométrique à résistance qui a servi de référence : ASL⁶ modèle F17. L'instrument est équipé d'un thermomètre à résistance de platine (Pt100). Le principe de l'instrument est de mesurer le ratio de deux résistances connectées en série : R_S qui désigne la résistance standard et R_T qui désigne la résistance inconnue, celle-ci est calculée par le ratio R_T/R_S , donné par l'instrument. Ensuite l'équation (4.1) de Callendar-Van Dusen⁷ est appliquée. Cette équation met en relation la résistance de la platine et la température pour les thermomètres à résistance de platine.

$$R_T = R_0(1 + AT_{90} + BT_{90}^2) \quad (4.1)$$

où R_T [Ω] est la résistance inconnue, T_{90} [$^{\circ}\text{C}$] est la température, R_0 [Ω] est la résistance à $T_{90}=0^{\circ}\text{C}$ selon l'échelle internationale de température de 1990 (ITS-90), A et B sont les constantes pour le thermomètre à résistance de platine équivalent à $A=3,9083 \cdot 10^{-3} \text{C}^{-1}$, $B=-5,7775 \cdot 10^{-7} \text{C}^{-2}$. La résolution de la fonction quadratique permet ensuite de calculer la température à l'aide de l'équation (4.2) :

$$T = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_T}{R_0}\right)}}{2B} \quad (4.2)$$

La figure 4.7 montre les températures enregistrées dans une pièce pendant 3 jours avec la sonde thermométrique à résistance comme valeur de référence. On observe que le capteur 146 (installé en ITE dans le salon) enregistre des températures légèrement au-dessus de la température mesurée avec la sonde de référence; les autres capteurs enregistrent des

6. Automatic Systems Laboratories Milited

7. DIN/IEC 60751

températures inférieures.

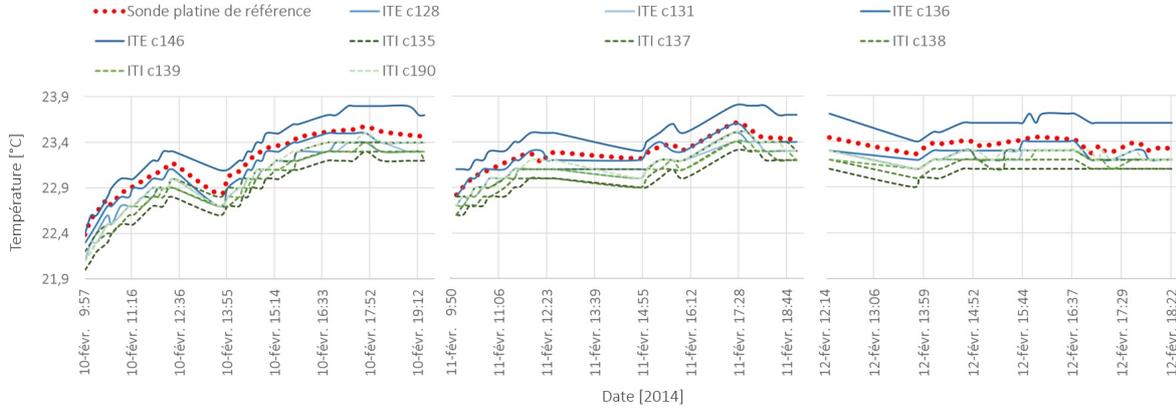


FIGURE 4.7 – Test de précision des capteurs avec une sonde thermométrique à résistance

Dans le tableau 4.3 sont présentées les erreurs absolues moyennes (EAM) calculées à partir de l'équation (4.3), l'erreur absolue (EA) maximale et minimale calculées avec la sonde de référence. Pour 90 observations par capteur, on observe des EAMs variant entre 0,066 (capteur 136, installé en ITE dans la cuisine) et 0,309 (capteur 135, installé en ITI dans la chambre enfant), avec des valeurs de EA_{min} de 0,001 (capteur 136) et EA_{max} de 0,372 (capteur 138, installé en ITI dans la salle de bain).

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}| \quad (4.3)$$

où n est le nombre de données, x_i est la valeur mesurée avec le capteur et \hat{x} est la valeur de référence.

Tableau 4.3 – Caractéristiques de mesure des capteurs placés à l'intérieur des logements

	Capteur de température								
	c128	c131	c135	c136	c137	c138	c139	c146	c190
EAM [°C]	0,157	0,174	0,309	0,066	0,145	0,252	0,195	0,194	0,141
EA_{max} [°C]	0,287	0,329	0,472	0,1505	0,272	0,372	0,349	0,350	0,349
EA_{min} [°C]	0,074	0,074	0,074	0,001	0,020	0,135	0,074	0,012	0,005

Dans le test de précision on constate que deux des capteurs (le c135 et le c138) présentent des erreurs (EAM) légèrement supérieure de la valeur donnée par le constructeur (tableau 4.2). Cette différence de mesure par rapport à la sonde de référence reste cependant acceptable pour la réalisation de la campagne de mesure sur site.

4.3.2 Données météorologiques

4.3.2.1 Conditions extérieures

Les données météorologiques, fournies par [Hendel *et al.* 2015a] ont été obtenues à l'aide de deux stations météo situées à moins de 3 km des logements étudiés dans le même arrondissement (20^e) sur les rues Ramponeau et Lesage (stations météo Belleville, figure 4.1). Ces rues possèdent un environnement urbain similaire à notre cas d'étude : hauteur de bâtiment et largeur de rue. Les grandeurs mesurées sont : température de l'air, humidité relative, rayonnement solaire global⁸, direction et vitesse du vent et pluviomètre (figure 4.8). La calibration des instruments a été effectuée en aval suivant les standards ISO16622 : 2002⁹ et IEC 60751 : 2008¹⁰ pour les capteurs de vitesse de vent et de température moyenne de rayonnement respectivement. Concernant la calibration des capteurs de température de l'air et d'humidité relative, celle-ci a été effectuée à l'aide des capteurs de référence calibrés [Hendel *et al.* 2015b]. Les propriétés des instruments mesurant la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de l'air et l'irradiation solaire sont données dans le tableau 4.4. Les données ont été enregistrées à des pas de temps de 1 à 5 minutes en UTC¹¹+2. Elles ont été ensuite recompilées à des pas de temps de l'heure en calculant la moyenne autour de l'heure à travers l'équation (4.4). Ces données ont permis de reconstituer le fichier météo utilisé par l'outil de simulation thermique dynamique STD et pour le calage du modèle, mais aussi pour comprendre les évolutions des grandeurs enregistrées à l'intérieur des logements.

$$\bar{x}_h = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_{h-30+i \cdot p} \quad (4.4)$$

où $n=60/p$, p étant les pas de temps auxquelles ont été recueilli les données (5 ou 1 minute), \bar{x}_h est la moyenne autour de l'heure de la donnée mesurée, $x_{h-30+i \cdot p}$ est la donnée mesurée à un instant donné. Cette équation a été appliquée à l'ensemble des données mesurées, i.e. données météo et les données recueillies avec la campagne de mesure.

La construction du fichier météo utilisé dans les simulations dans le logiciel EnergyPlus est expliquée dans l'annexe A.1.

8. Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus

9. Meteorology – Sonic anemometers/thermometers - Acceptance test methods for mean wind measurements ; Météorologie – Anémomètres/thermomètres soniques – Méthodes d'essai d'acceptation pour les mesurages de la vitesse moyenne du vent

10. IEC International standard Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensor ; IEC Norme internationale Thermomètres à résistance de platine industriels et capteurs thermométriques en platine

11. Coordinated Universal Time ; Temps universel coordonné

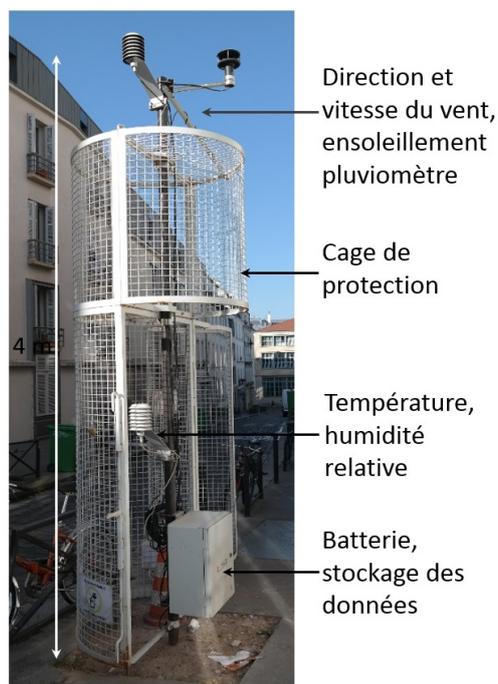


FIGURE 4.8 – Station météo rue Ramponeau avec les capteurs de mesure

Tableau 4.4 – Caractéristiques des capteurs station météo (adapté de [Hendel *et al.* 2015a])

Grandeur	Type d'instrument	Constructeur	Précision de mesure
Température de l'air	Pt100 DIN B	LSI LASTEM	$\pm 0,10^{\circ}\text{C}$
Humidité relative	Hygromètre capacitif	LSI LASTEM	$\pm 1,5\%$
Vitesse du vent	Anémomètre ultrasonique 2D	Gill instruments	$\pm 2\%/mesure$
Irradiation solaire	Pyranomètre-ISO 9060	LSI LASTEM	$\pm 2\%/jour$

4.3.2.2 Conditions extérieures hypothétiques : “standard” et “vague de chaleur”

Comme énoncé au début de chapitre (4.3), dans le cadre de cette thèse on évalue l'impact des isolants thermiques sur les conditions intérieures des deux logements étudiés, soumis à des conditions extérieures extrêmes de chaleur. Ainsi, des conditions météorologiques hypothétiques de “vague de chaleur” ont été recréés avec Meteonorm de Meteotest (version 7.1.3). Les résultats obtenus dans ces conditions sont comparés à des résultats obtenus dans des conditions du climat actuel, également générées par Meteonorm (cela afin de les comparer sur une même base) ; ces dernières conditions sont appelées “standard”.

Concernant Meteonorm, ceci est un logiciel de simulation basé sur des algorithmes d'interpolation et méthodes stochastiques qui permet à partir d'une base de données climatologiques (fichiers des données historiques), de générer des conditions météorologiques pour une période et un site donnés. Ces données météorologiques peuvent être représentatives des conditions actuelles, des conditions extrêmes de chaleur ou de froid, ou encore des scénarios du climat futur tels que définis par le GIEC¹² (voir section 1.2.4). Meteonorm a la capacité de simuler des événements climatiques (standard ou extrêmes), dont la température, le rayonnement solaire global et l'humidité relative entre autres, à partir des données météo enregistrées dans les six stations les plus proches du site choisi¹³. Pour les conditions extrêmes (de chaleur ou de froid), le logiciel utilise les valeurs maximales, les valeurs minimales et la déviation standard multipliée par un facteur pour simuler ces conditions [Meteotest 2015a], [Meteotest 2015b]. Le modèle utilisé par le logiciel est soumis à des incertitudes. Concernant la base de données de température et rayonnement global, l'erreur moyenne quadratique-trouvé lors d'un test effectué par Meteotest est de 7% pour le rayonnement solaire globale et de 1,2°C pour la température. Cependant, en comparaison avec les données mesurées à long terme (période supérieure à un mois), l'écart avec la base de données Meteonorm est inférieure à 3,2% (erreur quadratique moyenne) en terme de radiation totale moyenne. D'autre part, [Ciobanu *et al.* 2014] ont comparé dans une étude réalisée à Brasov (Roumanie), des données simulées par Meteonorm avec des valeurs mesurées *in situ* de température, de rayonnement solaire global et de vitesse du vent. Dans cette étude, les auteurs ont trouvé que durant la période d'été les écarts en terme de rayonnement solaire globale peuvent atteindre jusqu'à 10% (surestimation du modèle). Ils ont également trouvé que durant la même période en terme de température, le modèle surestime la valeur avec des écarts autour de 7%. En dépit des écarts trouvés, les auteurs estiment que les données météo générées par le modèle du logiciel sont fiables pour la réalisation de simulations à l'échelle du bâtiment.

4.3.3 Enquête comportement des usagers

Avant l'installation des capteurs dans les logements et durant la campagne de mesure, une enquête a été lancée auprès des locataires afin d'avoir une vision globale de leur comportement. Les objectifs principaux de cette démarche sont :

- *Suivi des données mesurées* : faciliter la lecture des données enregistrées et repérer les activités ayant un impact sur l'évolution des grandeurs évaluées
- *Simulation thermique dynamique* : recréer le comportement global des usagers dans le modèle.

L'enquête comprenait des horaires du couché, du levé, les périodes d'occupation (heure, nombre de personnes,..) en semaine, en weekend, et les périodes d'inoccupation. L'enquête a

12. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

13. Meteonorm dispose des données mesurées dans plus de 8325 stations météorologiques autour du monde

permis d'identifier de manière globale les actions entreprises sur la ventilation naturelle, les apports de masse et de chaleur liés à la cuisine, l'usage du lave-linge et les douches.

En semaine, les deux logements sont occupés par une famille de quatre personnes, chacun émettant entre 72 et 360 W (en fonction de l'activité physique, e.g. état de repos, activités de ménage ou sportive) [EnergyPlus 2013]. Les weekends, pour le logement avec isolation thermique par l'extérieur (ITE), trois membres de plus l'occupent. Concernant la simulation des occupants dans les logements, EnergyPlus et DesignBuilder permettent de gérer cet aspect à travers deux types de plannings d'occupation intégrés dans le logiciel : 7/12 et compact. Le premier permet de créer un profil d'occupation type pour chaque jour de la semaine, appliqué à chaque mois de l'année. Le deuxième type de planning, plus flexible, permet de définir jour par jour, heure par heure, pour les différentes dates de l'année, un type d'occupation. Par exemple, dans le logement ITI, occupé par une famille de quatre membres (densité équivalent à 0,0615 pers/m²), durant la période scolaire, les mercredis l'occupation est généralement la suivante : de 00h00 à 08h00, le logement est occupé à 100%, de 08h00 à 11h00, le logement est occupé à 50%; de 11h00 à 12h00, le logement est inoccupé, de 12h00 à 18h00, le logement est occupé par 3 membres (75%) et de 18h00 à 24h00 l'occupation est de 100%. La figure 4.9 illustre le planning 7/12 pour ce type de journée. D'autre part, le contrôle et la mise en route et arrêt des systèmes énergétiques (chauffage, climatisation), et la ventilation naturelle peuvent être définis à travers le planning.

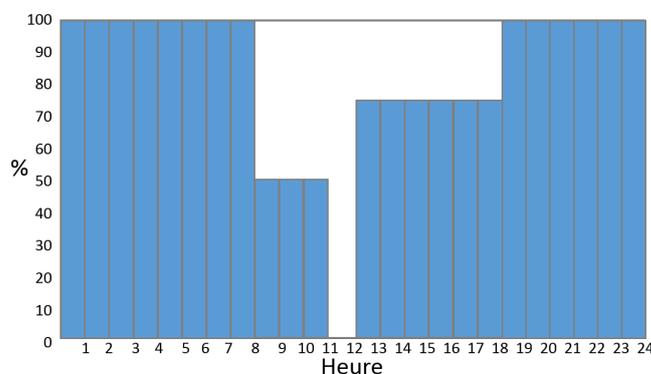


FIGURE 4.9 – Exemple planning type 7/12 pour une journée (mercredi) type dans le logement ITI

Les deux types de plannings ont été utilisés dans les simulations. Par exemple dans le cas de la définition de l'occupation des logements étudiés, le planning compact a été privilégié car cette type d'occupation demandait plus de précision. Contrairement au cas des logements étudiés, l'occupation des deux logements de dessus n'est pas connue. Dans ce cas, l'occupation a été intégrée sous forme de planning 7/12 avec des cas types (pour familles de 4 membres) et des profils journaliers, hebdomadaires et annuels proches de ceux des familles occupant les logements étudiés.

Concernant les hypothèses d'occupation adoptées dans le modèle, en raison de la complexité liée à la représentation de l'occupation à partir des données recueillies dans la campagne de mesure (types d'activités, apports, gestion des systèmes, charges internes, ouvertures de fenêtre,...) on a décidé de réaliser le calage du modèle en inoccupation (chapitre 5.2) afin d'écartier l'effet de l'occupant. Dans cette première condition d'inoccupation on a utilisé le planning compact, sur lequel on a repéré les dates dans lesquelles l'habitant était absent et on a mis la fraction d'occupation à zéro (cette fraction peut également indiquer la mise en marche/arrêt d'un système). Après avoir réalisé le calage du modèle en inoccupation, dans l'étape de validation du modèle, on a créé un scénario d'occupation. Dans ce scénario, le comportement des usagers, recréé à partir des informations collectées par l'enquête (confrontées aux données mesurées à l'intérieur), a été également intégré à travers le planning compact, mais avec des plannings occupation type (e.g., en semaine, mercredi et weekend), avec des horaires de présence ou absence pondérées en fonction du nombre d'occupants.

Résultats expérimentaux et numériques

Ce chapitre est structuré en cinq sections : (1) évaluation des données mesurées, (2) calage du modèle, (3) validation du modèle, (4) étude d'un scénario en vague de chaleur et enfin (5) une première approche pour évaluer les conditions de confort. D'autre part, deux périodes durant l'été ont été choisies pour analyser les évolutions de température et d'humidité relative à l'intérieur des logements ITI¹ et ITE² : lorsque l'habitant est présent et lorsque l'habitant est absent (périodes de vacances), appelées ci-après en *occupation* et en *inoccupation* respectivement. Le choix des zones pour l'analyse des données a été fait en fonction de l'emplacement. Deux catégories ont été créées pour comparer les données des zones équivalentes des deux logements : les pièces placées dans la zone exposée au rayonnement solaire (enseillées) et les pièces placées à l'opposé, appelées dans le cadre de cette étude zones *exposées* et zones *non-exposées* respectivement. En ITE on distingue une troisième catégorie de zone localisée au comble aménagé, où le comportement thermique est notamment influencé par les gains par rayonnement solaire rentrant par les fenêtres de toit. Dans le but d'étudier l'ensemble des données à partir d'une même base, les données mesurées à l'intérieur des logements, à l'extérieur (station météo) et simulées, sont présentées à des pas temps de l'heure³, dans le fuseau horaire UTC+2.

D'autre part, dans ce chapitre, l'analyse du comportement hygrothermique des logements est réalisée à l'aide de deux sources des données : (i) celles issues des mesures dans chaque zone des logements et de la station météo (utilisées dans le processus de calage et dans la validation du modèle) et (ii) celle obtenues avec le logiciel Météonorm (lequel récrée des conditions représentatives du climat actuel et futur). Ainsi, les données simulées issues des mesures seront appelées par la suite "cas 2014" et les données simulées issues du fichier Meteonorm seront appelés "standard" et "vague de chaleur".

1. Logement avec isolation thermique par l'intérieur
2. Logement avec isolation thermique par l'extérieur
3. Dans les figures C.1 et C.2 sont illustrées des données de température et d'humidité relative dans le salon en ITI (une période en hiver et l'autre en été) à des pas de temps de 10 minutes et de l'heure ; cette dernière calculée à partir de l'équation (4.4). On constate que la courbe à de pas de temps de l'heure est représentative des phénomènes étudiés ci-après

5.1 Données enregistrées

Les données obtenues durant la campagne de mesure de l'année 2014 ont fait l'objet d'une analyse préalable à la construction du modèle sur DesignBuilder et EnergyPlus. Pour les données mesurées exposées ci-après, on distingue les périodes d'occupation et d'inoccupation. Ces périodes ont été repérées grâce aux données de CO_2 mesurées dans le salon de chaque logement. On présente d'abord l'analyse des données en terme de température et ensuite en terme d'humidité relative durant une période de huit jours. Sur ces périodes deux jours sont exposés plus en détail.

5.1.1 Périodes d'occupation et inoccupation

Afin de valider l'enquête auprès de usagers, les données enregistrées dans chaque logement avec le capteur de CO_2 ont permis d'identifier les périodes d'absence en 2014. Dans la figure 5.1 sont exposées les variations de dioxyde de carbone (CO_2) enregistrées dans les deux logements. Si l'on prend t comme étant le temps de mesure de cette grandeur, alors ΔCO_2 correspond à $\text{CO}_2(t) - \text{CO}_2(t-1)$. Ce calcul permet d'identifier les périodes d'absence ou de présence des occupants. Lorsque ΔCO_2 varie très légèrement autour de zéro, on peut supposer qu'il n'y a pas eu d'activités ou de dégagements de CO_2 qui viennent modifier la mesure, i.e, le logement était inoccupé. Au contraire des périodes d'occupation, où les apports de CO_2 se traduisent par des variations entre -1300 ppm et 1000 ppm, tels que constatées dans la figure 5.1. En été la période d'inoccupation correspond à la semaine du 8 au 16 août pour les deux logements. Ces données ont été corrélées à l'enquête réalisée auprès des locataires.

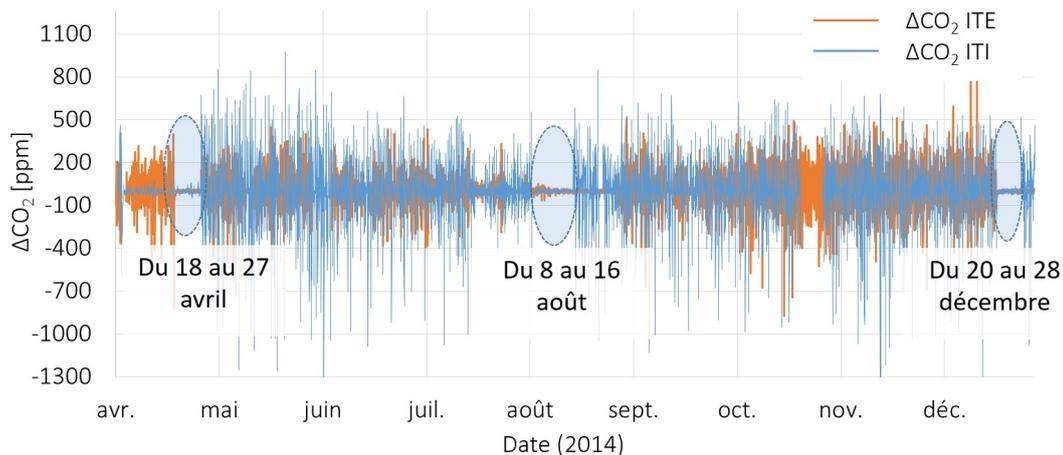


FIGURE 5.1 – Données de dioxyde de carbone (CO_2) en ITI et ITE. Identification des périodes d'inoccupation en été 2014.

5.1.2 Analyse des données enregistrées

Les graphiques de suivi des données enregistrées dans chaque zone des logements permettent de visualiser les évolutions de la température et de l'humidité relative à l'intérieur des pièces au cours des deux périodes choisies (occupation et inoccupation). Cette phase d'analyse a permis de comprendre le comportement hygrothermique des logements pour la construction d'un modèle à l'échelle du bâtiment dans l'outil de simulation adopté.

5.1.2.1 Évolution de la température

Dans la figure 5.2a sont tracées les évolutions de la température extérieure et de la température intérieure pour les deux logements pendant la période d'occupation du 9 au 21 juillet 2014. Dans les premiers jours de la période (du 9 au 12 de juillet) on observe des chutes de températures ponctuelles dans la salle de bain. Cette variation est liée à une régulation des conditions intérieures par l'ouverture manuelle de la fenêtre qui a permis des échanges avec l'extérieur où la température est nettement plus basse qu'à l'intérieur. D'ailleurs, on observe qu'au cours de cette période la température intérieure est bien plus élevée qu'à l'extérieur avec des écarts qui vont jusqu'à 8°C le jour (salon - ITI) et 9,5°C la nuit (Salle de bain - ITE). Bien que durant les journées du 12, 14 et 15 juillet, la température extérieure présente une augmentation (d'environ 18°C à 25°C), les conditions intérieures restent quasi constantes dans les zones non exposées (autour de 24,5°C) avec une légère augmentation dans les zones exposées. Dans le cas de la chambre enfant dans le comble aménagé, les conditions intérieures sont plus impactées par les variations de température à l'extérieur. Par exemple, l'augmentation de température à l'extérieur le 12 juillet (figure 5.3), provoque une augmentation de la température intérieure d'environ 2°C par rapport à la moyenne des jours précédents. Un comportement similaire est observé le 5 août (figure 5.4).

Concernant l'évolution de la température jour/nuit, on constate que pendant la nuit, lorsque la température extérieure décroît, la température intérieure reste constante et supérieure à celle extérieure. Ce comportement est possiblement dû à la combinaison des effets d'accumulation de la chaleur à l'intérieur et des apports internes, aux effets de l'isolation thermique et à un manque d'optimisation de la ventilation naturelle : la chaleur reçue pendant la journée n'est pas complètement évacuée la nuit ou la journée, lorsque la température extérieure est inférieure à celle de l'intérieur. À partir du 16 juillet, on observe une augmentation de la température extérieure avec des valeurs qui vont jusqu'à 36,8°C et des écarts jour-nuit de l'ordre de 12 °C. Pendant cette période on observe une augmentation de la température intérieure accompagnée de fluctuations plus importantes par rapport aux jours précédents. Cependant, à la différence de la période du 9 au 15 juillet, les valeurs de la température de chaque zone se trouvent en-dessous des valeurs extérieures pendant la journée, et légèrement au dessus la nuit (à l'exception de la température le 19 juillet dans la chambre enfant du comble aménagé). Par exemple, les nuits du 18 et 19 juillet la température dans la salle de bain en ITE suit la même évolution (avec des valeurs de température minimale proches) que celle de la température extérieure, grâce aux échanges d'air par ventilation (figure 5.3).

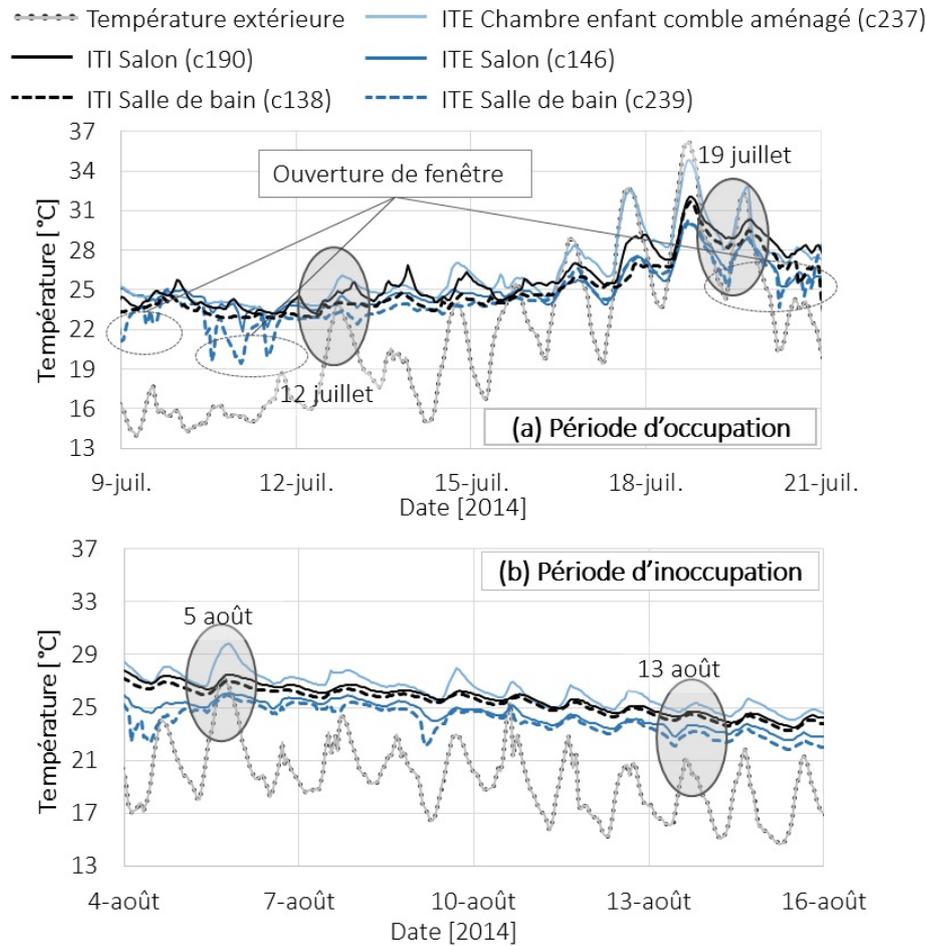


FIGURE 5.2 – Températures enregistrées dans la chambre enfant (comble aménagé avec fenêtres de toit) en ITE, les salles de bain (zone non-exposée), les salons (zone exposée) en ITE et ITI durant les mois de juillet ((a) occupation) et août ((b) inoccupation) 2014.

Concernant la chambre enfant dans le comble aménagé, on constate qu'en occupation la température intérieure atteint les mêmes valeurs que la température extérieure (légèrement inférieure le 16 juillet et légèrement supérieure le 19 juillet). En raison de l'orientation (sud sud-ouest) et de l'inclinaison des fenêtres placées au toit, les apports de chaleur par rayonnement sont très importants. D'autre part, en occupation, les apports internes, la non utilisation des dispositifs de protection solaire, les échanges de chaleur avec le niveau en-dessous font que la température intérieure augmente dans cette zone⁴. Le résultat est une évolution de la température intérieure suivant la même allure que la température extérieure (figure 5.3).

4. Remarque : dans ce cas la ventilation naturelle n'a pas d'intérêt, car les températures extérieures trop élevées durant la journée

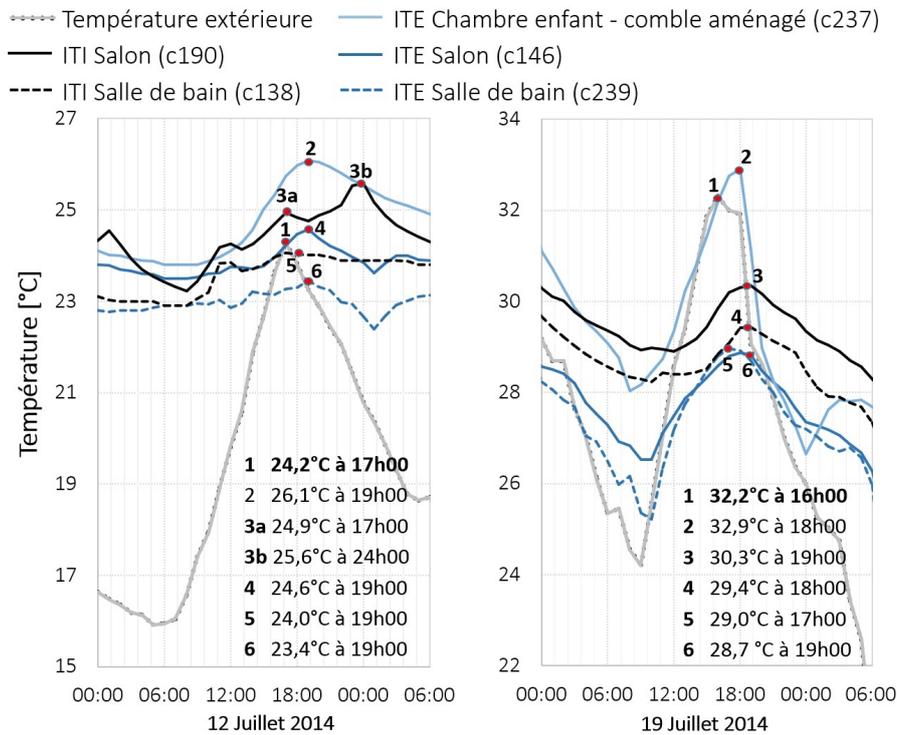


FIGURE 5.3 – Détail des zones identifiées dans la figure 5.2a : températures enregistrées pendant deux jours en occupation : le 12 et 19 juillet 2014

La figure 5.2b montre les évolutions des températures extérieure et intérieure en ITI et ITE pendant la période d'inoccupation du 4 au 16 août 2014⁵. On observe que l'évolution de la température intérieure est plus régulière, avec des fluctuations plus légères qu'en période d'occupation (à l'exception du 8 août dans la salle de bain du logement ITE, où on constate une perturbation). Tout au long de cette période, la température intérieure est supérieure à la température extérieure, avec des températures plus importantes en ITI et dans la chambre enfant au comble aménagé du logement ITE. Comme expliqué précédemment, cette pièce fait partie d'une troisième catégorie de zone où les évolutions de température sont très liées aux apports solaires. Le rayonnement courte longueur d'onde (CLO, rayonnement solaire) entrant à travers la fenêtre de toit atteint les surfaces internes, faisant augmenter leur température; cette chaleur est ensuite transmise aux autres surfaces par rayonnement grandes longueurs d'onde (GLO, domaine des températures ambiantes) et par convection à l'air ambiant. En absence de ventilation naturelle, la chaleur (provenant aussi du niveau inférieur) prend plus de temps à s'évacuer à cause de l'isolation thermique installée en toiture (résistance thermique totale égale à $10,3 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$).

5. Le 4 août le logement ITI est inoccupé et le logement ITE est occupé

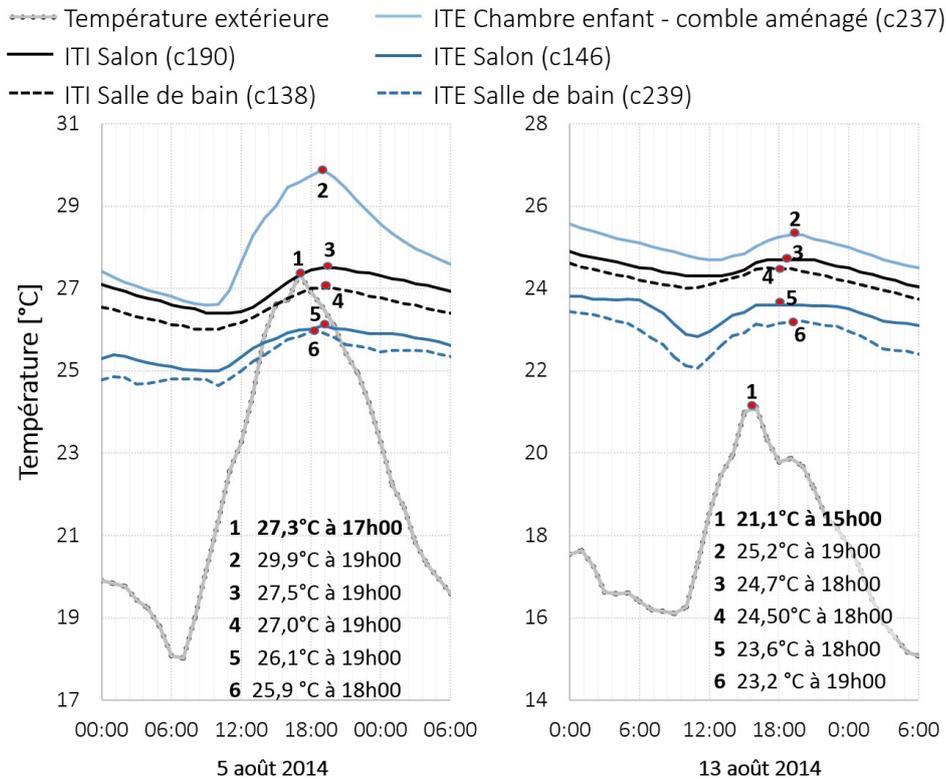


FIGURE 5.4 – Détail des zones identifiées dans la figure 5.2b : températures enregistrées pendant deux jours en inoccupation : le 5 et 13 août 2014

Sur les figures 5.3 et 5.4 sont respectivement exposés les deux jours repérés en période d'occupation et les deux jours en inoccupation (12 juillet, 19 juillet, 5 août et 13 août, figure 5.2). Dans l'ensemble des cas exposés, on constate un déphasage dans la réponse du bâtiment par rapport aux conditions extérieures, i. e., le pic de température extérieure ne se manifeste à l'intérieur qu'après un intervalle de temps. Par exemple, le 19 juillet le pic de température intérieure est enregistré entre 1 (salle de bain en ITE) et 3 (salon en ITI et ITE) heures après le pic extérieur. D'autre part, la température enregistrée dans le salon ITE le 12 juillet présente deux pics, le premier est atteint presque instantanément suite au pic extérieur et le deuxième pic 7 heures après. Ce dernier est possiblement dû à des apports internes. Dans le cas du 13 août, le décalage (entre le pic extérieur et le pic intérieur) peut aller jusqu'à 4 heures. Par ailleurs, un effet d'amortissement est observé le 19 juillet : pour une température journalière de 32,2°C à l'extérieur, la température maximale (des zones exposées et non-exposées, i.e., sans compter la température de la chambre du comble aménagé) est de 30,3°C dans le salon en ITI, de 29,0°C dans le salon ITE, 29,4 °C dans la salle de bain ITI et 28,7°C dans la salle de bain en ITE. Dans le cas du comble aménagé les apports solaires sont nettement plus importants et ont un effet presque instantané sur la température intérieure. Ainsi, sur les données enregistrées, seule une heure de décalage est observée .

5.1.2.2 Évolution de l'humidité relative

Des données d'humidité relative (φ) enregistrées dans les deux logements sont exposées dans les figure 5.5a en période d'occupation⁶ et 5.5b en période d'inoccupation, avec les données de φ enregistrées par la station météo.

L'humidité relative (φ) varie en fonction de l'occupation (nombre d'habitants, métabolisme, activités physiques,...), du taux de renouvellement de l'air (ventilation naturelle ou mécanique), des infiltrations, des sources d'humidité ou apports internes (lave-linge, douches, cuisson de certains aliments, ...), de la production d'humidité (plantes), des échanges de masse entre les composants (meubles, parois) et le volume d'air [Abelé *et al.* 2009]. La variation de φ dépend également de la température de l'air. Par exemple, durant les deux périodes exposées (occupation et inoccupation) on constate qu'en ITE la courbe de φ mesurée dans la chambre enfant du comble aménagé se trouve en-dessous des courbes de φ dans le salon et dans la salle de bain. Cela s'explique, en partie, par l'influence de la température, laquelle est supérieure dans la chambre enfant localisée à l'étage. Cependant, du 09 au 13 juillet, cette hypothèse n'est pas valide car la température dans la chambre enfant est proche de celle dans le salon, tandis que φ reste en-dessous.

Concernant la période d'occupation, on constate d'importantes variations de φ dans la salle de bain des deux logements, liées aux apports d'humidité (douches, lave-linge et sèche-linge), ainsi que par les ouvertures de fenêtres. Ces apports ont une légère influence sur l'évolution de φ dans le salon, mais souvent nulle. Par exemple, en ITI, le 19 juillet des apports d'humidité sont enregistrés à 11h00, 16h00 (à l'instant où φ extérieure se trouve au point le plus bas) et 18h00 dans la salle de bain (figure 5.6). Ces apports font varier φ d'environ 0,54 à 0,68 dans la zone, sans que des variations soient constatées dans le salon (l'augmentation enregistrée vers 10h00 est donc due aux échanges avec l'extérieur). Ce comportement est également constaté le 12 juillet en ITI, où la variation de φ dans le salon se produit environ 2 heures avant l'apport de masse dans la salle de bain (figure 5.6). En effet, comme on peut constater dans le plan (figure 4.3) il existe un espace qui sépare le salon de la salle de bain. Ainsi des échanges importants ne sont possibles que si les deux portes reste ouvertes. L'effet des échanges entre les deux zones peut être observé en période d'inoccupation où l'évolution de φ est très proche dans l'ensemble des zones. D'autre part, durant la période d'occupation, les données de φ permettent d'identifier des actions d'ouverture et de fermeture des fenêtres, par exemple en ITI le 17, 18 et 19 juillet la fenêtre de toit dans la chambre enfant du comble aménagé. Le 10 et le 11 juillet les variations de φ dans la salle de bain sont, dans ce cas, due à l'ouverture de la fenêtre : dans la figure 5.2 on avait constaté des chutes de température durant ces jours qui correspondent à l'augmentation de l'humidité relative sous l'effet des conditions à l'extérieur. D'où l'importance de faire une lecture couplée de la température et de l'humidité relative. Ce cas met en évidence la difficulté qui peut se présenter pour distinguer la cause des évolutions d'humidité relative :

6. Pour la clarté du graphique, les données d'humidité relative (φ) des deux logements sont illustrées séparément en période d'occupation : ITI graphique supérieur, ITE graphique inférieur

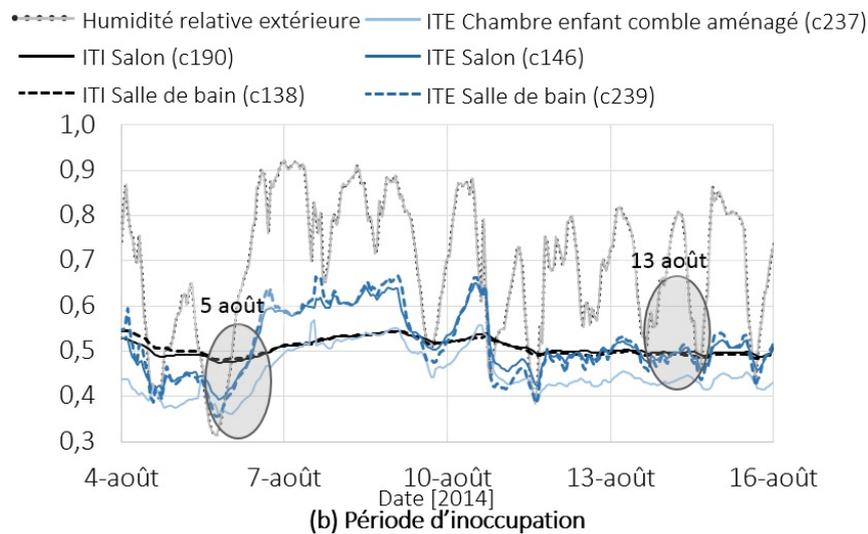
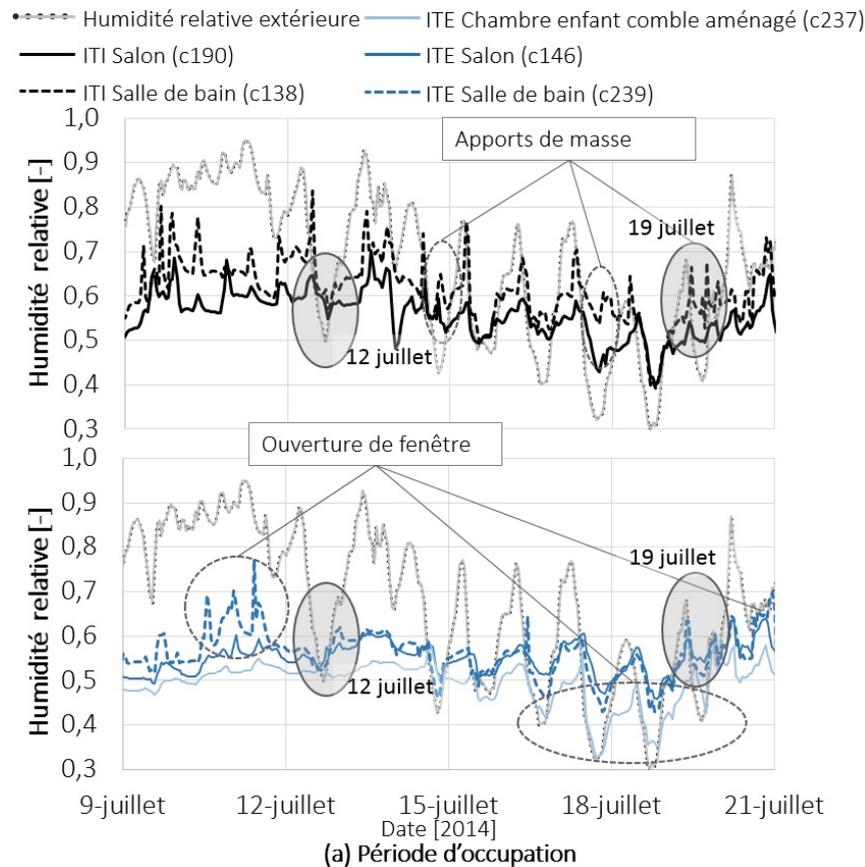


FIGURE 5.5 – Humidités relatives enregistrées dans la chambre enfant (comble aménagé) en ITE, la salle de bain (zone non-exposée), le salon (zone exposée) en ITE et ITI durant les mois de juillet 2014 (a) période d'occupation et août 2014 (b) période d'inoccupation .

ouverture de fenêtre ou apports liées aux douches, lave linge, etc.

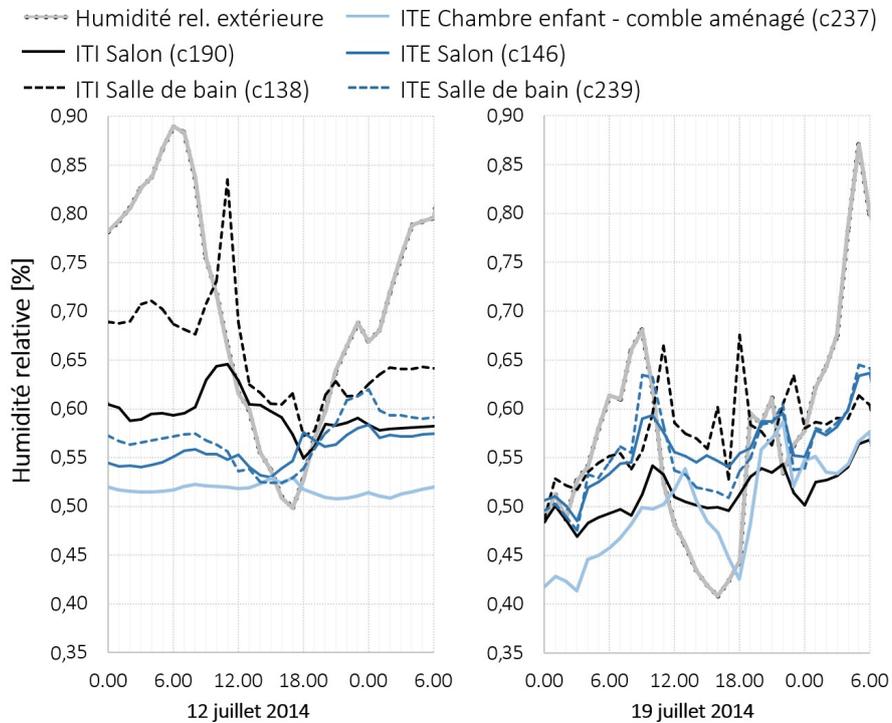


FIGURE 5.6 – Détail des zones identifiées dans la figure 5.2a : humidités relatives enregistrées pendant deux jours en occupation : le 12 et 19 juillet 2014

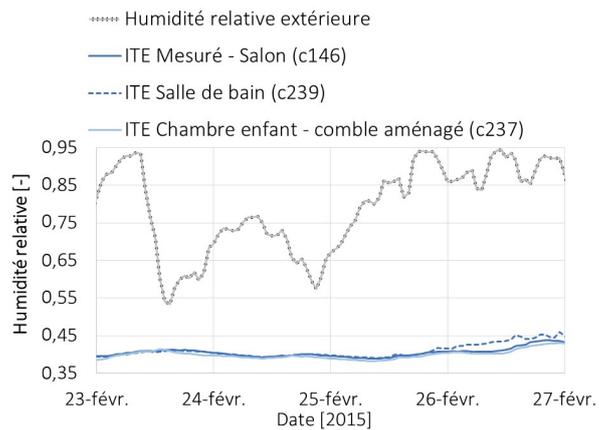


FIGURE 5.7 – Humidités relatives enregistrées en ITE dans le salon, la salle de bain et la chambre enfant (comble aménagé) durant les mois de février 2015, en inoccupation.

Concernant la période d'inoccupation on constate des évolutions de φ différentes dans les deux logements (figure 5.5b) : en ITI (courbes en noir), la variation est très légère en comparaison des variations en ITE (courbes en bleu). En ITE, φ présente des fluctuations plus importantes, avec une atténuation à partir du 11 août. Durant la période étudiée les facteurs mentionnés au départ sont négligés car liés aux effets de l'occupant. Ainsi, seuls les échanges d'air avec l'extérieur par le système de ventilation mécanique, les infiltrations, et les échanges de masse avec les composants (parois et meubles) déterminent l'évolution de φ à l'intérieur. Les parois et meubles ont la capacité d'absorber plus ou moins d'humidité en fonction des propriétés hygroscopiques, amortissant ainsi les variations de φ à l'intérieur des logements. L'évolution de φ en ITE pourrait être le produit des échanges d'air plus importants avec l'extérieur. Ces échanges pourraient provenir d'échanges occasionnés par une ouverture partielle d'une fenêtre ou ouverte sous la pression du vent⁷, car durant les autres périodes d'inoccupation les variations de φ observées sont similaires à celles du logement ITI, tel que l'on observe dans la figure 5.7. Dans la figure 5.8 sont exposés les deux jours repérés dans la figure 5.3b en période d'inoccupation (le 05 et le 13 août). Comme mentionné précédemment, sous l'influence de la température, les valeurs de φ mesurées dans la chambre enfant du comble aménagé sont inférieures à celles mesurées dans le salon et la salle de bain. Concernant l'évolution de φ en ITI, on constate qu'elle reste très proche et quasiment constante autour de 0,50.

5.2 Données simulées : calage du modèle

Après une première évaluation du comportement hygrothermique des logements à travers les données enregistrées dans les zones exposées et non exposées (chapitre 5.1), un modèle à l'échelle du bâtiment a été construit. Le calage et la validation de ce modèle sont effectués en terme de température et d'humidité relative grâce aux données recueillies dans la campagne de mesure. Le modèle a été construit dans l'environnement EnergyPlus (EP, exposé au chapitre 2.3) et l'interface graphique DesignBuilder (DB). Les plans architecturaux, les images prises durant les travaux de rénovation, le dossier des ouvrages exécutés (DOE), l'enquête aux usagers, des échanges avec l'architecte en charge de la rénovation et les informations concernant les bâtiments anciens issues de la littérature ont permis de construire le modèle. L'ajustement des paramètres dans le calage du modèle a été effectué et les résultats de ce processus sont exposés ci-après.

7. Il faut préciser que les fenêtres installées (fenêtres soufflets) dans les logement permettent une ouverture partielle

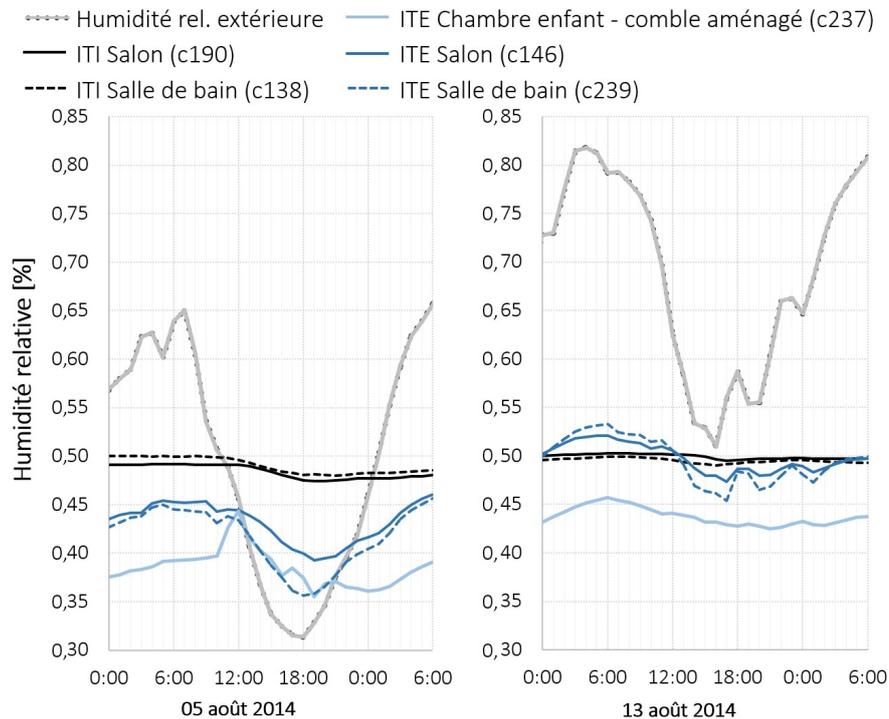


FIGURE 5.8 – Détail des zones identifiées dans la figure 5.2b : humidités relatives enregistrées pendant deux jours en inoccupation : le 5 et 13 août 2014

5.2.1 Méthode et hypothèses du modèle

Comme précisé dans les objectifs de cette thèse, on s'intéresse à l'évaluation du comportement hygrothermique des logements rénovés soumis à des conditions estivales. Le calage du modèle a donc été réalisé en été 2014, pendant les vacances, lorsque les deux logements étaient inoccupés durant la même période. Cette condition a permis d'évaluer la performance du bâtiment en écartant l'impact de l'occupant et des apports internes (e.g. sources de chaleur et de masse générées pendant leurs activités quotidiennes), i. e., seule la réponse du bâtiment (soumis à des conditions extérieures) a été prise en considération dans cette étape. Le scénario d'inoccupation permet ainsi de réduire le nombre de paramètres à ajuster dans le processus de calage du modèle. Bien que l'outil de simulation adopté offre la possibilité de simuler le comportement des usagers à travers des scénarios/planning d'occupation et des fonctions pour le contrôle des ambiances (section 4.3.3), il est très complexe de simuler avec précision le comportement humain. En effet, l'occupant est à l'origine de différentes sources d'incertitude dans la simulation et des écarts non négligeables peuvent être trouvés entre les données simulées et les données mesurées [Vorger 2015]. Dans cette étape de calage du modèle l'effet de l'occupant n'est donc pas étudié ; il le sera cependant abordé dans les sections suivantes de ce chapitre.

D'autre part, dans les hypothèses adoptées, durant la période d'inoccupation, les protec-

tions solaires des fenêtres ont été enlevées et la ventilation naturelle a été négligée. D'autre part, compte tenu des apports liés à l'usage (habitat), lesquels représentent plus de 90% des charges internes, les échanges de masse entre les parois et le volume d'air ont été négligés à l'échelle des logements; ils seront évalués dans les transferts de chaleur et masse (couplés) à l'échelle de la paroi.

5.2.1.1 Processus de calage du modèle

Comme mentionné dans le chapitre 2.5, le calage du modèle est un processus complexe non discriminatoire où des solutions multiples associées à des degrés d'incertitude sont possibles. Dans le cadre de ce projet, le calage du modèle a été réalisé manuellement, suivant les étapes décrites dans la figure 5.9.

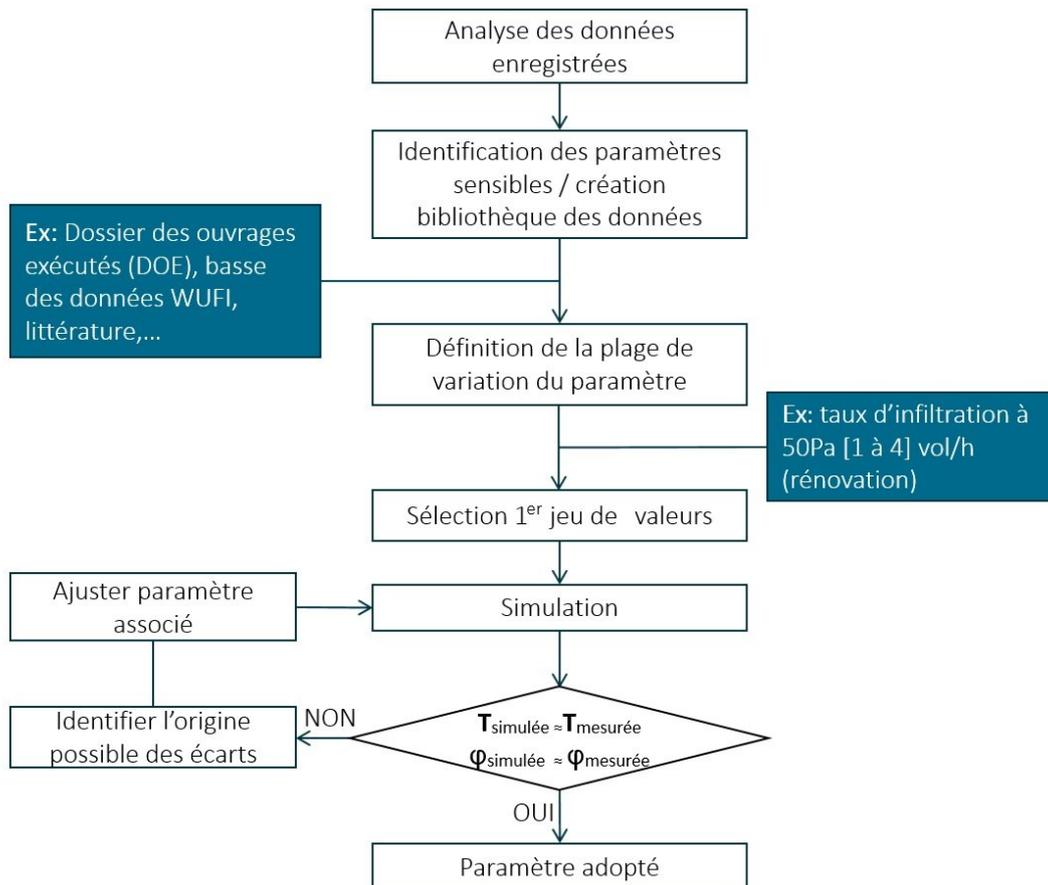


FIGURE 5.9 – Processus manuel de calage du modèle

Le calage du modèle a été effectué à travers une étude paramétrique. Dans ce processus, l'ajustement des paramètres a permis de réduire les écarts entre les données mesurées et

simulées. L'ajustement de paramètres a donc été effectué principalement sur les propriétés de matériaux, le débit de renouvellement d'air, le débit d'air échangé entre les différentes zones, la valeur d'étanchéité à l'air et le coefficient de transmission solaire des surfaces vitrées.

5.2.2 Identification des paramètres sensibles

Le processus de calage du modèle durant la période d'inoccupation a permis d'identifier les paramètres les plus sensibles sur le comportement hygrothermique du bâtiment. Ces paramètres sont principalement liés aux échanges d'air, aux gains solaires et aux propriétés des matériaux :

- *Mélange d'air entre les zones intérieures* : Le modèle physique à l'échelle du bâtiment se base sur un volume d'air représenté par un seul point. L'air est donc homogène dans chaque zone thermique. Les échanges d'air interzones sont représentés par le troisième terme à la droite des équations (2.1) et (2.2). Dans le modèle, cet aspect est paramétré par le volume d'air échangé entre les zones et l'indication du planning d'ouverture/fermeture des portes. Par exemple, lorsque le débit échangé est important, les conditions du volume d'air des zones en contact tendent à s'homogénéiser.
- *Infiltrations* : Ce paramètre a un effet majeur sur le comportement hygrothermique de l'air à l'intérieur du logement, principalement sur l'évolution de l'humidité relative. Concernant les outils de simulation thermique à l'échelle du bâtiment, la plupart d'entre eux adoptent des approches simplifiées pour calculer le débit d'air extérieur entrant par infiltration à travers l'enveloppe. Ce débit est supposé être immédiatement mélangé au volume d'air. Dans le cas d'EP, le modèle retenu calcule le débit d'air échangé par les infiltrations en terme de volume par heure ($\text{Vol}\cdot\text{h}^{-1}$) sous une différence de pression de 50 Pa (unité n50)⁸. Cependant, ce type de calcul engendre des incertitudes dans les résultats [EnergyPlus 2013], particulièrement dans le calcul des évolutions de l'humidité relative. Concernant l'estimation des infiltrations dans les logements, vu que, d'une part, aucune mesure d'étanchéité à l'air n'a été effectuée dans le logements et que, d'autre part, la réglementation thermique ne spécifie pas d'obligation par rapport à l'étanchéité à l'air dans le cas de la rénovation, des débits d'infiltrations observés dans la pratique ont été adoptés. Ces valeurs correspondent à une plage de 1 à 4 $\text{Vol}\cdot\text{h}^{-1}$.
- *Ventilation mécanique contrôlée (VMC)* : Ce paramètre joue aussi un rôle majeur dans le comportement hygrothermique des logements. Le système VMC installé dans les logements est de type hygroréglable, avec des bouches d'entrée auto-réglables (Hygro B). Le débit d'air extrait dans les pièces humides (cuisine, salle de bain et toilettes)

8. n50 est l'unité courante en Europe, cependant, dans l'option infiltrations programmées, quatre unités de calcul de débit d'air par infiltration sont proposées dans l'interface DB. Plus de détails sur <http://www.batisim.net/aide/index.html> (Infiltrations).

est calculé en fonction de l'humidité relative (figure 5.10). Dans le cas du modèle, les valeurs des débits appliqués correspondent à celles données par le fabricant du système installé⁹. Ces données ont été comparées à des valeurs mesurées dans le logement afin de vérifier le fonctionnement du système. L'outil de simulation propose cinq méthodes de calcul : (1) par zone en $\text{Vol}\cdot\text{h}^{-1}$, débit minimum d'air frais (2) par personne, (3) par surface, (4) par la somme par personne + par surface ou (5) le maximum par personne et surface. Cependant, le calcul du débit d'air échangé avec l'extérieur à travers la VMC liée à l'hygrométrie de la pièce ne peut pas être directement renseigné dans l'interface DB. Par ailleurs, concernant la simulation du système de ventilation mécanique, le modèle considère que le flux d'air entrant dans le logement est équivalent à celui qui sort. Ainsi, seul le flux entrant dans le salon et dans les chambres (zones de repos) est indiqué dans le modèle. Le calcul du débit d'air extrait a été intégré dans le fichier IDF d'EP à travers l'application PCMDL développé en interne par MANASLU ing. PCMDL permet de créer une fonction pour la modulation du débit de la ventilation mécanique, lequel est pondéré par pièce d'extraction. Après avoir indiqué le débit à extraire dans la pièce, on ajoute une loi de modulation dans laquelle des points en pourcentage pour le taux d'humidité et les débits minimal et maximal sont indiqués. Dans les logements le débit minimal correspond à $25\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ en ITE et $20\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ en ITI; le débit maximal correspond à $170\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ en ITE et $125\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ en ITI¹⁰.

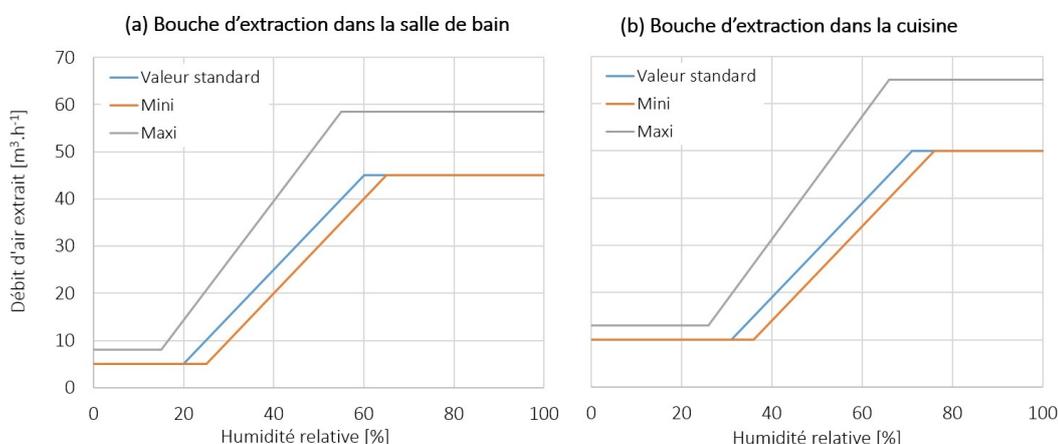


FIGURE 5.10 – Débit bouche d'extraction d'air Minimale, Maximale et standard VMC (source : CSTB Avis Technique 14/13-1909)

— *Propriétés thermiques des matériaux* : Comme mentionné dans le chapitre 1.1 et 4.2, les propriétés thermiques des matériaux existants sont difficiles à évaluer avec

9. Avis Technique 14/13-1909 : Ventilation hygroréglable Bahia, <http://evaluation.cstb.fr/avis-technique/detail/14-13-1909/>

10. La différence dans le débit est liée au nombre de pièce d'extraction d'air dans le logements, ITE compte une salle de bain de plus que ITI

précision, multiples facteurs font, qu'au cours des années, les propriétés initiales sont affectées. Étant donné que les propriétés des matériaux n'étaient pas connues avec précision, une valeur standard a été d'abord assignée et puis ajustée en fonction d'une plage de variation.

- *Propriétés optiques et thermiques des surface vitrées* : Les apports solaires jouent un rôle important dans l'évolution de la température à l'intérieur. Le rayonnement solaire de courte longueur d'onde (CLO) transmis aux surfaces intérieures à travers les surfaces vitrées dépend des propriétés optiques de chaque couche composant la surface vitre (figure 2.2). Le flux de chaleur atteignant une surface intérieure est ensuite transmis au volume d'air par convection et aux autres surface par rayonnement de grande longueur d'onde (GLO). Dans le dossier des ouvrages exécutés (DOE), seules les propriétés thermiques des fenêtres ont été répertoriées avec la valeur de U-value correspondant à $0,9\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (fenêtres triple vitrage). Dans le logiciel les fenêtres sont construites couche par couche avec des vitrages dont les propriétés optiques de transmission lumineuse (TL) et le facteur solaire (FS) variant entre 0,65 et 0,73, et 0,35 et 0,52 respectivement.

5.2.3 Résultats du processus de calage du modèle

Comme exposé au chapitre 4.1, les logements étudiés ont une distribution similaire, cependant la surface du logement avec isolation thermique par l'extérieur (ITE) est supérieure à celle du logement avec isolation thermique par l'intérieur (ITI). Malgré une légère différence dans le volume d'air des zones équivalentes¹¹ (figure 4.3), les résultats des deux logements peuvent être comparés. Afin d'évaluer l'effet de la différence du volume d'air sur la température et l'humidité relative, un test a été effectué. Le test consiste à comparer les résultats de simulation (donc en terme de température et d'humidité relative) du salon en ITI avec le volume réel et les résultats dans le cas où le volume est identique à celui d'ITE (figure 5.11).

On constate que l'effet de la différence de volume dans le salon (le volume dans le salon en ITI est 92,5% celle du salon en ITE, figure 4.3) sur l'évolution de la température est presque nulle, avec un écart de maximum $0,07^\circ\text{C}$. Concernant l'humidité relative cet écart peut atteindre 0,75%. Cette différence dans les résultats peut être négligée. Toutefois, il faut rappeler que le logement ITE possède un comble aménagé avec 2 chambres et une salle de bain (figure 4.3), qui peut affecter le comportement thermique de ce logement.

11. Zones ayant une même fonction

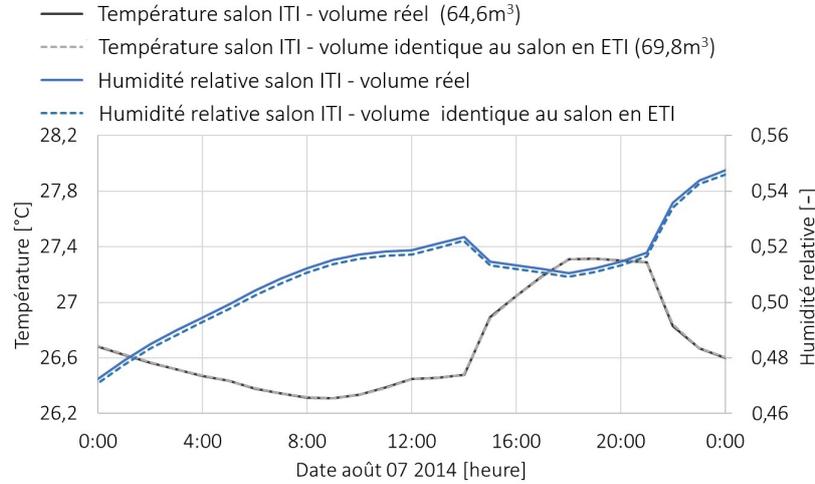


FIGURE 5.11 – Test : effet de la différence du volume d'air (7,5% supérieur en ITE) sur la température et l'humidité relative dans le salon ITI

5.2.3.1 Calage du modèle en terme de température d'air

Comme expliqué dans le chapitre 4.2 les valeurs (standards) des propriétés de matériaux ont été prises de la littérature. Le tableau 5.1 montre les propriétés thermiques des matériaux après calage du modèle pour les deux logements ITE et ITI. Afin d'illustrer les résultats du modèle avec les paramètres ajustés, deux zones ont été choisies en ITI et ITE : le salon (zone exposée au rayonnement solaire) et la salle de bain (non-exposée au rayonnement, située au côté nord) (figure 4.3). Les résultats de zones équivalentes en ITI et ITE peuvent être comparés, car ils sont distribués de manière similaire et la différence de volume d'air n'affecte que très légèrement les résultats, tel que expliqué au chapitre 4.1 et montré dans la figure 5.11.

Tableau 5.1 – Propriétés de matériaux de la façade principale, après calage du modèle

Couches (De l'int. vers ext.)	Conductivité Thermique λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Masse volumique ρ [kg·m ⁻³]	Capacité thermique c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Diffusivité thermique α [m ² ·s ⁻¹]	Composition Façade	
					ITE	ITI
Plâtre	0,600	1380	840	5,1750E-07	✓	✓
Laine minérale	0,038	140	840	3,2313E-07	–	✓
Pierre calcaire	0,870	1680	1100	6,3775E-07	✓	✓
Polystyrène	0,036	35	1400	7,3469E-07	✓	–
Plâtre et chaux	0,670	1650	840	4,8341E-07	✓	✓
Résistance thermique [m²·K·W⁻¹]					6,7	6,6

Dans la figure 5.12 sont représentées les données de température mesurées et simulées du 8 au 16 août 2014 (période inoccupée) pour les deux logements dans les deux types de zones : exposées et non-exposées. Concernant les résultats après calage en ITI, on constate que le

modèle surestime légèrement le comportement thermique des zones exposées (figure 5.12a). Ce comportement est lié aux hypothèses prises sur la protection solaire, laquelle n'a pas été utilisée pendant la période d'occupation. En ITE ce comportement n'est observé qu'à la fin de la période étudiée (le 13, 14 et 15 août). Concernant les zones non-exposées (figure 5.12b), les pics de température simulée sont atténués dans les deux logements, à l'exception des deux dernières journées de la période étudiée, principalement en ITI. Par ailleurs, une chute de température est constatée le 9 août dans la salle de bain en ITE (données mesurées). Une hypothèse est liée à une possible différence de pression (e.g. pression exercée par le vent sur la façade nord) qui a entraîné ponctuellement (et donc difficilement prévisible dans notre modèle) un échange d'air avec l'air extérieur. Lorsqu'on compare les données enregistrées à l'intérieur avec les données de la station météo dans la figure 5.12, on constate que la température extérieure est nettement inférieure à celle de l'intérieure. Concernant la pression on ne dispose pas des données enregistrées près de la façade pour vérifier l'hypothèse.

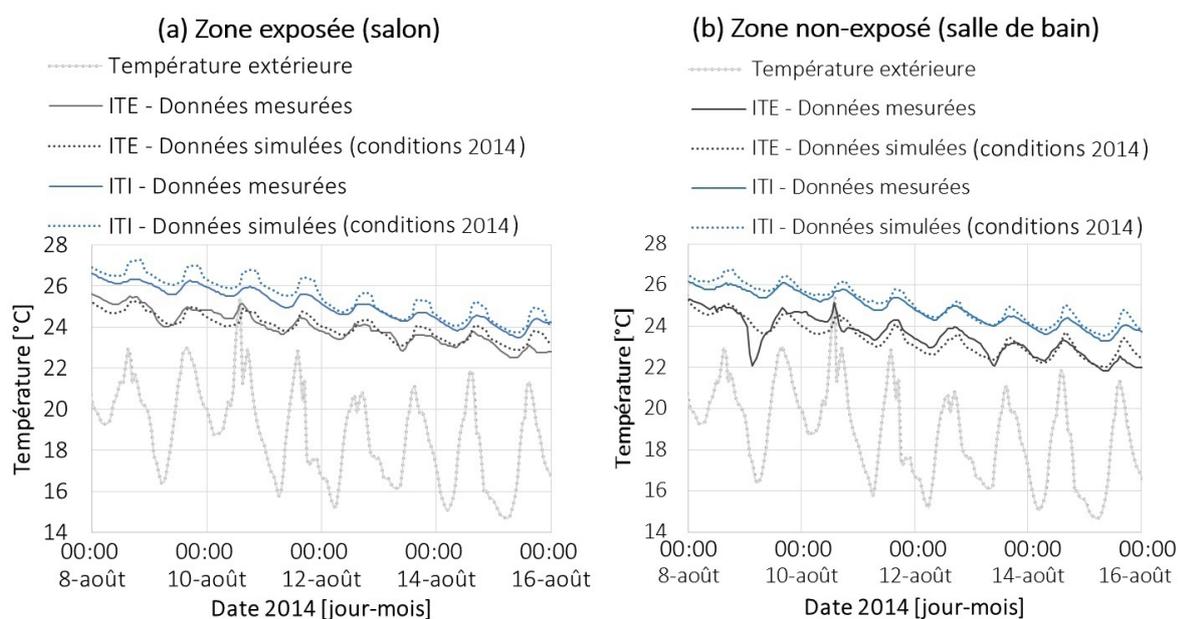


FIGURE 5.12 – Résultats après calage du modèle en terme de température pour le salon et la salle de bain

En ITE (figure 5.13b) la moyenne mesurée et simulée dans le salon est de 24°C (c¹²146), tandis que pour la même zone en ITI (figure 5.13a) la moyenne simulée est légèrement surestimée de $0,4^{\circ}\text{C}$ pour une moyenne mesurée de $25,1^{\circ}\text{C}$ (c190). En ITI, en terme de température, le modèle tend à surestimer les données mesurées : dans la figure 5.13a les valeurs maximales, minimales et moyennes du modèle sont, dans toutes les pièces, supérieures à celles mesurées. Dans le cas d'ITE on constate que les valeurs moyennes sont très proches, les valeurs maximales sont sous-estimées et les minimales surestimées.

12. c : capteur

Cependant, les résultats de l'ensemble des pièces montrent un bon accord par rapport aux données mesurées. Le calcul des valeurs absolues des écarts (équation EAM (4.3)), erreur absolue maximale et minimale, données dans les tableaux 5.2 et 5.3, permettent d'évaluer la précision du modèle par rapport aux données mesurées. Par exemple, si l'on prend l'EAM de la température simulée dans la cuisine en ITE, l'EAM indique que le modèle estime la valeur à $\pm 0,265^\circ\text{C}$. En ITE les EAM varient entre $0,223^\circ\text{C}$ (TR¹³ salon c296) à $0,95^\circ\text{C}$ (chambre enfant c238) et en ITI entre $0,15^\circ\text{C}$ (salle de bain c138) à $0,56^\circ\text{C}$ (chambre enfant c135). On constate que dans le salon le modèle présente une erreur légèrement inférieure en ITE par rapport à ITI et que des écarts importants sont constatés dans la chambre des enfants des deux logements. D'autre part, en ITE les zones non-exposées présentent des erreurs supérieures par rapport aux zones exposées, du fait des hypothèses prise sur les protections solaires.

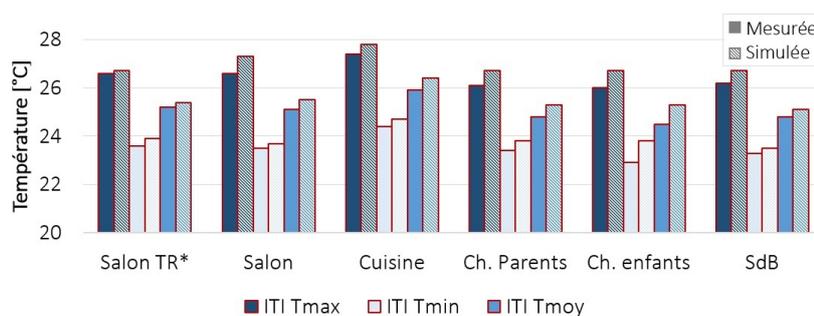
L'erreur qui se génère entre les données du modèle et les données mesurées peut être, en partie, expliquée par les aspects suivants :

- Concernant la mesure, le capteur présente une erreur intrinsèque, auxquelles viennent s'ajouter des incertitudes liées aux hypothèses simplificatrices d'homogénéité dans le volume d'aire. Sachant que les capteurs ont été placés dans chaque pièce de forme discrète chez l'habitant, des incertitudes des mesures sont générées par rapport à leur position. Par exemple, un gradient de température peut se générer entre le sol et le plafond dans une pièce. Ainsi, la température mesurée près du sol, présente une différence par rapport à la température mesurée près du plafond.
- Concernant le modèle, la maîtrise de la totalité des paramètres s'avère très complexe. Certains paramètres présentaient un manque d'information pour les représenter de manière fidèle. Par exemple l'état réel des parois et la valeur exacte des propriétés thermiques. Par ailleurs, des hypothèses simplificatrices appliquées aux simulations à l'échelle du bâtiment, telles que la représentation du volume d'air comme étant homogène, ou certaines singularités de murs (e.g. cavités d'air) induisent une erreur dans les résultats. Un autre exemple est l'erreur induit par la gestion de l'humidité dans la paroi dans le modèle.
- Concernant les données météorologiques du site, bien qu'elles restent cohérentes par rapport aux évolutions des grandeurs mesurées à l'intérieur, elles ont été enregistrées dans une station placée à environ 3 km. Ainsi, l'environnement proche et des conditions liées au microclimat urbain sont négligés. Comme expliqué au chapitre 4.3.2, ce fichier a servi pour reconstituer le fichier météo utilisé dans les simulations. Le fichier météo utilisé dans les simulations est constitué de plus de vingt données, la station utilisée en fournie sept. Certaines informations ont donc dû être complétées, notamment les données de rayonnement. Dans la station météo seul le rayonnement global a été fourni. À partir du fichier Meteororm de Paris, un pourcentage du rayonnement direct

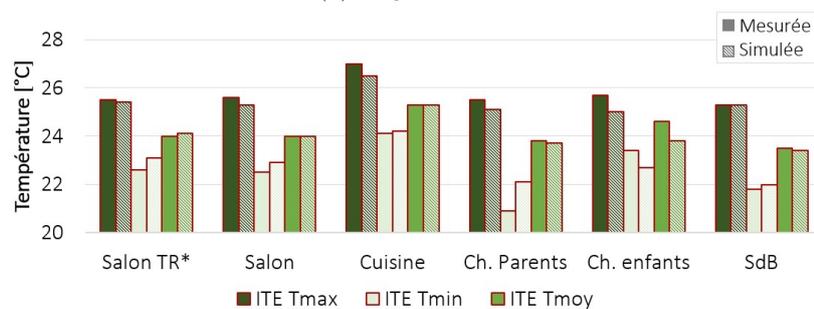
13. Température moyenne de rayonnement TR. Bien que TR_{moy} ne soit pas présentée dans cette section, elle sera utilisée dans le calcul de la température opérative dans le chapitre 5.5

et diffus par rapport au rayonnement global a été calculé et appliqué au rayonnement global enregistré par la station météo (Annexe A).

La combinaison de ces aspects conduit à une accumulation des incertitudes qui peuvent expliquer les écarts entre les deux données.



(a) Logement ITI



(b) Logement ITE

FIGURE 5.13 – Valeurs de température maximales (Tmax), minimales (Tmin) et moyennes (Tmoy) obtenues par simulation et par mesure. Calibration du modèle

Tableau 5.2 – Calage du modèle en ITE en terme de température : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale

Erreurs (ITE)	Unité	TR Salon (c296)	Salon (c146)	Cuisine (c136)	Ch. parents (c141)	Ch. enfants (c238)	SdB (c239)
EAM ^(a)	°C	0,226	0,223	0,2650	0,5470	0,950	0,444
EA _{MIN} ^(b)	°C	0,004	0,003	0,002	0,007	0,34	0,001
EA _{MAX} ^(c)	°C	0,817	0,7032	0,7154	1,547	1,547	1,688

Tableau 5.3 – Calage du modèle en ITI en terme de température : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale

Erreurs (ITI)	Unité	TR Salon (c235)	Salon (c190)	Cuisine (c139)	Ch. parents (c137)	Ch. enfants (c135)	SdB (c138)
EAM ^(a)	°C	0,202	0,246	0,208	0,264	0,565	0,150
EA _{MIN} ^(b)	°C	0,001	0,001	0,004	0,002	0,14	0,003
EA _{MAX} ^(c)	°C	0,420	0,704	0,532	0,831	1,083	0,708

Si l'on compare les données de température simulées et mesurées des deux logements, on constate qu'en été dans les zones exposées (figure 5.12a) l'écart de température atteint jusqu'à 1,7°C (09 août à 07h00 dans le salon), avec des températures supérieures en ITI par rapport à ITE. Ce comportement est lié aux propriétés thermiques des murs, particulièrement la chaleur spécifique de la pierre calcaire qui se trouve en contact direct avec le volume d'air en ITE. Ce matériau a la capacité d'emmagasiner des flux importants de chaleur (qui viennent des apports solaires) restituée lorsque la température dans le volume d'air environnant chute. Concernant les zones non-exposées (figure 5.12(b)), on constate que la température en ITI suit une évolution similaire aux zones exposées : $T_{ITI} > T_{ITE}$. Ce comportement est dû à d'importants débits d'air échangés entre les deux types de zones, lorsque que les portes sont maintenues ouvertes (chapitre 5.2.2).

5.2.3.2 Calage du modèle en terme d'humidité relative dans l'air

Dans la simulation de l'humidité à l'échelle des logements, seules les charges latentes internes, les flux par mélange d'air avec les autres zones, le flux par infiltration et le flux provenant des systèmes ont été pris en compte (équation (2.2)). Le terme représentant les échanges de masse entre les parois (et les composants) et le volume d'air a été négligé ; il sera évalué dans la partie III consacrée à la modélisation des transferts de chaleur et de masse à travers l'enveloppe. Les résultats des simulations à l'échelle du bâtiment serviront de données d'entrée du modèle à l'échelle de la paroi (chapitre 8).

Concernant les résultats du calage du modèle vis-à-vis de l'humidité (figure 5.14), on constate des écarts plus importants par rapport aux données de température. Ces écarts ont été, en partie, engendrés par les hypothèses adoptées concernant les échanges entre les parois et l'air environnant. Cependant, d'autres facteurs sur lesquels il n'y avait pas d'informations précises, telles que la valeur du débit par infiltrations, peuvent être à l'origine de ces écarts. D'autre part, le débit d'air échangé avec l'extérieur à travers la VMC a été attribué en fonction de φ (chapitre 5.2.2, section VMC). Durant la période d'inoccupation, en absence de sources d'humidité provenant de l'occupant ou de leurs activités, le débit d'air diminue, limitant ainsi les échanges avec l'extérieur. Dans la figure 5.14 on observe qu'en ITI les données simulées ont un comportement plus fluctuant par rapport aux données mesurées. Pendant les premiers jours de la période de calage, le modèle surestime la valeur mesurée, puis la valeur décroît en dessous de la courbe des données mesurées. Ce comportement est observé dans les deux types de zones (exposées et non-exposées). Dans

le modèle, la variation de l'humidité relative n'est pas amortie par les échanges de masse entre les composants et le volume d'air, d'où ce comportement fluctuant. Concernant la diminution de φ en-dessous de la courbe mesurée à partir du 11 août, cela s'explique par l'effet de la variation de l'humidité relative extérieure qui décroît à partir de cette date et qui influence le comportement de φ à l'intérieur des deux logements. Dans le cas d'ITE, l'humidité relative simulée suit un comportement proche de celle mesurée. Cependant dans le cas des données simulées dans le salon, des écarts sont constatés du 11 au 16 août, contrairement aux données simulées dans la salle de bain (SdB). Ce comportement est influencé par la configuration concernant les échanges d'air par infiltration. La figure 5.15 montre les valeurs minimales, maximales et moyennes pour chaque zone en ITI et ITE; et les tableaux 5.4 et 5.5 montrent les erreurs absolues moyennes, maximales et minimales trouvées en ITE et ITI. Malgré une augmentation de l'erreur dans le calage du modèle en terme d'humidité relative, les données simulées sont représentatives des conditions intérieures.

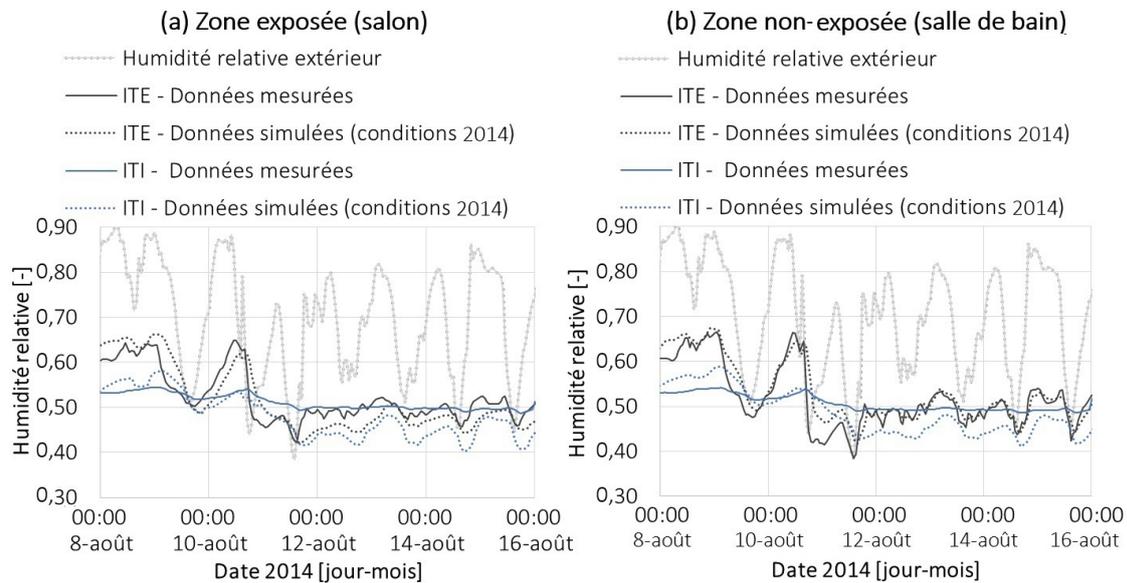


FIGURE 5.14 – Résultats après calage du modèle en terme d'humidité relative pour le salon et la salle de bain

Tableau 5.4 – Calage du modèle en ITE en terme d'humidité relative : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts; (b) Erreur absolue minimale; (c) Erreur absolue maximale

Erreurs (ITE)	Unité	Salon (c146)	Cuisine (c136)	Ch. parents (c141)	Ch. enfants (c238)	SdB (c239)
EAM ^(a)	-	0,024	0,035	0,039	0,042	0,019
EA _{MIN} ^(b)	-	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0000
EA _{MAX} ^(c)	-	0,084	0,147	0,143	0,146	0,099

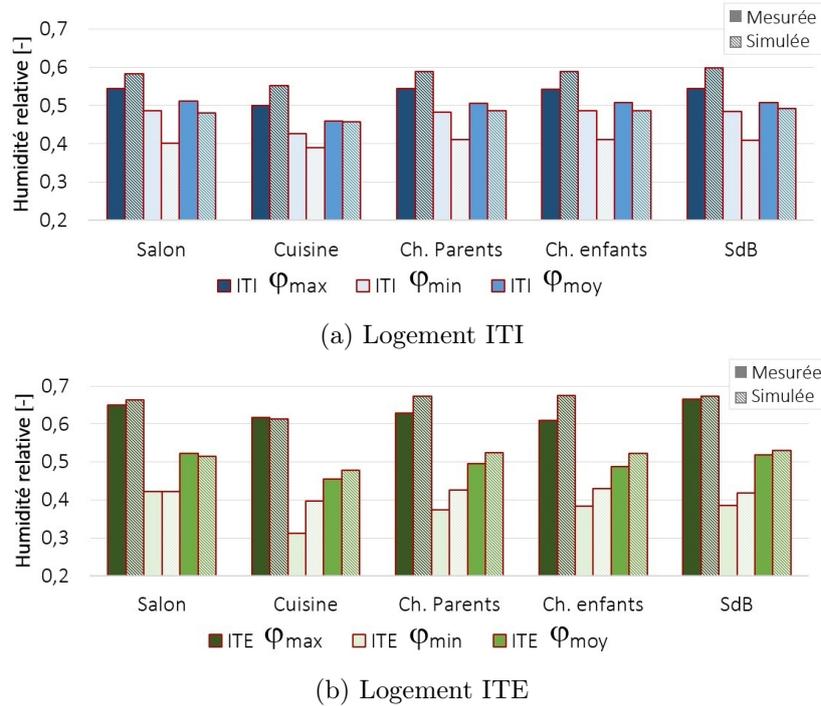


FIGURE 5.15 – Valeurs d’humidité relative maximales (φ_{\max}), minimales (φ_{\min}) et moyennes (φ_{moy}) obtenues par simulation et par mesure. Calage du modèle

Tableau 5.5 – Calage du modèle en ITI en terme d’humidité relative : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale

Erreurs (ITI)	Unité	Salon (c569)	Cuisine (c139)	Ch. parents (c137)	Ch. enfant (c135)	SdB (c138)
$EAM^{(a)}$	-	0,038	0,026	0,031	0,034	0,032
$EA_{MIN}^{(b)}$	-	0,008	0,001	0,000	0,001	0,000
$EA_{MAX}^{(c)}$	-	0,084	0,082	0,070	0,071	0,071

5.3 Validation du modèle

La validation est le processus dans lequel on confirme que les sorties du modèle représentent adéquatement les valeurs physiques mesurées par rapport à la température et à l’humidité relative. La validation permet de tester la fiabilité du modèle à prédire le comportement hygrothermique des logements. Une fois le modèle validé, d’autres scénarios (occupation, conditions, configurations de parois, ...) peuvent être simulés et étudiés.

5.3.1 En inoccupation

Dans cette première étape de validation du modèle, une période de 10 jours (différente de celle choisie pour le calage) a été choisie suivant les conditions suivantes : logements en inoccupation et soumis à des conditions estivales. En ITI cette période correspond aux jours compris entre le 3 et le 13 août 2015, et en ITE la période de validation est comprise entre le 11 et le 21 août 2015.

5.3.1.1 Validation du modèle en terme de température d'air

Dans les figures 5.16 et 5.17 sont exposés les résultats de la validation du modèle en terme de température pour les deux logements. Dans le cas du logement avec isolation thermique par l'extérieur (ITE) on constate un bon accord entre les données mesurées et simulées pour les deux types de zones (exposées et non-exposées), tel que montré dans la figure 5.18. Concernant les résultats dans le logement avec isolation thermique par l'intérieur (ITI), on constate que le modèle surestime légèrement le comportement thermique de celui-ci, particulièrement dans le salon et dans les zones non-exposées. Par conséquent, dans le modèle les erreurs trouvées en ITI sont supérieures par rapport aux erreurs trouvées en ITE dans l'étape de validation, et supérieures à celles trouvées dans l'étape de calage. Ces résultats pourraient être expliqués par les hypothèses prises sur le flux solaire et les protections aux fenêtres, lesquels ont été conservés dans l'étape de validation. En ITE les erreurs minimale et maximale trouvées sont de $T_{moy} 27,1 \pm 0,29^\circ\text{C}$ dans la cuisine et de $TR_{moy} 25,4 \pm 0,88^\circ\text{C}$ dans le salon (données simulées). Dans ce logement on constate aussi une augmentation de l'erreur absolue par rapport à celle trouvée dans le calage du modèle (tableaux 5.6 et 5.7). Concernant les résultats de validation en ITI, l'erreur moyenne absolue la plus importante a été trouvée dans la chambre enfant ($26,5 \pm 0,94^\circ\text{C}$) et la plus basse dans la cuisine ($28,7 \pm 0,68^\circ\text{C}$). L'augmentation de l'écart en ITI pourrait s'expliquer par les hypothèses prises sur les échanges d'air avec l'extérieur, étant donnée que le modèle utilisé dans la validation conserve le même réglage que celui du calage. En effet, si l'on croise les données d'humidité relative mesurée dans la période du calage et celle de la validation, on constate que des fluctuations plus importantes se sont produites dans cette dernière. Dans le processus de calage du modèle la ventilation naturelle était nulle et la ventilation mécanique, étant fonction de l'humidité relative, a été simulée dans les deux périodes (de calage et de validation) avec un débit réduit (en absence des sources d'humidité provenant de l'occupation). Par conséquent, la chaleur gagnée par rayonnement a fait augmenter la température de l'air sans que celle-ci ait le temps de s'évacuer. Une accumulation de la chaleur est alors observée dans le modèle pendant la période de validation. D'ailleurs les données enregistrées en ITI sont supérieures aux données enregistrées en ITE dans des zones équivalentes, avec des écarts qui peuvent atteindre $1,6^\circ\text{C}$ en moyenne (cuisine).

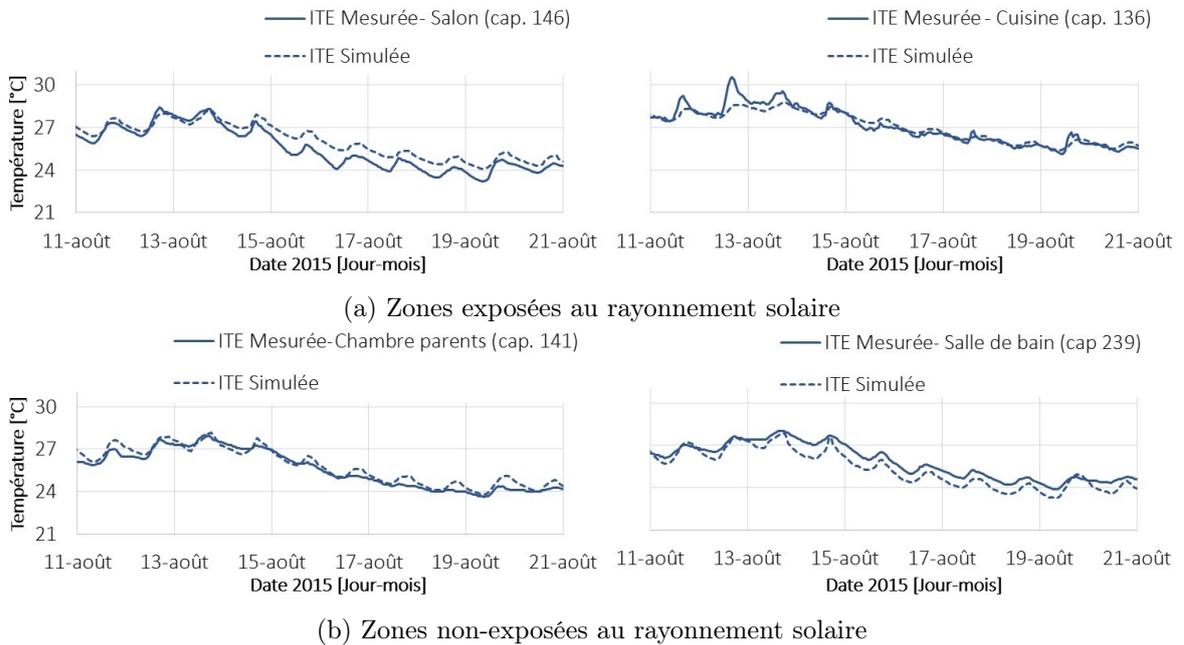


FIGURE 5.16 – Validation du modèle en terme de température dans le logement avec de l'isolation thermique par l'extérieur (ITE)

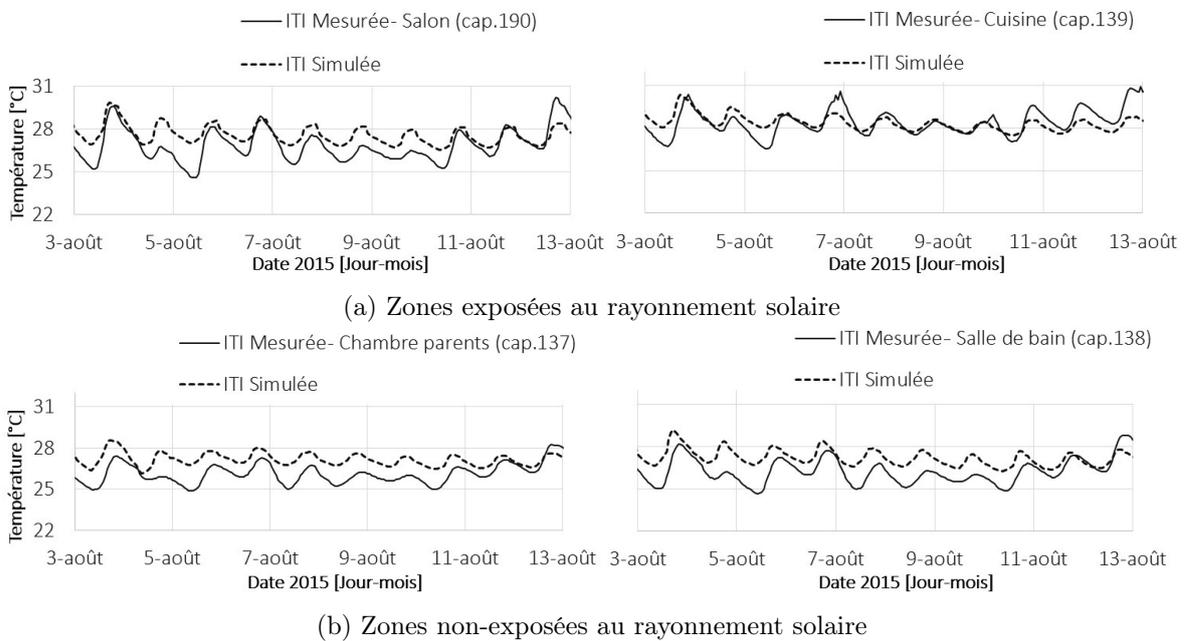


FIGURE 5.17 – Validation du modèle en terme de température dans le logement avec de l'isolation thermique par l'intérieur (ITI)



FIGURE 5.18 – Valeurs de température maximales (Tmax), minimales (Tmin) et moyennes (Tmoy) obtenues par simulation et par mesure. Validation du modèle

Tableau 5.6 – Validation du modèle en ITE en terme de température : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale

Erreurs (ITE)	Unité	TR Salon (c235)	Salon (c569)	Cuisine (c139)	Ch. parents (c137)	Ch. enfants (c135)	SdB (c138)
EAM ^(a)	°C	0,886	0,613	0,287	0,309	0,685	0,532
EA _{MIN} ^(b)	°C	0,006	0,032	0,003	0,081	0,001	0,011
EA _{MAX} ^(c)	°C	2,058	1,39	2,050	0,950	1,295	1,065

Tableau 5.7 – Validation du modèle en ITI en terme de température : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale

Erreurs (ITI)	Unité	TR Salon (c235)	Salon (c569)	Cuisine (c139)	Ch. parents (c137)	Ch. enfants (c135)	SdB (c138)
EAM ^(a)	°C	0,876	0,751	0,680	0,836	0,938	0,852
EA _{MIN} ^(b)	°C	0,024	0,002	0,003	0,012	0,002	0,009
EA _{MAX} ^(c)	°C	2,209	1,845	2,290	1,770	2,077	1,942

5.3.1.2 Validation du modèle en terme d'humidité relative dans l'air

Dans les figures 5.19a à 5.20b sont exposés les résultats en terme d'humidité relative dans le logement ITI et ITE respectivement. Durant les périodes choisies pour les deux logements, les simulations ont donc été effectuées sans l'effet des occupants et en négligeant les échanges de masse entre les parois, les meubles et le volume d'air. En terme d'humidité relative on constate que les données mesurées en ITI présentent des fluctuations plus importantes par rapport à la période de calibration. Comme il a été exposé dans le chapitre 5.2.3, des échanges d'air avec l'extérieur ont dû probablement se produire par un effet de pression qui a engendré un débit plus important par le système de ventilation ou les infiltrations, déterminant ainsi les évolutions de φ dans ce logement. Un comportement similaire est observé en ITE, toutefois, l'amplitude de la variation est légèrement supérieure qu'en ITI. En ITE, l'humidité relative varie (dans les zones exposées et non-exposées) entre 0,30 et 0,60 tandis qu'en ITI φ varie entre 0,37 et 0,51 (à l'exception du 4 août).

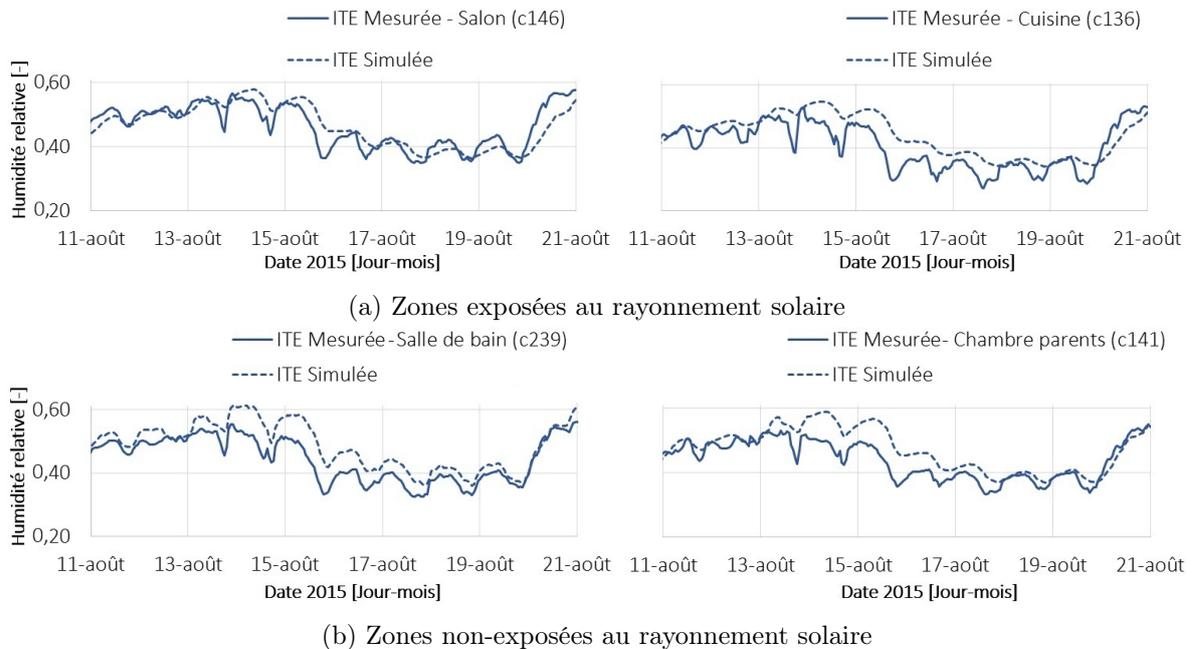


FIGURE 5.19 – Validation du modèle en terme d'humidité relative dans le logement avec de l'isolation thermique par l'extérieur (ITE)

Dans les figures 5.21a et 5.21b sont illustrées les valeurs maximales, minimales et moyennes des données simulées et mesurées dans chacune des zones des logements en terme d'humidité relative (φ). On constate que dans le logement avec ITI, les valeurs moyennes simulées et mesurées restent proches dans l'ensemble de zones (avec une légère surestimation de la moyenne de φ dans la cuisine, comme vérifié dans les figures 5.20a et 5.20b). En revanche, dans le logement avec ITE on constate que le modèle a tendance à surestimer la valeur de φ (par rapport à la valeur mesurée) : entre le 13 et le 17 août la courbe simulée dans la cuisine, la salle de bain et la chambre des parents se trouve au dessus de la courbe mesurée (l'écart maximale est dans ce cas de 0,161 trouvé dans la cuisine, tableau 5.8). Ces écarts pourraient être expliqués par les échanges d'air inter-zones. En effet, durant le calage du modèle, les portes internes ont été simulées ouvertes. Cette hypothèse à été également appliquée dans la validation du modèle. Ainsi la valeur de φ dans le salon a un effet non négligeable sur l'évolution de φ dans les autres zones, faisant augmenter sa valeur.¹⁴

Tableau 5.8 – Validation du modèle en ITE en terme d'humidité relative : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale

Erreurs (ITE)	Unité	Salon (c569)	Cuisine (c139)	Ch. parents (c137)	Cha. enfant (c135)	SdB (c138)
EAM ^(a)	-	0,029	0,044	0,037	0,032	0,042
EA _{MIN} ^(b)	-	0,001	0,008	0,001	0,001	0,004
EA _{MAX} ^(c)	-	0,108	0,161	0,114	0,129	0,114

Tableau 5.9 – Validation du modèle en ITI en terme d'humidité relative : (a) Erreur absolue moyenne ou valeur absolue des écarts ; (b) Erreur absolue minimale ; (c) Erreur absolue maximale

Erreurs (ITI)	Unité	Salon (c569)	Cuisine (c139)	Ch. parents (c137)	Ch. enfants (c135)	SdB (c138)
EAM ^(a)	-	0,032	0,058	0,033	0,038	0,034
EA _{MIN} ^(b)	-	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
EA _{MAX} ^(c)	-	0,104	0,137	0,106	0,103	0,110

14. Remarque : l'évolution en terme de température reste en bon accord en ITE, et avec une surestimation dans le logement avec ITI.

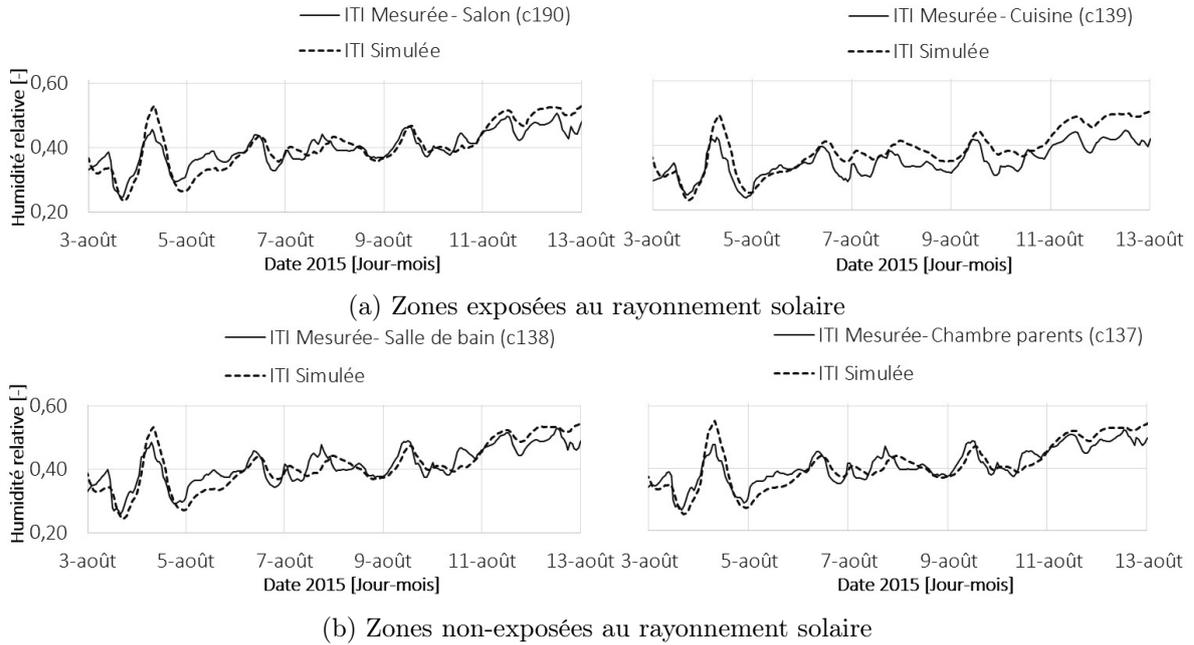


FIGURE 5.20 – Validation du modèle en terme d'humidité relative dans le logement avec de l'isolation thermique par l'intérieur (ITI)

Dans le processus de validation, on a constaté que le modèle présente des erreurs légèrement supérieurs à ceux trouvés dans l'étape du calage ; cependant les évolutions restent assez proches en terme de température et d'humidité relative, validant ainsi le modèle.

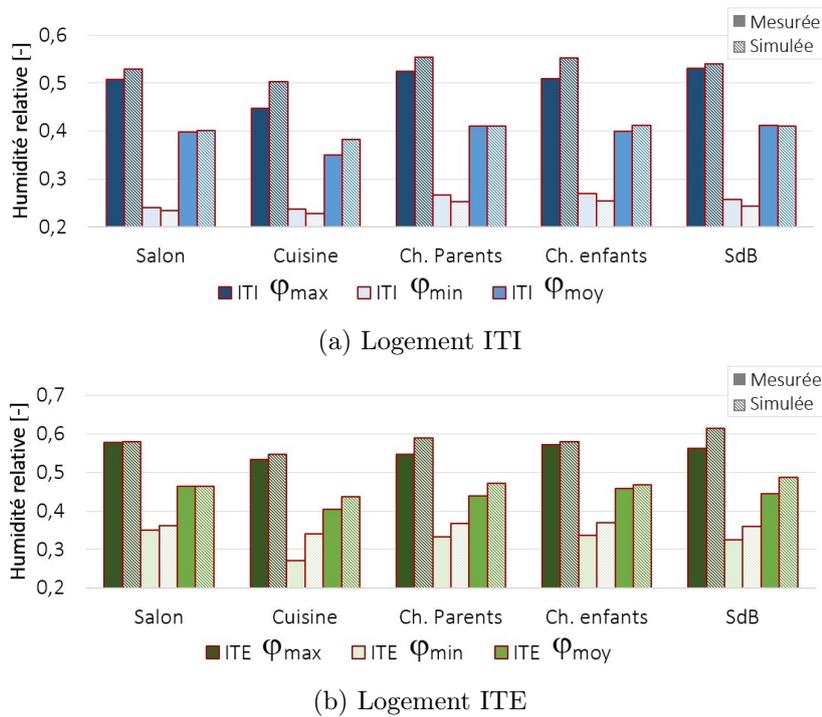


FIGURE 5.21 – Valeurs d’humidité relative maximales (φ_{\max}), minimales (φ_{\min}) et moyennes (φ_{moy}) obtenues par simulation et par mesure. Validation du modèle

5.3.2 En occupation

Dans l’étape de calage du modèle réalisé au chapitre 5.2, la période choisie pour effectuer l’ajustement des paramètres correspond à une période d’inoccupation des logements durant l’été 2014. Cette condition permet d’écarter l’effet de l’occupant afin d’étudier la réponse du bâtiment soumis à des conditions estivales. Toutefois, les simulations, réalisées au cours de l’année et donc avec des périodes d’occupation, intègrent des plannings d’occupation recréés à partir des enquêtes et de la lecture des données de CO_2 enregistrées dans le salon (ce capteur a permis de repérer les périodes d’occupation/inoccupation durant l’année 2014 et 2015). D’autre part, vue la difficulté à recréer avec précision l’occupation de chaque logement, les plannings ont été intégrés de manière à représenter les charges générées par la présence humaine dans des jours types, i.e., de manière globale. Ainsi, pour chaque logement la densité d’occupation (personnes/m²) a été indiquée et des plannings type compact ont été construits¹⁵. Dans les figures 5.22a et 5.22b (ITE) on remarque des chutes de température enregistrées le 5 septembre dans la cuisine et le 6 septembre dans la salle de bain, possiblement occasionnées par l’ouverture d’une fenêtre. Concernant l’humidité relative, on constate que la courbe de φ enregistrée présente un comportement désordonné, avec des oscillations locales de la grandeur, comme par exemple le 6 septembre (figures 5.24a et 5.24b). Dans ce cas, les différences entre la valeur simulée et mesurée sont significatives, bien que la courbe

15. Les dates d’occupation pour ITI et ITE ont été choisi dans l’année 2015 durant la période d’été

obtenue par le modèle suit une allure similaire à la courbe mesurée. Dans le cas du logement ITI, le modèle simule de manière plus proche le comportement des zones du point de vue hygrique que dans le cas du logement ITE (figures 5.25a et 5.25b). En l'absence de données exactes sur le comportement des locataires, il s'avère très complexe de simuler ce type de conditions. Le fait de négliger l'occupation et les activités spontanées, des écarts importants entre les données simulées et enregistrées apparaissent. Malgré ce constat, le modèle suit des évolutions cohérentes par rapport aux données enregistrées. Concernant les résultats des données simulées en ITI, ils montrent un bon accord par rapport aux données enregistrées en terme de température (figure 5.23)

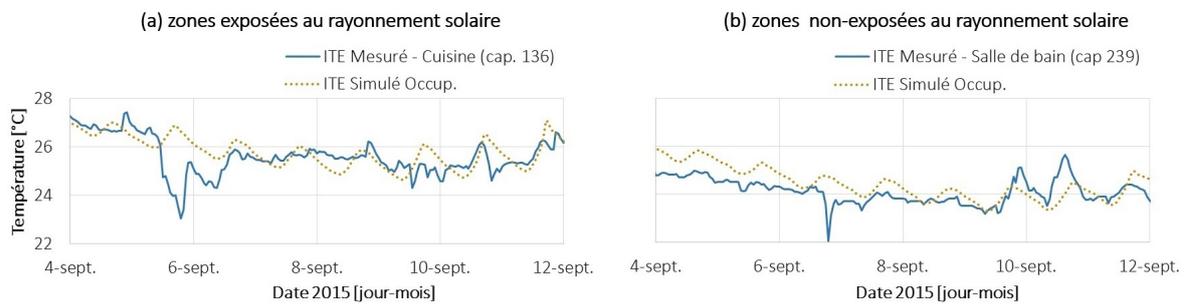


FIGURE 5.22 – Validation du modèle en occupation ITE : Température dans une zone exposée et une zone non-exposée au rayonnement solaire : Cuisine et salle de bain

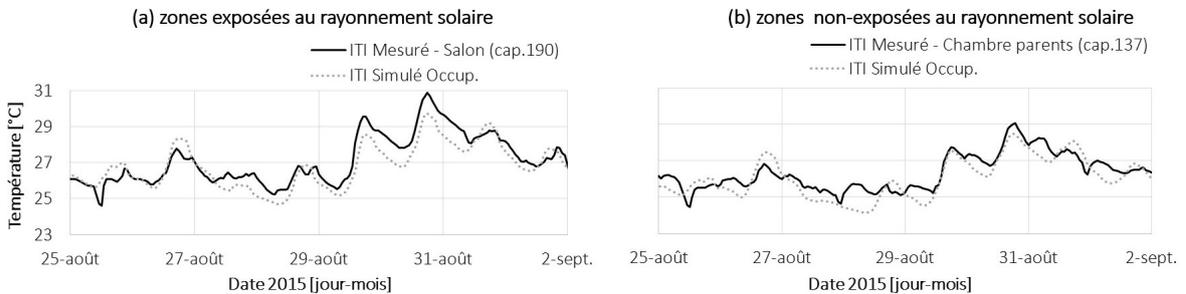


FIGURE 5.23 – Validation du modèle en occupation ITI : Température dans une zone exposée et une zone non-exposée au rayonnement solaire : salon et chambre des parents

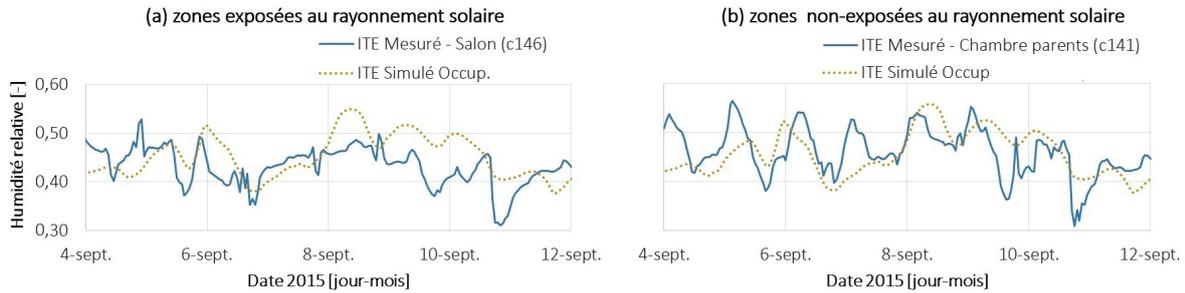


FIGURE 5.24 – Validation du modèle en occupation ITE : Humidité relative dans une zone exposée et une zone non-exposée au rayonnement solaire : salon et chambre des parents

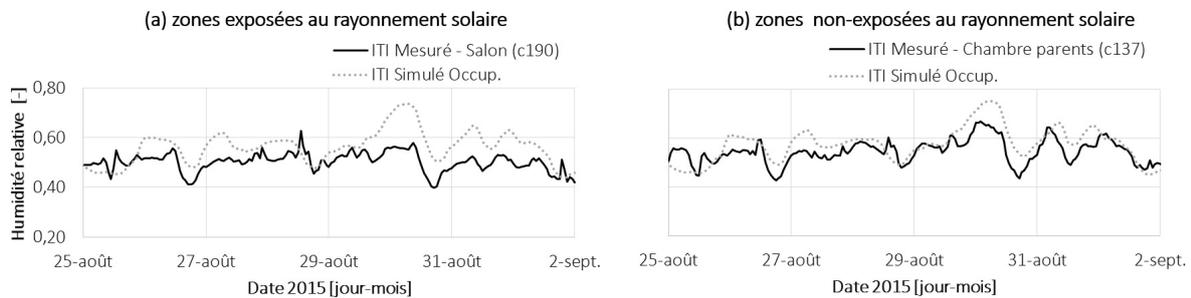


FIGURE 5.25 – Validation du modèle en occupation ITI : Humidité relative dans une zone exposée et une zone non-exposée au rayonnement solaire : salon et chambre des parents

5.3.3 Hypothèses d'occupation : effet de l'occupant

Dans cette section, des hypothèses d'occupation ont été intégrées à la période d'occupation. Cette dernière étape de la validation du modèle permet d'évaluer l'impact des apports de chaleur générés par l'occupant. Comme souligné par [Vorger 2015], les hypothèses prises sur l'occupation sont à l'origine de sources d'incertitude entre le modèle et les valeurs mesurées. En rénovation (ou bâtiments performants) cet aspect prend une autre dimension, car le bâtiment devient très sensible aux conditions d'inconfort de par sa forte isolation thermique. Des apports de chaleur liés à l'occupation ont alors un impact significatif sur les conditions intérieures. Dans les figures 5.26 et 5.27 on constate : (i) que, sous l'action de l'occupant, la température mesurée en période d'occupation présente des oscillations locales (particulièrement dans le logement ITE) ; (ii) en période d'inoccupation la courbe est plus régulière avec des variations cycliques (jour/nuit) déterminées par les conditions extérieures ; (iii) l'occupant est à l'origine d'importantes sources de chaleur (l'écart entre les données simulées en inoccupation et les données avec l'hypothèse d'occupation peut atteindre 2,2°C). Dans les outils STD, les variations instantanées générées par l'occupant, sont difficiles à prendre en considération. Le modèle garde une certaine inertie qui tend à lisser l'évolution de la grandeur.

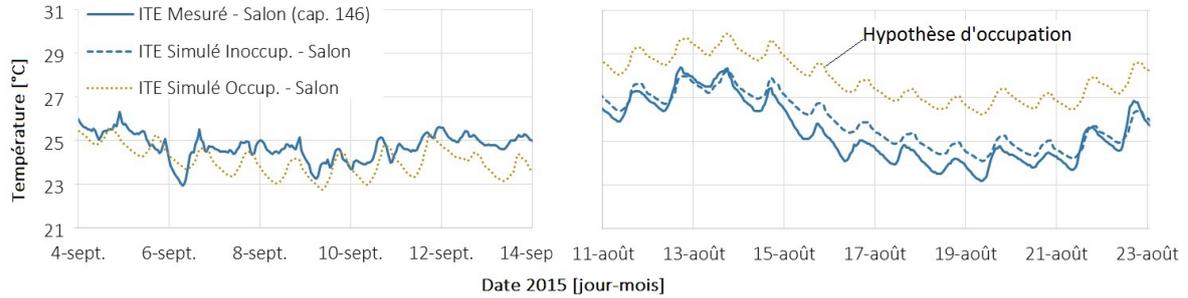


FIGURE 5.26 – Température mesurée et simulée en période d’occupation (gauche) et d’inoccupation (droite) avec des hypothèses de l’occupation (courbe jeune pointillée) : évaluation de l’effet d’occupant en ITE

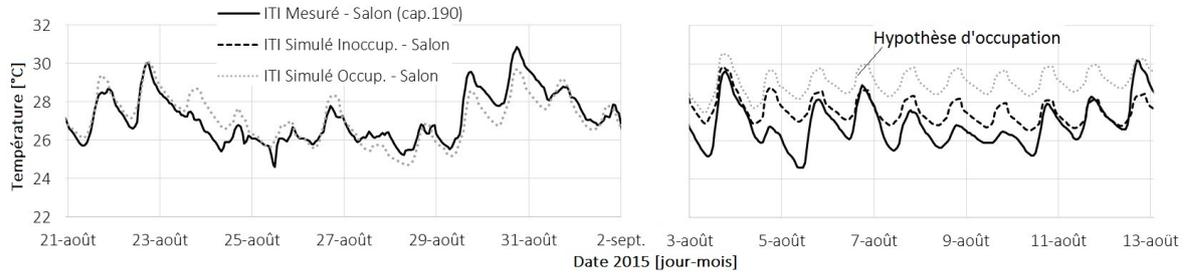


FIGURE 5.27 – Température mesurée et simulée en période d’occupation (gauche) et d’inoccupation (droite) avec des hypothèses de l’occupation (courbe jeune pointillée) : évaluation de l’effet d’occupant en ITI

5.4 Évaluation des logements rénovés sous des conditions de vague de chaleur

Comme expliqué dans le chapitre 4.3.2.2 on s’intéresse au comportement des logements soumis à des conditions de vague de chaleur. Ainsi, afin de comparer les résultats à partir d’une même base, des conditions météorologiques standard (représentatives des conditions actuelles) et des conditions météorologiques type vague de chaleur (représentatives du climat futur) ont été générées à l’aide du logiciel Meteonorm pour Paris. Ainsi les données météorologiques ayant été générées par le même logiciel, nous pouvons comparer l’influence d’une vague de chaleur en fonction du type d’isolant. Les résultats sont étudiés pendant une période d’un mois (août) en terme de différence entre les deux conditions ΔT_{int} [°C] définie comme de suite :

$$\Delta T_{int} = T_{int,hw} - T_{int,std} \quad (5.1)$$

où $T_{int,hw}$ [°C] est la température intérieure simulée avec des conditions de vague de chaleur et $T_{int,std}$ [°C] est la température intérieure simulée avec des conditions standards.

Dans ce chapitre deux scénarios ont été analysés : *scénario 1* en inoccupation et *scénario 2* en occupation, dans le but d'évaluer les conditions intérieures de logements rénovés lorsque des charges internes sont générées par l'occupant et ses activités, et caractériser ainsi l'impact de la vague de chaleur sur l'occupant.

Concernant l'analyse en terme d'humidité relative (φ) on a constaté que, durant la période étudiée (août) les conditions de "vague de chaleur" sont légèrement inférieures aux conditions "standard" (données simulées à Paris avec Meteonorm), i.e. les conditions extérieures sont légèrement plus sèches en vague de chaleur que dans des conditions standards. Cependant, les variations de φ extérieure dans les deux conditions restent proches, avec des valeurs de φ d'environ $0,45(\pm 0,15)$ durant la nuit et $0,75(\pm 0,15)$ durant la journée. L'impact des conditions "vague de chaleur" est négligeable sur la grandeur φ . Les résultats obtenus sur l'air intérieur sont présentés en Annexe B.

5.4.1 Scénario 1 : Vague de chaleur en situation d'inoccupation

Dans l'analyse du comportement thermique des logements (chapitres 5.1 et 5.2) on a constaté que les températures dans le logement avec l'isolation thermique par l'intérieur (ITI) étaient plus élevées que celles du logement avec l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) pour des zones équivalentes (particulièrement pour des zones exposées). Ce comportement est également constaté dans les données obtenues par simulation avec les deux conditions : vague de chaleur et standard. Dans la figure 5.28 sont illustrés les cumuls horaires de température pour les deux conditions (standard et vague de chaleur) dans le salon, zone où sont obtenues les conditions les plus extrêmes. Durant cette période on observe qu'en ITI les températures tendent vers des valeurs élevées par rapport à ITE. Les températures intérieures en vague de chaleur en ITI varient principalement entre 30°C et 37°C , tandis qu'en ITE pour la même période la température intérieure varie principalement entre 28°C et 34°C . En ITI pour 99% des heures enregistrées en vague de chaleur la température reste supérieure à 30°C contre 68% des heures en ITE pour la même limite de température. Dans des conditions standards 33% de la période les températures sont supérieures à 30°C en ITI, contre 17% en ITE.

Dans les figures 5.29 et 5.30 est illustré l'effet de la vague de chaleur. Dans la partie supérieure du graphique (lignes bleus et noires en continue (zone exposée) et pointillée (zone non exposée)) sont tracées les ΔT_{int} définies par (5.1); dans la partie inférieure (lignes grises en continue) sont tracées les deux conditions extérieures (T_{ext}).

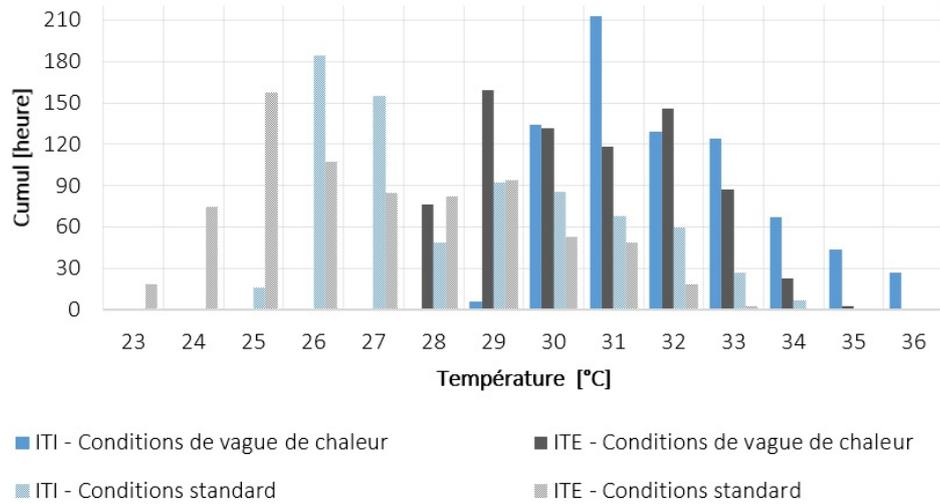


FIGURE 5.28 – Période d’inoccupation : cumul d’heure dans une zone exposée au rayonnement solaire (Salon) en ITI et ITE durant le mois d’août (744 heures) . Données simulées

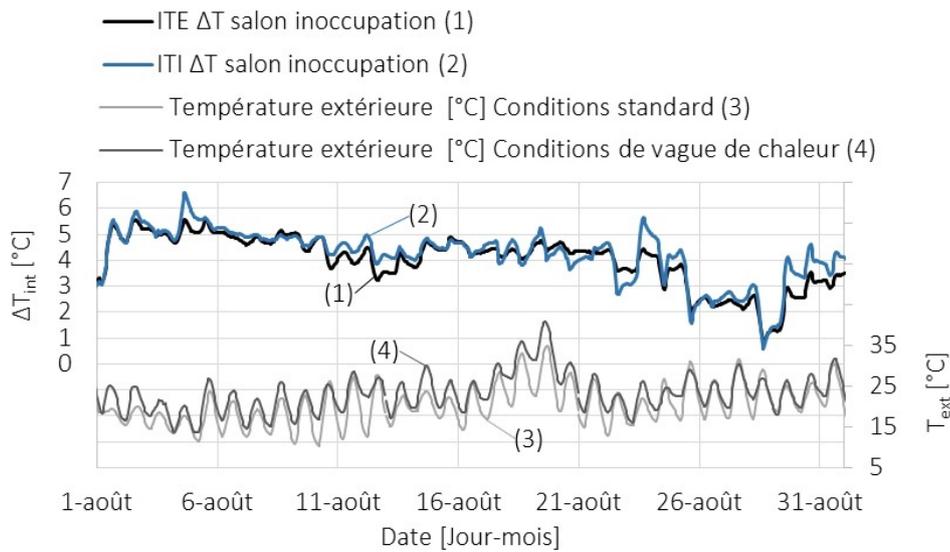


FIGURE 5.29 – Période d’inoccupation : différence de température entre les conditions standard et vague de chaleur (ΔT_{int}) : pour une zone exposée. Température extérieure (T_{ext}) avec et sans l’effet de la vague de chaleur

Concernant les zones exposées, on observe que dans les deux logements, les conditions de la journée précédente ont un effet majeur sur le comportement du jour d’après, i.e., les conditions extérieures du jour $j-1$ ont une forte influence sur les conditions intérieures du jour j . Par conséquent, lorsqu’un écart important se produit entre les deux conditions extérieures durant le jour et la nuit (ΔT_{ext}), le ΔT_{int} en ITI et ITE reste élevé avec une légère variation autour d’une valeur. Par exemple, du 13 au 20 août, on observe que la

température extérieure T_{ext} en vague de chaleur est supérieure à la température obtenue dans des conditions standards tout au long de la période (la différence de température entre les deux conditions extérieures varie autour de 5°C , avec un ΔT maximal de $8,9^{\circ}\text{C}$ et minimale de 0°C). Dans ce cas, ΔT_{int} en ITI et ITE varie autour de $4,5^{\circ}\text{C}$, cependant le ΔT_{int} en ITI qui présente des oscillations légèrement plus marquées que celles obtenues en ITE. Dans les zones exposées, lorsque la température extérieure en vague de chaleur est proche ou en-dessous de la température dans les conditions standards, la valeur de ΔT_{int} tend à chuter. Un effet d'accumulation de la chaleur est constaté, car lorsque la température à l'extérieur en vague de chaleur rejoint la valeur des conditions standards ou est inférieure à celle-ci, le ΔT_{int} reste, quant à lui, au-dessus de zéro. Durant la période d'inoccupation, le ΔT_{int} des zones exposées en ITE varie dans une plage comprise entre $0,9^{\circ}\text{C}$ et $5,6^{\circ}\text{C}$ et $0,5^{\circ}\text{C}$ et $6,7^{\circ}\text{C}$ en ITI.

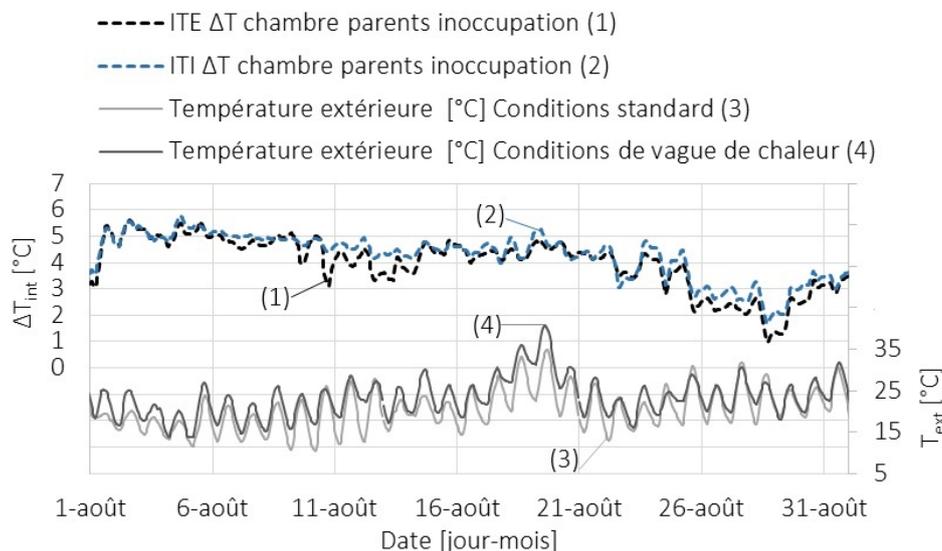


FIGURE 5.30 – Période d'inoccupation : différence de température entre les conditions standard et vague de chaleur (ΔT_{int}) pour une zone non-exposée. Température extérieure (T_{ext}) avec et sans l'effet de la vague de chaleur

Concernant les zones non-exposées (chambre des parents dans la figure 5.30), on constate qu'en ITE durant cette période les conditions des zones exposées influencent la manière dont la température va évoluer dans la zone non-exposée. Ceci s'explique par le fait que les portes dans ce logement ont été simulées comme étant à 50% de leur surface ouverte, pendant toute la journée, permettant d'importants échanges d'air entre les deux zones. Contrairement au logement ITI où les échanges ont été restreints. En ITI on constate que l'évolution de ΔT_{int} dans la zone exposée, ne possède pas la même allure que la zone non-exposée. Dans ce logement la variation ΔT_{int} des zones non-exposées est légèrement moins importante que dans les zones exposées. Durant la période d'inoccupation, le ΔT_{int} des zones non-exposées en ITE varie dans une plage comprise entre $0,98^{\circ}\text{C}$ et $5,5^{\circ}\text{C}$ et $1,8^{\circ}\text{C}$ et $5,8^{\circ}\text{C}$ en ITI.

5.4.2 Scénario 2 : vague de chaleur en période d'occupation

Dans la section précédente, l'effet de la vague de chaleur a été réalisé sans tenir compte de l'effet de l'occupant. Cependant, des contributions de chaleur non négligeables provenant des occupants (chaleur émise par l'occupant) et des activités journalières (cuisson des aliments, mise en route des électroménagers,...) déterminent le comportement thermique des logements. Dans ce scénario, on applique des conditions d'occupation identiques dans les deux logements, afin de pouvoir comparer les résultats sur une même base d'occupation. On a ainsi recréé un scénario avec un taux d'occupation élevé, représenté par une famille composée de quatre membres, laquelle est présente dans le logement 100% du temps de la période étudiée (durant les vacances d'été). Les résultats sont montrés dans les figures 5.31, 5.32 et 5.33. Dans la figure 5.31, on observe qu'en occupation et vague de chaleur, 100% du temps les températures sont égales ou supérieures à 30°C, contre 87% en ITE. Dans des conditions standard, les températures en occupation atteignent 30°C durant 43% de la période en ITI, contre 34% en ITE. Comparées à celle obtenues en inoccupation, ces valeurs permettent de confirmer des apports non négligeables provenant de la présence des habitants dans le logement.

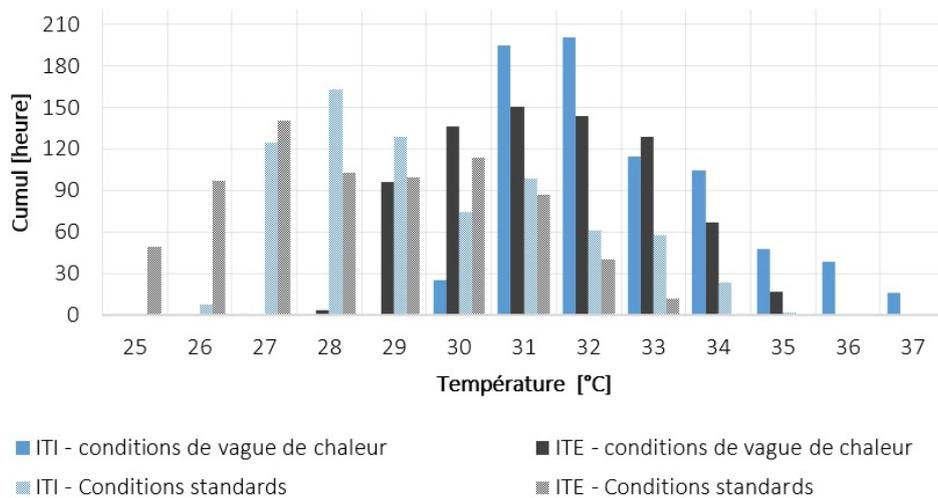


FIGURE 5.31 – Période d'occupation : cumul d'heure dans une zone exposée au rayonnement solaire (Salon) en ITI et ITE durant le mois d'août (744 heures) . Données simulées

Dans les figures 5.32 et 5.33, ΔT_{int} ETI et ITI suit un comportement très similaire à celui observé en inoccupation, i. e., les températures en ITI restent supérieures par rapport à ITE (comme constaté dans la figure 5.31). Cependant, alors que les températures augmentent, la différence entre les deux conditions (ΔT_{int}) décroît (figures 5.32 et 5.33) par rapport au scénario d'inoccupation (figures 5.29 et 5.30). Par exemple en ITE, le 19 août, lorsque la différence de température des conditions extérieures est de 8,9°C, la température intérieure est dans des conditions standard de 27,5°C en inoccupation, contre 29,5°C en occupation ; et dans des conditions de vague de chaleur la température atteint 32,2°C en inoccupation,

contre $33,5^{\circ}\text{C}$ en occupation, i.e., qu'en vague de chaleur l'effet de l'occupant sur la valeur de la température diminue de 2°C à $1,3^{\circ}\text{C}$.

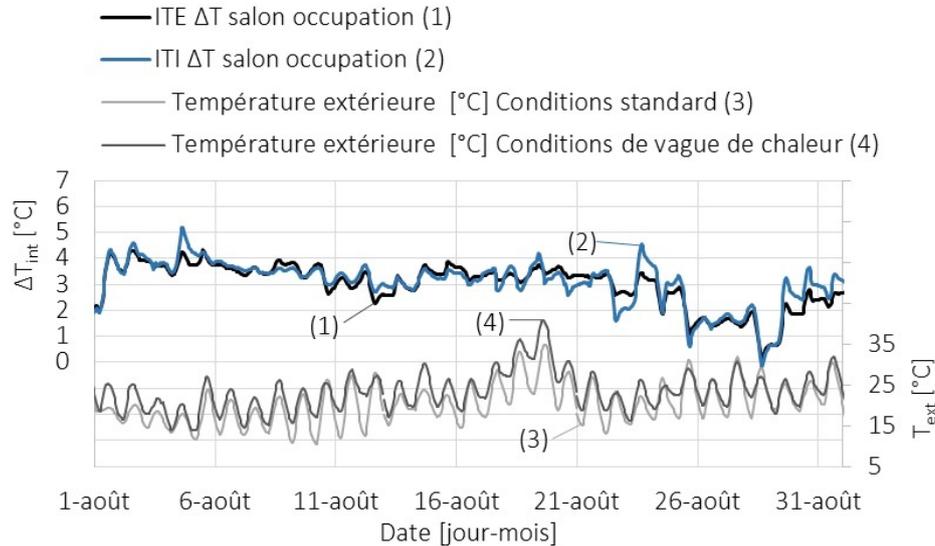


FIGURE 5.32 – Période d'occupation : différence de température conditions standard et vague de chaleur (ΔT) zones exposées. Température extérieure (T_{ext}) avec et sans l'effet de la vague de chaleur

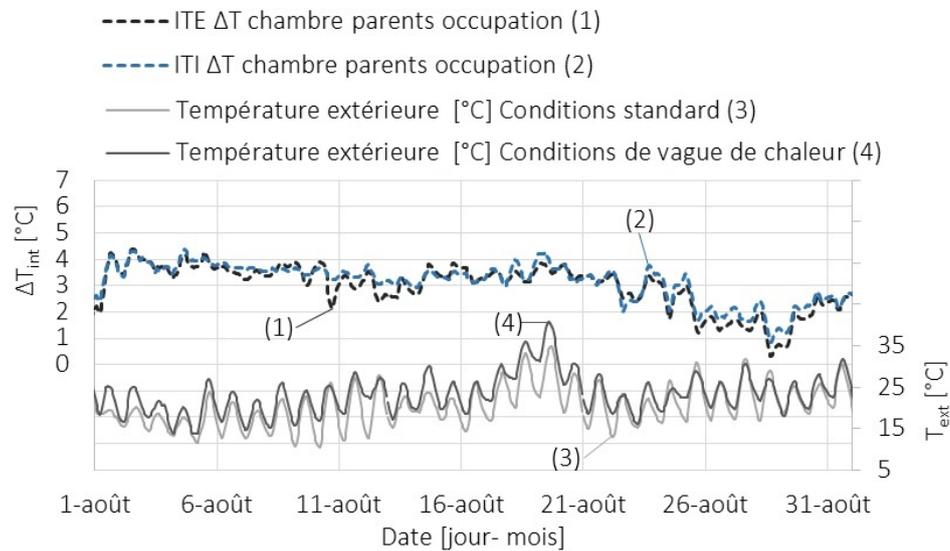


FIGURE 5.33 – Période d'occupation : différence de température entre les conditions standard et vague de chaleur (ΔT_{int}) pour une zone non-exposée. Température extérieure (T_{ext}) avec et sans l'effet de la vague de chaleur

En ITI pour la même journée du 19 août (conditions les plus défavorables), l'effet de l'occupant diminue de $1,7^{\circ}\text{C}$ à $0,9^{\circ}\text{C}$. Dans des conditions météorologiques extrêmes, la chaleur

échangée entre l’occupant et son environnement est inférieure que dans des conditions standard, en raison de l’équilibre thermique. La chaleur produite par le métabolisme humain ne se dissipe plus dans l’environnement, où les températures sont en équilibre avec la surface de la peau. D’autre part, en occupation durant la période du 1 au 22 août, ΔT_{int} varie autour de 3,4°C en ITE et 3,5°C en ITI, environ -1°C de différence par rapport à la période d’inoccupation.

5.5 Évaluation des conditions intérieures : première approche du confort

5.5.1 Description

Le confort thermique est une notion complexe car il dépend de multiples paramètres telles que la physiologie et la psychologie de chaque individu. Dans le monde du bâtiment, le confort thermique fait référence à l’état d’équilibre thermique dans lequel l’homme perçoit une sensation d’agrément par rapport aux conditions intérieures. L’homme échange de la chaleur avec son environnement à travers la surface cutanée¹⁶ via des effets thermiques que sont (1) *la conduction*, lorsque le corps est en contact direct avec une surface¹⁷; (2) *la convection*, liée à la température et vitesse de l’air à l’intérieur; (3) *le rayonnement*, lié à la température des surfaces et (4) *respiration*, liée aux déperditions calorifiques par évaporation. Le confort thermique est également déterminé par le métabolisme, l’activité et l’habillement de l’individu [Candas 2000], [Roulet 2008], [ASH 2004].

Dans le bâtiment, les paramètres sur lesquels repose le critère du confort sont liés aux conditions thermiques intérieures, à la qualité de l’air et aux conditions acoustiques et optiques. Concernant les conditions thermiques, parmi les paramètres les plus déterminants du confort on trouve les températures de l’air, la température moyenne de rayonnement et la température opérative, l’hygrométrie et la vitesse de l’air [Roulet 2008]. Cette section a pour objectif de donner une première approche sur les conditions de confort/inconfort thermique en période d’été à partir des données mesurées et des résultats obtenus dans la simulation avec des conditions météorologiques standards et de vague de chaleur (ces deux dernières obtenues avec Meteonorm). On s’intéresse donc aux données de l’humidité relative, des températures de l’air et moyenne de rayonnement (mesurées et simulées) dans le salon, zone dans laquelle les conditions les plus défavorables ont été observées. La période choisie (mi-juillet à mi-août 2014) comprend une partie en occupation et une autre en inoccupation. Bien que l’analyse du confort dans le scénario d’inoccupation soit antinomique (i.e. parler de confort alors qu’il n’y a pas d’occupant dans le logement), il permet de souligner l’effet de l’occupant sur les conditions intérieures. Ainsi, les diagrammes de Givoni de même que les graphiques des évolutions de température rayonnante seront présentés en période d’occupation et d’inoccupation.

16. La surface cutanée en m² est calculée en fonction du poids et de la taille de l’individu.

17. Face aux autres modes d’échanges, la conduction a un effet négligeable sur le confort.

Tout d'abord les effets combinés de la température et de l'humidité relative sont représentées à travers du diagramme de Givoni. Ensuite, la température opérative¹⁸, présentée comme indicateur du confort des effets combinés de la température de l'air et la température moyenne de rayonnante, vient compléter cette première approche du confort.

5.5.2 Deux indicateurs du confort thermique

5.5.2.1 Le diagramme de Givoni

Le diagramme de Givoni est un diagramme sur la base du diagramme psychrométrique dans lequel des zones de confort sont représentées en fonction de la vitesse de l'air (0, 0,5 et 1m·s⁻¹), de la température opérative (définie dans la section 5.5.2.2) et de l'humidité relative intérieure. Ces zones de confort sont définies comme étant de zones bornées par une plage des conditions climatiques dans lesquelles le pourcentage de personnes insatisfaites est bas. Le diagramme de Givoni permet, entre autres, de quantifier la capacité des logements anciens rénovés à répondre à des conditions extrêmes, d'évaluer l'effet de l'occupant sur les conditions de confort intérieur et renseigne sur les possibles mesures à mettre en place pour limiter les conditions d'inconfort [Givoni 1992], [Givoni 1976]. Dans les figure 5.34 à 5.36, des zones de confort définies par Givoni et par le standard 55 de l'ASHRAE¹⁹ [ASH 2004] sont illustrées. Ce dernier indicateur est donné à titre référentiel par rapport au diagramme de Givoni, car bien qu'il soit un outil pour évaluer les conditions climatiques des bâtiments résidentiels, il a été développé et plus largement utilisé pour évaluer le confort de zones conditionnées (avec de la climatisation) [Givoni 1992]. La zone de confort ASHRAE²⁰ est définie dans une plage de température comprise entre 22,5 et 27,8°C et une teneur en humidité de l'air comprise entre 4 et 12 g·kg⁻¹ (dans une plage d'humidité relative (φ) entre environ 0,20 et 0,60) en fonction de la vitesse de l'air intérieur (v_i), e.g., la température opérative dans une zone peut atteindre 27,8°C si $v_i=0,8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ [ASH 2004].

5.5.2.2 La température opérative

La température opérative rend compte de la température ressentie dans une zone en tenant compte de la température des surfaces. Cet indicateur du confort thermique est calculé en fonction de la température de l'air et de la température moyenne rayonnante à travers l'équation (5.2).

$$T_{rs} = \frac{h_r \cdot T_{rm} + h_{cv} \cdot T_a}{h_r + h_{cv}} \quad (5.2)$$

18. Appelée aussi température résultante sèche

19. Pour une unité d'habillement clo=0.5

20. Repartie en deux sous-zones en fonction du type d'habillement : 1 et 0,5 clo (1clo=0,155m²K·W⁻¹). Dans les graphiques exposés ci-après, la zone de confort ASHRAE est proposée par rapport à une tenue d'été (0.5 clo)

où T_{rs} [K] est la température opérative, h_r [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] est le coefficient d'échange par rayonnement, T_{rm} [K] est la température moyenne rayonnante, h_{cv} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] est le coefficient d'échange par convection et T_a est la température de l'air. Un calcul simplifié de la température opérative est donné par [ASH 2004] dans les conditions intérieures suivantes : vitesses intérieures (v_i) inférieures à $0,2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et différence des températures de l'air et moyenne rayonnante inférieure à 4°C (équation (5.3)).

$$T_{rs} = \gamma \cdot T_{rm} + (1 - \gamma) \cdot T_a \quad (5.3)$$

où γ [-] est la fraction rayonnante qui varie entre 0,5 et 0,3 en fonction de la vitesse de l'air, une valeur de γ de 0,5 a été appliquée pour calculer la température opérative (à partir des données de température de l'air et moyenne rayonnante enregistrées dans le salon) afin de conserver une base équivalente par rapport aux données issues de la simulation.

5.5.2.3 Application des indicateurs au cas d'étude : Résultats en ITI et ITE

Diagramme de Givoni

Concernant les résultats, comme mentionné précédemment, les données obtenues par le biais des mesures et des simulations (standards et de vague de chaleur), ont été reportées sur le diagramme de Givoni. Dans les figures 5.34 à 5.36 on distingue également les jours d'occupation et d'inoccupation. Les données mesurées sont illustrées dans la figure 5.34 afin de vérifier la capacité du modèle à représenter le comportement des logements dans la période étudiée, i.e., vérifier la cohérence dans le nuage de points des données simulées avec les conditions standards (figure 5.35a). Nous rappelons que les données météorologiques dans le cas *mesurées* ne sont pas les mêmes que dans le cas *simulées standards*.

Dans l'ensemble des figures on observe que le comportement des logements en période d'occupation (figures 5.34 et 5.36b) est distinct par rapport à la période d'inoccupation (figures 5.34 et 5.36a). En période d'occupation les nuages de points des deux logements se superposent, alors qu'en inoccupation les nuages de points sont séparés. En inoccupation ITI a tendance à présenter de valeurs supérieures par rapport à ITE en terme de température opérative; l'humidité relative reste, quant à elle, dans le même ordre de grandeur. Ce comportement est observé aussi bien dans les données mesurées (figure 5.34) que simulées (figure 5.36), mais de manière plus prononcée dans les résultats de simulations. Dans les données mesurées les points sont répartis entre la zone 0,5, $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et en dehors des zones de confort ($T_{int} > 32^\circ\text{C}$). En inoccupation ces points sont principalement répartis entre 0,5, $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cependant dès que des apports de chaleur de la part l'occupant apparaissent, les nuages de points s'écartent de la zone de confort (figure 5.34). Concernant les résultats de données simulées en standard, obtenus à partir d'une base de données différentes (Meteonorm), on constate que la quasi-totalité des données est répartie dans les trois zones de confort (figure 5.35a). Dans le cas de l'occupation, par exemple, une ventilation entre 0,5 et $1\cdot\text{s}^{-1}$ permettrait de garantir un état de confort à l'intérieur des deux logements. Concernant les

données obtenues en vague de chaleur (figure 5.35b), un pourcentage important des points est situé en dehors des zones de confort en période d'occupation, contrairement aux données obtenues dans la période d'inoccupation.

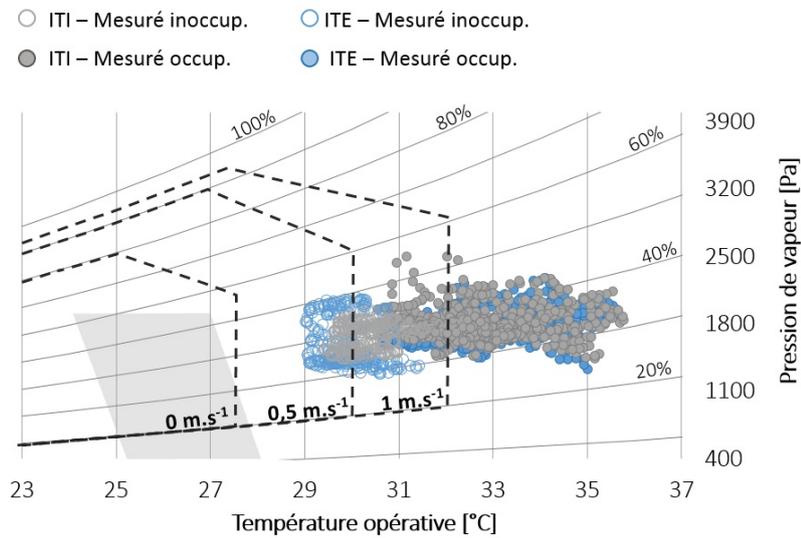


FIGURE 5.34 – Diagramme de Givoni. Données mesurées pendant l'été (du 16 juillet au 16 août 2014) dans le salon des deux logements ITI et ITE

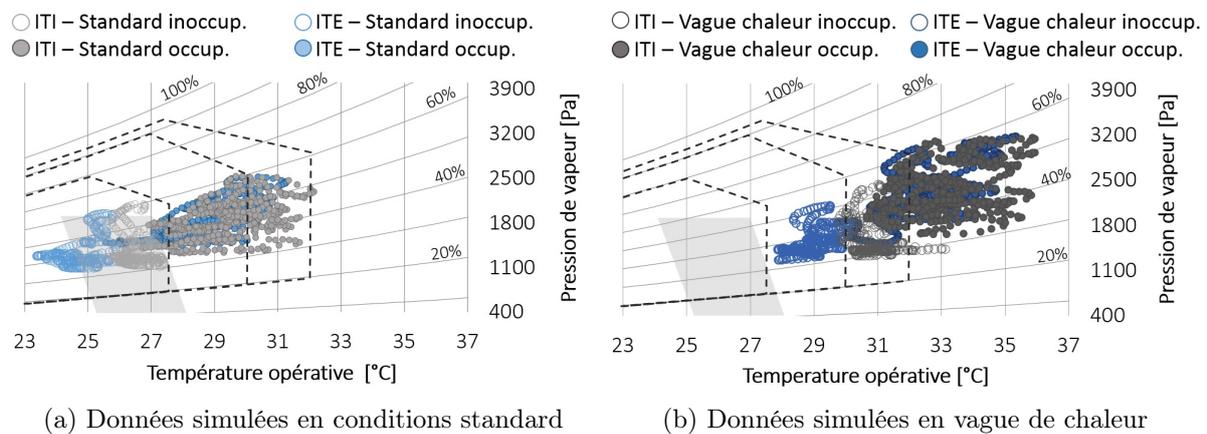


FIGURE 5.35 – Diagramme de Givoni. Données simulées dans le salon dans des conditions standard et en vague de chaleur (Meteonorm) pendant l'été (du 16 juillet au 16 août). Présentation séparée des données pour des conditions standard et de vague de chaleur

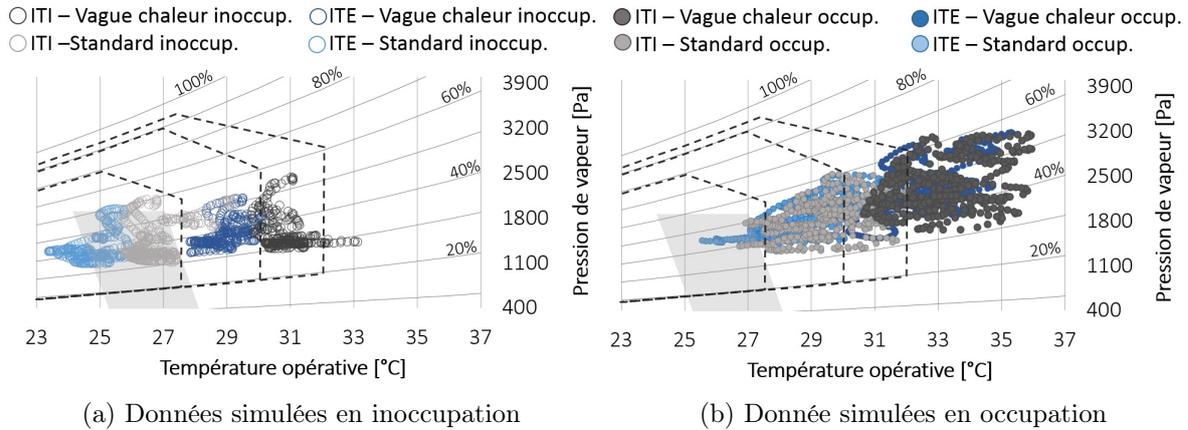


FIGURE 5.36 – Diagramme de Givoni. Données simulées dans le salon dans des conditions standard et de vague de chaleur (Meteonorm) pendant l'été (du 16 juillet au 16 août). Présentation séparée des données pour la période d'occupation et la période d'inoccupation

Résultats température opérative

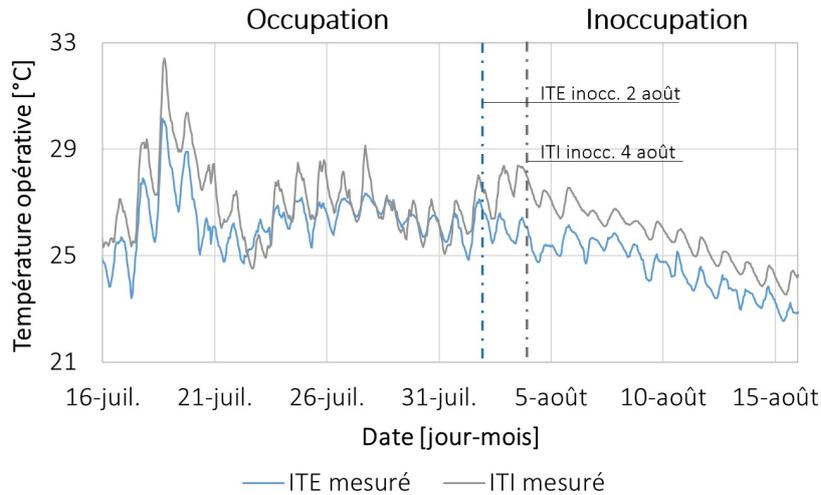


FIGURE 5.37 – Température opérative (T_o) dans le salon du 16 juillet au 3 août (occupation) et du 04 août au 16 août (inoccupation) 2014, calculée à partir des températures de l'air et radiant mesurées

Dans le nuage des points illustré dans le diagramme de Givoni, il est difficile de distinguer la simultanéité des conditions, car la température opérative est donnée en fonction de l'humidité relative, et non pas en fonction du temps. Dans les graphiques 5.37 et 5.38, durant la période d'occupation, on constate qu'à certains instants les courbes se superposent, d'où la superposition des nuages reflétée dans le diagramme de Givoni (figures 5.34 et 5.36b). Cependant, les pics de température opérative sont supérieurs en ITI par rapport à ITE (aussi

bien dans les données mesurées que simulées). Concernant la période d'inoccupation, les écarts entre les deux logements deviennent plus importants, mais avec de pics de température opérative journalière aplatis et des écarts jour nuit réduits.

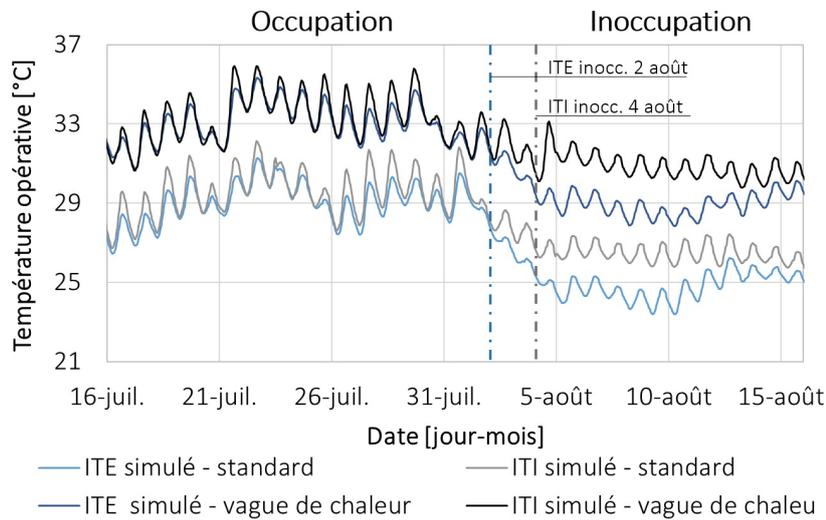


FIGURE 5.38 – Température opérative (T_o) dans le salon du 16 juillet au 3 août (occupation) et du 04 août au 16 août (inoccupation). T_o simulée à partir de la base des données de Meteonorm pour les deux conditions standards et vague de chaleur

Cette première approche du confort a mis en évidence l'impact de l'occupant, en plus de l'effet du type d'isolation dans des conditions des conditions estivales. Par ailleurs, ces logements ont une caractéristique propre aux bâtiments anciens laquelle peut jouer un rôle primordial à l'heure de mettre en place des stratégies passives pour limiter les conditions d'inconfort en été. Il s'agit de la ventilation naturelle traversante favorisée par la distribution de pièces (figure 4.3). Une de stratégies serait l'ouverture des fenêtres le soir pour faciliter les échanges lorsque la température extérieure chute, afin d'évacuer la chaleur produite pendant la journée, combinée à l'utilisation de protection pour limiter les apports de chaleur par rayonnement.

Conclusions partie II

La deuxième partie de cette thèse a été structurée en deux chapitres : le chapitre 4 dans lequel ont été présentés le cas d'étude et la campagne de mesure qui est venue compléter l'approche par simulation des logements. Dans le chapitre 5 l'analyse des données mesurées, les résultats du calage et de la validation du modèle, l'étude du comportement des logements anciens rénovés dans des conditions de vague de chaleur, ainsi qu'une première approche du confort thermique ont été présentés.

Dans le chapitre 4 ont été exposées les solutions adoptées dans le cadre de l'intervention de rénovation thermique du cas d'étude. Cette partie a permis de recueillir les informations et les premiers éléments d'analyse nécessaires à la représentation du cas d'étude dans un outil de simulation thermique dynamique (STD). Ce cas d'étude est constitué de deux logements adjacents, avec surface et distribution spatiale similaires, rénovés avec de l'isolation thermique par l'intérieur (ITI) et extérieure (ITE). Cette condition a permis de les comparer, étudier leur comportement et d'évaluer l'impact des couches isolantes (nature et position de l'isolant) sur les conditions intérieures. Ces logements ont été équipés avec des capteurs pour le suivi de température et d'humidité relative ; ces données ont servi au calage et à la validation du modèle. Concernant les fichiers météorologiques en vague de chaleur (obtenus par simulation), bien que ces fichiers soient soumis à des incertitudes (tel qu'exposé dans la littérature), ils restent représentatifs de l'évaluation du comportement des logements dans un scénario de conditions extrêmes de chaleur.

Dans le chapitre 5 on a, dans un premier temps, analysé les données enregistrées pour deux périodes : (i) occupation et (ii) inoccupation. Cette première analyse nous a permis de constater l'effet de l'occupant sur l'évolution de la température et de l'humidité relative à l'intérieur de chaque pièce. On a également pu mettre en lumière l'importance d'une analyse parallèle de la température et de l'humidité relative, car dans certains cas, l'évolution de ces grandeurs (notamment celle de l'humidité relative) peut être le produit d'un apport d'humidité (e.g. douche) ou d'une régulation par ouverture de fenêtre. Cette étape préalable d'analyse nous a conduit à la réalisation du calage du modèle dans un scénario d'inoccupation afin d'écarter l'impact de l'occupant et de n'étudier que la réponse des logements aux conditions environnantes ("cas 2014"). Ainsi une première identification des paramètres sensibles déterminant le comportement des logements a été faite. Dans un scénario d'inoccupation, l'ajustement des paramètres tels que le débit de renouvellement d'air, des coefficients liés aux propriétés thermiques, l'étanchéité à l'air et les valeurs des coefficients de transmission solaire ont permis d'obtenir des résultats convaincants par rapport aux données mesurées aussi bien dans le calage et la validation du modèle.

Les résultats du calage, ont montré que, dans le cas du logement avec ITI, le modèle tend à surestimer la valeur mesurée, e.g. les pics de température sont supérieurs aux pics mesurés,

notamment dans les zones exposées. Cependant, les données obtenues avec le modèle restent en bon accord avec les données mesurées. En terme de température, l'erreur absolue moyenne la plus élevée a été trouvée dans la chambre enfant des deux logements avec des valeurs de 0,95 en ITE et 0,56 en ITI. En terme d'humidité relative les écarts trouvés sont plus importants que ceux observés en terme de température. En ITE l'erreur absolue moyenne la plus élevée a été trouvée dans la chambre enfant (0,042) et en ITI dans le salon (0,038). Cela s'explique en partie par les hypothèses adoptées concernant les échanges de masse entre les parois et le volume d'air.

Concernant le comportement des logements ITI et ITE, on a pu constater que l'inertie thermique est un mécanisme important de régulation thermique. On a constaté que les températures enregistrées dans le salon ITI étaient supérieures à celle enregistrées en ITE. Dans le logement étudié lorsque l'isolation thermique est installée à l'extérieur, l'inertie thermique de la pierre calcaire permet d'améliorer des conditions intérieures pendant les périodes de chaleur. Dans le cas du logement ITI une accumulation de la chaleur a été observée, spécialement dans les zones exposées au soleil. Ainsi en inoccupation, la température maximale mesurée à l'intérieur atteint 25,6°C en ITE contre 26,6°C en ITI (dans le salon des deux logements). Dans des conditions "vague de chaleur" la température à l'intérieur du logement ITE atteint 34°C contre 36°C en ITI. En ITI pour 99% des heures en vague de chaleur la température reste supérieure ou égale à 30°C, tandis qu'en ITE ces conditions sont atteintes 68% du temps. En ce qui concerne la période d'occupation en "vague de chaleur", les températures intérieures sont plus critiques qu'en inoccupation : 100% du temps la température intérieure en ITI est égale ou supérieure à 30°C contre 87% en ITE. L'évaluation du comportement hygrothermique des logements en vague de chaleur a permis de constater l'impact de l'inertie thermique sur les conditions intérieures. Car bien que les conditions de confort ne sont pas atteintes, l'inertie thermique permettrait d'alléger les charges en climatisation dans le cas de sa mise en place.

Ce chapitre a enfin présenté une première approche du confort. Comme énoncé dans la présentation de cette dernière section, bien que le scénario d'inoccupation soit antinomique, cela a permis de mettre en évidence l'impact de l'occupant. Dans le diagramme de Givoni, lorsque les logements sont tous les deux occupés, les conditions en dehors de la zone de confort sont atteintes par les deux logements dans des proportions similaires (nuage des points ayant une répartition proche).

Troisième partie

CONSTRUCTION D'UN MODÈLE DE TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE À L'ÉCHELLE DE LA PAROI

Dans la partie II de cette thèse, les performances hygrothermiques des logements parisiens rénovés ont été étudiées à travers des données enregistrées (entre 2014 et 2015) et des données simulées (dans des conditions météorologiques à Paris en 2014, standards et de vague de chaleur). Dans le modèle adopté à l'échelle du bâtiment, les échanges d'humidité entre les parois et le volume d'air ont été négligés. Cette troisième partie de la thèse est consacrée à l'étude des transferts de chaleur et de masse des parois multicouches. Les parois des bâtiments anciens sont principalement constituées de matériaux poreux, i.e. d'une matrice solide et de pores, en grande partie interconnectés, ce qui les rend sensibles à l'eau sous forme liquide et sous forme de vapeur. Ces matériaux poreux peuvent être classés suivant la distribution de la taille des pores (microstructure du matériau) en (1) *capillaires*, si le diamètre de la majorité des pores est supérieur à 100nm, e.g. la brique, et (2) en *hygroscopiques*, si le diamètre de la majorité des pores est inférieur à 100nm, e.g., enduit de chaux, ciment [Delgado 2014]. En vue d'étudier le comportement hygrothermique des parois anciennes (constituées principalement de matériaux hygroscopiques, e.g., certaines pierres calcaires) rénovées avec des isolants thermiques (constitués principalement de matériaux non-hygroscopiques, e.g., la laine minérale) des modélisations de différentes configurations de parois ont été effectuées. Les configurations de paroi avec les matériaux d'isolation mis en place (le polystyrene et la laine minérale) ont été comparées à une solution d'isolation constituée d'un matériau hygroscopique : le béton de chanvre HLC1. Ce scénario permet d'évaluer le comportement des parois anciennes rénovées avec une alternative dont le comportement hygrique est relativement proche du comportement des matériaux anciens (pierre calcaire, la chaux, le plâtre). Ces configurations permettent ainsi d'étudier l'effet de la nature, la position des couches isolantes et l'effet de la proportion et direction des joints sur le flux de chaleur et d'humidité. Les modélisations ont été effectuées avec trois types de conditions aux limites : (1) échelon, (2) sinusoïdales (cycliques) et (3) conditions météorologiques à Paris (issues des simulations réalisées dans la deuxième partie) ; toutes appliquées sur des configurations en 2D. Les conditions aux limites (1) et (2) ont été appliquées à la surface extérieure des configurations, tandis qu'à l'intérieur les conditions sont constantes ; dans le cas des conditions (3), les deux surfaces sont soumises aux variations.

Implémentation d'un modèle de transferts de chaleur et de masse dans un outil de modélisation

Ce chapitre est structuré en trois parties : une première partie où le modèle adopté est présenté avec la mise en forme des équations et les hypothèses appliquées au cas d'étude ; dans la deuxième partie, on expose l'adaptation du modèle dans l'outil de simulation ; dans la troisième et dernière partie sont montrés les résultats de la validation du modèle à travers un benchmark.

6.1 Présentation du modèle KÜNZEL

Dans ce chapitre est présenté le modèle basé sur celui de [Künzel 1995], lequel a été adopté afin d'évaluer les transferts de chaleur et de masse des parois multicouches (modèle introduit dans le chapitre 3.3). Ce modèle est intégré dans l'outil de modélisation dynamique COMSOL Multiphysics [®]¹ (versions 4 et 5).

6.1.1 Mise en forme des équations

Le modèle adopté permet la modélisation des transferts de chaleur et de masse en une et deux dimensions (1D et 2D), suivant des hypothèses appliquées dans le domaine du bâtiment [Künzel 1995]. Les sources ponctuelles à l'intérieur de la paroi ainsi que des phénomènes ayant lieu sur la verticale (e.g. les remontés capillaires) sont négligés. On souhaite étudier les transferts de chaleur et de masse des parois en pierre calcaire qui ont été rénovées avec de l'isolation thermique, ainsi que l'effet des joints sur le flux de chaleur et de masse, d'où l'intérêt de modélisations sur des configurations en 2D.

Dans le chapitre 3.3 a été exposée la forme générale du modèle développé par [Künzel 1995], avec les équations de transferts de chaleur (équation (6.1) et de masse (équation (6.2)) :

1. Dans la suite du manuscrit, le nom du logiciel sera simplifié par COMSOL

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \frac{\partial (p_v)}{\partial x} \right) \quad (6.1)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \frac{\partial (p_v)}{\partial x} \right) \quad (6.2)$$

Afin d'assurer la continuité du flux de masse à l'interface des deux matériaux, [Künzel 1995] a développé un modèle qui met en relation la pression de vapeur et l'humidité relative (figure 3.2). Dans son modèle, les variables recherchées sont la température (T) [K] et l'humidité relative (φ) [-]. En conséquence, le terme de dérivée spatiale de la pression de vapeur (p_v) [Pa] des équations (6.1) et (6.2) doit être exprimé en fonction de T et φ . Étant donné que, pour une température donnée, l'humidité relative représente le rapport entre la pression partielle (ou pression de vapeur), et la pression de saturation (p_{sat}), p_v peut alors s'exprimer par le rapport de φ et p_{sat} :

$$p_v = \varphi \cdot p_{sat}$$

Alors :

$$\frac{\partial p_v}{\partial x} = \frac{\partial (\varphi p_{sat})}{\partial x} \quad (6.3)$$

Et :

$$\frac{\partial (\varphi p_{sat})}{\partial x} = \frac{\partial p_{sat}}{\partial x} \varphi + \frac{\partial \varphi}{\partial x} p_{sat} \quad (6.4)$$

De même que pour la pression de vapeur (p_v), la dérivée spatiale de la pression de saturation dans l'équation (6.4) doit être exprimée en terme de T afin de réduire le nombre de variables recherchées à deux (T et φ). La pression de saturation (p_{sat}) est la pression à laquelle la vapeur d'eau est en équilibre thermodynamique. p_{sat} peut être calculée à partir de la relation empirique (6.5) (norme NF EN ISO 13788), qui met en relation la température T de l'air avec p_{sat} .

$$p_{sat} = 611 \cdot \exp \left(\frac{a \cdot T}{T_0 + T} \right) \quad (6.5)$$

Avec :

$$\begin{array}{lll} a = 22,44 & T_0 = 272,44^\circ C & T < 0^\circ C \\ a = 17,08 & T_0 = 234,18^\circ C & T \geq 0^\circ C \end{array}$$

La dérivée spatiale peut alors s'écrire en terme de T :

$$\frac{\partial p_{sat}}{\partial x} = \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6.6)$$

En remplaçant (6.6) en (6.4) :

$$\frac{\partial(\varphi p_{sat})}{\partial x} = \varphi \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + p_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (6.7)$$

D'autre part, l'enthalpie du matériau (H) est calculée par la somme de l'enthalpie du matériau sec (H_s) et l'enthalpie de l'eau (H_w) emmagasinée dans ses pores. Dans la plage de températures du domaine du bâtiment, l'enthalpie peut être calculée par une relation entre la température du matériau, sa capacité calorifique et sa densité [Künzel 1995] :

$$H = H_s + H_l = \rho_s c_p T + w c_p T$$

Ainsi la capacité de stockage de la chaleur, représentée par le terme dH/dT dans l'équation (3.10), s'écrit :

$$\frac{dH}{dT} = \rho_s \left(c_p + \frac{1}{\rho_s} w c_p \right) \quad (6.8)$$

En développant les équations (6.1) et (6.2), les transferts couplés de chaleur (équation (6.9)) et de masse (équation (6.10)) peuvent alors s'exprimer en terme de température et d'humidité relative :

$$\begin{aligned} \rho_s \left(c_p + \frac{1}{\rho_s} w c_p \right) \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ &+ h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \varphi \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + \delta_p p_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \delta_p p_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \delta_p \varphi \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (6.10)$$

Avec :

$$\xi = \frac{dw}{d\varphi}$$

Les équations (6.9) et (6.10) mises sous forme matricielle (transferts en 1D ou 2D) deviennent :

$$\begin{bmatrix} \rho_s \left(cp_s + \frac{1}{\rho_s} wcp_w \right) & 0 \\ 0 & \xi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + h_v \delta_p \varphi \frac{dp_{sat}}{dT} & h_v \delta_p p_{sat} \\ \delta_p \varphi \frac{dp_{sat}}{dT} & D_\varphi + \delta_p p_{sat} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla^2 T \\ \nabla^2 \varphi \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Dans l'outil de modélisation COMSOL les équations peuvent être intégrées sous forme matricielle ou sous forme d'équations couplées. C'est cette dernière solution qui est adoptée.

6.1.2 Conditions aux limites

Les échanges de chaleur et de masse entre la paroi et l'air environnant sont ici décrits à travers la condition aux limites type Fourier (ou de troisième espèce), dans laquelle les échanges à la surface sont déterminés par un flux convectif. Cette condition aux limites est appliquée pour représenter la résistance à la surface de la paroi en contact avec de l'air [Künzel 1995]. Dans le cadre de cette thèse, trois types de conditions aux limites sont imposées : (1) échelon, (2) sinusoïdale et (3) issues des données météorologiques à Paris. Cette dernière est obtenue à partir des résultats des simulations à l'échelle du bâtiment (deuxième partie, chapitre 5.2). Les conditions aux limites échelon et sinusoïdale ont été choisies, pour leur simplicité, afin de réaliser de manière rapide et réaliste l'analyse des configurations de parois (chapitre 7) à travers la méthode d'analyse en composantes principales (ACP) qui sera exposée dans le chapitre 8.

Les flux de chaleur et de masse échangés entre la paroi et son environnement sont calculés à travers les équations (6.12) et (6.13) respectivement :

$$g_h = h_s \cdot (T_z - T_s) \quad (6.12)$$

$$g_m = \beta_s \cdot (p_{vz} - p_{vs}) \quad (6.13)$$

où g_h [$W \cdot m^{-2}$] est le flux de chaleur échangé à la surface, g_m [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$] est le flux de masse échangé à la surface, h_s [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] est le coefficient d'échange thermique, β_s [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$] est le coefficient d'échange de masse, T_z [$^{\circ}C$] et p_{vz} [Pa] sont respectivement la température et la pression de vapeur de l'air (dans la zone), T_s [$^{\circ}C$] et p_{vs} [Pa] sont respectivement la température et la pression de vapeur à la surface de la paroi. Ces conditions sont appliquées aux surfaces intérieure et extérieure

6.1.3 Hypothèses du modèle

Les modélisations sont réalisées sur des configurations de parois en 2D (chapitre 7) sur lesquelles on applique les hypothèses suivantes :

- Les propriétés des matériaux ne sont pas impactées par la direction (e.g., orientation des fibres), i.e. propriétés isotropes.
- Les phénomènes de remontée capillaire sont négligés. La paroi n'est pas en contact direct avec le sol où ce type de phénomène est le plus fréquent.
- La teneur en humidité est régie par des isothermes de sorption, où l'effet de la température est négligé. D'ailleurs, la courbe de teneur en humidité du matériau représente la sorption et la désorption (hystérésis négligée).
- Dans les applications dans le domaine du bâtiment, la diffusion de la vapeur peut être représentée en introduisant un coefficient de résistance à la vapeur d'eau (chapitre 3.3).
- Les conditions aux limites sont appliquées sur les surfaces intérieure et extérieure de manière uniforme (i.e. pas de gradient de température lié à la hauteur de la paroi) ; les conditions sur la surface supérieure et inférieure sont adiabatiques concernant le flux de chaleur et de zéro flux concernant le flux de masse.
- Aux interfaces entre deux matériaux, le contact est parfait, aucune résistance de contact n'est prise en considération.
- Seule la conductivité thermique du matériau est affectée par la teneur en humidité, les autres propriétés thermiques restent constantes.

6.2 Adaptation du modèle sur un outil de modélisation COMSOL

La modélisation des transferts de chaleur et de masse des cas d'étude a été effectuée dans le logiciel COMSOL (Versions 4 et 5). COMSOL est un environnement de simulation basé sur la méthode des éléments finis qui permet d'étudier une large gamme de phénomènes physiques. Le logiciel est présenté sous forme de modules (interfaces des phénomènes physiques prédéfinis) qui peuvent être couplés. COMSOL dispose également d'une interface graphique et d'une interface d'adaptation du modèle sous forme d'arborescence dans laquelle toutes les informations concernant le cas d'étude (e.g. les conditions aux limites, les propriétés et les variables) sont consignées. Il offre la possibilité d'intégrer ses propres équations. L'interface mathématique / module PDE² permet d'adapter le modèle décrit précédemment sous forme

2. Partial Differential Equation ; Équation aux dérivées partielles

de coefficients et d'assurer le couplage entre les deux transferts étudiés (chaleur et masse).

Dans le module PDE, l'équation générale est présentée de la manière suivante :

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + a u = f \quad (6.14)$$

Chacun des termes de l'équation représente :

- u : variable dépendante
- e_a : coefficient de masse
- d_a : terme de stockage
- c : coefficient de diffusion
- α : "conservative flux convection coefficient"
- β : coefficient de convection
- a : coefficient d'absorption
- γ : terme source (conservation du flux)
- f : terme source

L'équation (6.14) est adaptée au modèle de transferts de chaleur (équation (6.9)) et de masse (équation (6.10)) de la manière suivante :

$$d_a \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (c \nabla u - \gamma) \quad (6.15)$$

Avec des coefficients mis sous la forme :

$$\begin{aligned} u &= \{T, \varphi\} \\ d_a &= \left\{ \frac{dH}{dt} = \rho_s \left(cp_s + \frac{1}{\rho_s} w c p_w \right), \frac{dw}{d\varphi} = \xi \right\} \\ c &= \left\{ \lambda_s + h_v \delta_p \varphi \frac{dp_{sat}}{dT}, D_\varphi + \delta_p p_{sat} \right\} \\ \gamma &= \left\{ -h_v \delta_p p_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x}, -\delta_p \varphi \frac{dp_{sat}}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} \right\} \\ e_a &= \alpha = \beta = a = f = \{0, 0\} \end{aligned}$$

Les conditions aux limites sont exprimées de la manière suivante :

$$\vec{n} \cdot (-c\nabla u - \alpha u + \gamma) + qu = g \quad (6.16)$$

où qu est le terme d'absorption ou impédance à la frontière, lequel est négligé. g est le terme source ou flux à la frontière, c'est l'équivalent de g_h et g_m des équations (6.12) et (6.13) respectivement.

6.3 Validation/vérification du modèle

Comme expliqué dans le chapitre 4.3.1, les logements étudiés étant occupés, une campagne de mesure non intrusive a été privilégiée. Ainsi aucun sondage des parois n'a été possible. Les données concernant la composition des parois ont été recueillies à travers le dossier des ouvrages exécutés (DOE), les plans, les informations fournies par l'architecte en charge de la rénovation et le bailleur social (SIEMP³). Concernant les propriétés hygrothermiques, la base de données a été construite à partir des travaux réalisés dans le bâtiment ancien et à travers la littérature comme expliqué au chapitre 4.2 et les propriétés de la table 5.12.

L'évaluation des performances des parois rénovées exposée dans le présent chapitre est faite à partir des résultats de la modélisation. La validation du modèle a été réalisée à l'aide du *benchmark* HAMSTAD⁴. Un *benchmark* est défini comme étant un standard (ou une référence) à travers lequel d'autres (choses) peuvent être comparées, mesurées ou jugées⁵. Ici, le *benchmark* est alors utilisé comme une référence dans le but d'évaluer la précision du modèle de transferts de chaleur et de masse adopté (cohérence dans les résultats obtenus et d'autres modèles du benchmark).

6.3.1 Le benchmark HAMSTAD

Le projet européen *benchmark* HAMSTAD, auquel huit institutions ont participé, a été développé en 2002⁶ par l'École Polytechnique Chalmers⁷ en Suède afin de mettre à disposition cinq cas d'étude (*benchmarks*) numériques pour évaluer la fiabilité/qualité des modèles⁸ de transferts de chaleur, air et masse⁹ à travers les composants des bâtiments [Hagentoft 2002].

3. Société immobilière d'économie mixte de la ville de Paris

4. Heat, Air and Moisture Standard Development ; Développement du standard de chaleur, air et humidité.

5. La définition de *benchmark* ici donnée est prise du dictionnaire en anglais Random House Kernerman Webster's College Dictionary <http://www.kdictionaries-online.com/> et du dictionnaire d'anglais d'Oxford

6. Rapport final

7. Chalmers University of Technology

8. Le benchmark N°2 a été appliqué dans ce projet sur un modèle en 1D puis sur un modèle en 2D. Nous n'avons pas constaté d'incohérences ou d'écarts entre les résultats 1D et 2D. Or seuls les résultats du modèle en 1D sont illustrés dans la suite de ce document. Le benchmark N°5 a été appliqué sur un modèle en 2D

9. Heat, Air and Mass transfert model HAMT

Dans le cadre de ce projet de thèse, deux de ces benchmarks ont été utilisés afin de valider le modèle : le benchmark N°2 et le benchmark N°5.

6.3.1.1 Présentation HAMSTAD benchmark N°2

Le premier *benchmark* présenté ici est le cas d'une couche de 20 cm composée d'un matériau homogène nommé *A*, lequel possède des propriétés thermiques plus ou moins performantes avec une teneur en humidité moyenne. Le matériau *A* se trouve initialement en équilibre avec l'air ambiant, avec une température et une humidité relative à l'instant initial de 20°C et 95% respectivement (teneur en humidité de $84,7687 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) [Hagentoft 2002]. Au cours de la simulation, le matériau est soumis à des conditions isothermiques, tandis qu'un flux de masse est induit par une différence d'humidité relative entre le matériau et l'air environnant des deux côtés de la paroi. D'autre part, la paroi est considérée comme étant complètement étanche vis-à-vis de l'air. La modélisation est effectuée sur 1000 heures, avec des observations de la teneur en humidité du matériau (w) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] à 100, 300 et 1000 heures. La figure 6.1 illustre les conditions de ce benchmark.

Concernant les conditions aux limites, comme expliqué précédemment, le matériau est soumis à des conditions isothermiques avec $T_{eq,i} = T_{eq,e} = T_m = 20^\circ\text{C}$. Concernant les conditions vis-à-vis de l'humidité, la surface intérieure est en contact avec un volume d'air ayant une humidité relative (φ_{int}) de 45% et la surface extérieure est en contact avec un volume d'air avec une humidité relative (φ_{ext}) égale à 65%. Les coefficients d'échange sont les mêmes à l'intérieur et à l'extérieur, correspondant à $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ pour le flux de chaleur ($h_{int} = h_{ext}$) et de $1 \cdot 10^{-03} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$) pour le flux de masse ($\beta_{int} = \beta_{ext}$). Les propriétés hygrothermiques du matériau *A* sont données dans le tableau 6.1.

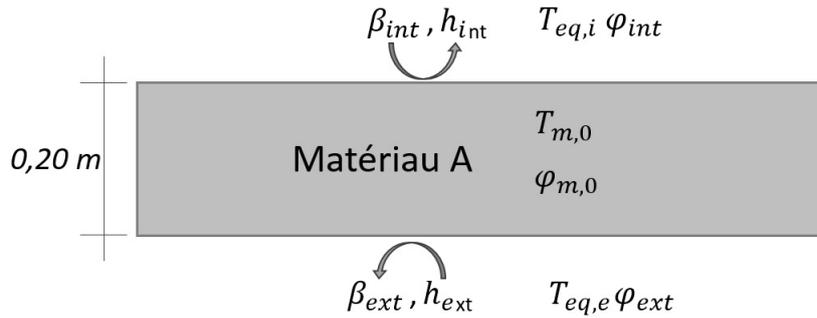


FIGURE 6.1 – Illustration du *benchmark* HAMSTAD N°2

Tableau 6.1 – Propriétés hygrothermiques du matériau A (figure 6.1) benchmark HAMSTAD N°2

Propriété Hygrothermique	Symbole	Unité	Valeur
Conductivité thermique	λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,15
Capacité spécifique	c_p	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	800
Densité	ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	252
Coef. de diffusion de vapeur	δ_p	s	$1\cdot 10^{-15}$
Coef. de diffusion de l'eau liquide	D_w	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$6\cdot 10^{-10}$
Isotherme de sorption	w	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	éq. (6.17)=f(φ)

$$w = \frac{116}{\left(1 - \frac{1}{0.118} \cdot \ln(\varphi)\right)^{0,869}} \quad (6.17)$$

Résultats benchmark N°2

Les résultats du modèle adopté sont tout d'abord comparés aux résultats obtenus par [Tariku *et al.* 2010] (figure 6.2), puis avec les résultats du projet HAMSTAD [Hagentoft 2002] (Figure 6.3). Les résultats obtenus avec le modèle implémenté sur COMSOL sont en très bon accord avec les résultats du *benchmark*.

Concernant le modèle, on constate un très léger écart dans les résultats à 100 et 300 heures qui n'est pas observé dans les résultats à 1000 heures (figures 6.2 et 6.3). Ce comportement peut, en partie, être expliqué par le méthode de calcul des échanges à la surface du matériau. Les conditions aux limites sont appliquées en terme de pression de vapeur, tandis que le transfert de masse est évalué en terme d'humidité relative (φ). Le passage d'un terme à l'autre (de φ_e vers $p_{v,e}$) peut générer des différences qui se traduisent par des écarts dans les premières heures de la simulation. Une autre hypothèse qui explique ce léger écart est liée à la discrétisation spatiale qui n'est pas suffisamment fine dans le modèle. Cependant le modèle donne des résultats en cohérence avec ceux du *benchmark* N°2.

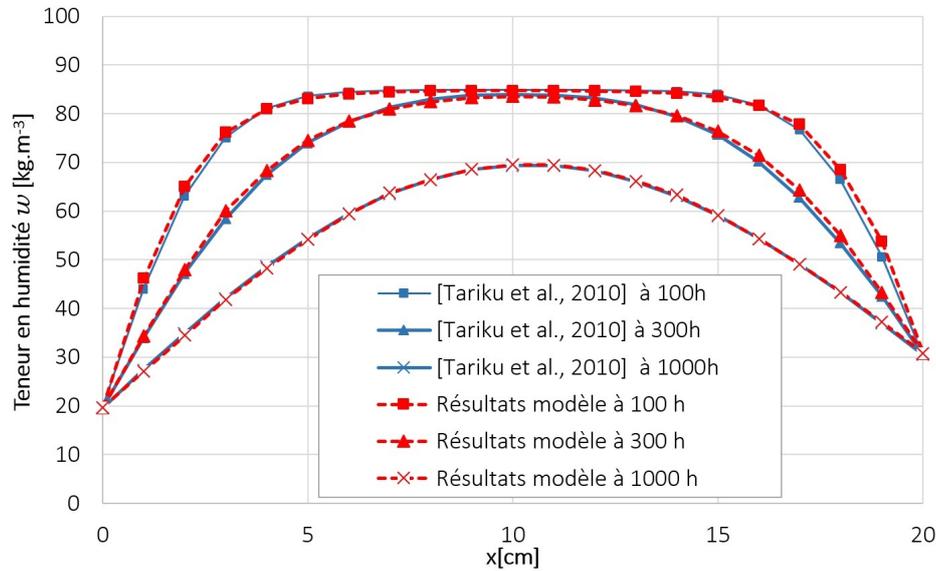


FIGURE 6.2 – Résultats *benchmark* HAMSTAD N°2. Comparaison avec les résultats obtenus par [Tariku *et al.* 2010]

6.3.1.2 Présentation HAMSTAD benchmark N°5

Le *benchmark* N°5 propose l'analyse des transferts de chaleur et de masse dans une paroi multicouche en brique (parois de 36,5cm d'épaisseur) avec isolation thermique intérieure (couche de 4cm) et une couche en mortier (couche de 1,5 cm) à l'interface de ces deux matériaux (figure 6.4), modélisée pendant une période de 60 jours. L'exercice présente trois caractéristiques particulières : (1) du point de vue hydrique, l'isolant a des propriétés capillaires actives¹⁰, (2) du point de vue thermique, à l'état sec, la brique et le mortier ont une conductivité thermique environ dix fois supérieures à celle de l'isolant. Cependant, la conductivité thermique de l'isolant et du mortier est liée à la teneur en humidité du matériau. Dans le cas de l'isolant, dans des conditions de saturation il perd ses propriétés de résistance thermique. Par exemple, quand la valeur de l'humidité relative atteint 90%, la conductivité thermique passe de $0,06\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ à environ $0,121\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, i.e. deux fois sa valeur à l'état sec. Lorsque le matériau est quasi saturé d'eau, la conductivité thermique est deux fois celle de la brique. Dans le cas de la brique, la conductivité thermique est considérée constante et indépendante de la teneur en humidité. La troisième caractéristique de ce benchmark est que la valeur de teneur en humidité à l'état de saturation (w_{sat}) est très élevée dans les trois matériaux, cependant l'isolant possède des propriétés hygriques qui le rend plus sensible à l'humidité.

10. Un matériau ayant des propriétés capillaires actives absorbe de l'humidité sous forme liquide jusqu'à atteindre un état de saturation appelé saturation capillaire [Künzel 1995]

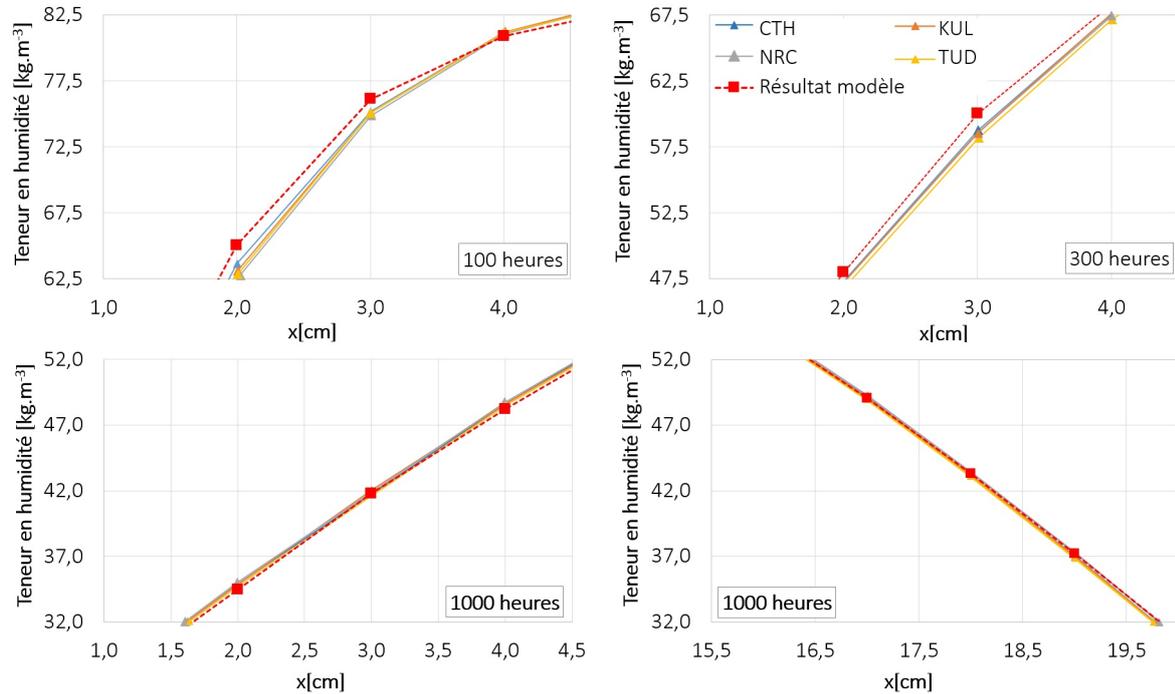


FIGURE 6.3 – Résultats benchmark HAMSTAD N°2. Comparaison avec les résultats obtenus par l'école polytechnique de Chalmers (CTH), l'Université de Leuven (KUL), le conseil national de recherches Canada (NRC) et l'Université technique de Dresden (TUD) [Hagentoft 2002]

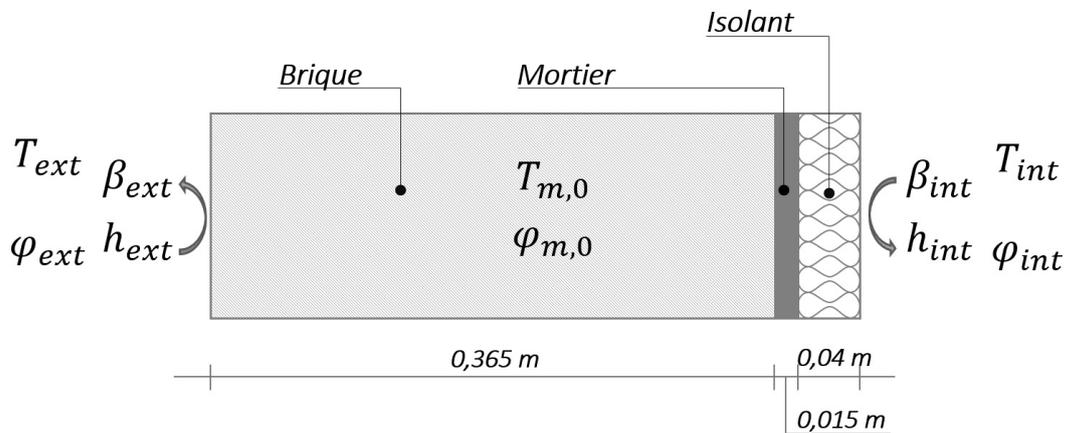


FIGURE 6.4 – Illustration benchmark HAMSTAD N°5

Les conditions initiales dans les trois matériaux sont : température $T_{m,0}$ égale à 25°C et humidité relative $\varphi_{m,0}$ égale à 60%. La paroi est exposée à une température extérieure T_{ext} de 0°C avec un coefficient d'échange thermique h_{ext} égale à $25\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; à l'intérieur la température T_{int} est égale à 20°C avec un coefficient d'échange thermique h_{int} de $8\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Concernant l'humidité relative, à l'extérieur φ_{ext} est égale à 80% avec un coefficient d'échange

124 Chapitre 6. Implementation : modèle de transferts de chaleur et de masse

de masse β_{ext} égale à $1,8382 \times 10^{-7} \text{s}\cdot\text{m}^{-1}$, l'humidité relative intérieure φ_{int} est égale à 60% avec un coefficient d'échange de masse β_{int} de $5,8823 \times 10^{-8} \text{s}\cdot\text{m}^{-1}$. Les propriétés hygrométriques des matériaux sont données dans le tableau 6.2 et dans l'annexe D.

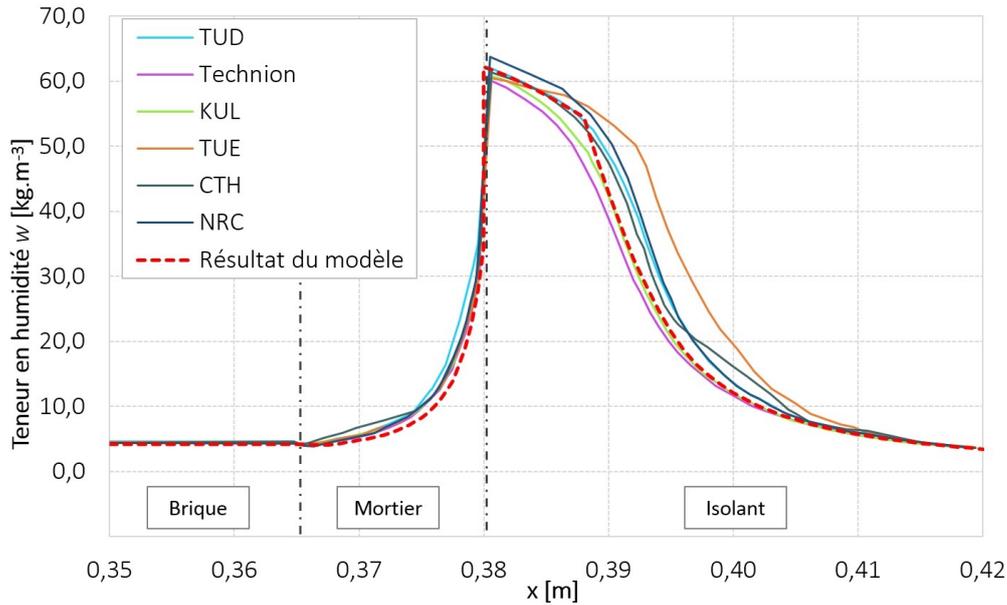
Tableau 6.2 – Propriétés hygrothermiques des matériaux (figure 6.4) benchmark HAMSTADN°5

Propriété Hygrothermique	Symbole	Unité	Brique	mortier	Isolant
Capacité spécifique	c_p	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1000	920	1000
Densité	ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1600	230	212
Conductivité thermique	λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	éq. (D.1)=f(w), AnnexeD		
Isotherme de sorption	w	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	éq. (D.2)=f(T, φ), AnnexeD		
Coef. de diffusion de vapeur	δ_p	s	éq. (D.3)=f(T, w), AnnexeD		
Coef. conduction l'eau liquide	K_w	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	éq. (D.5)=f(w), AnnexeD		

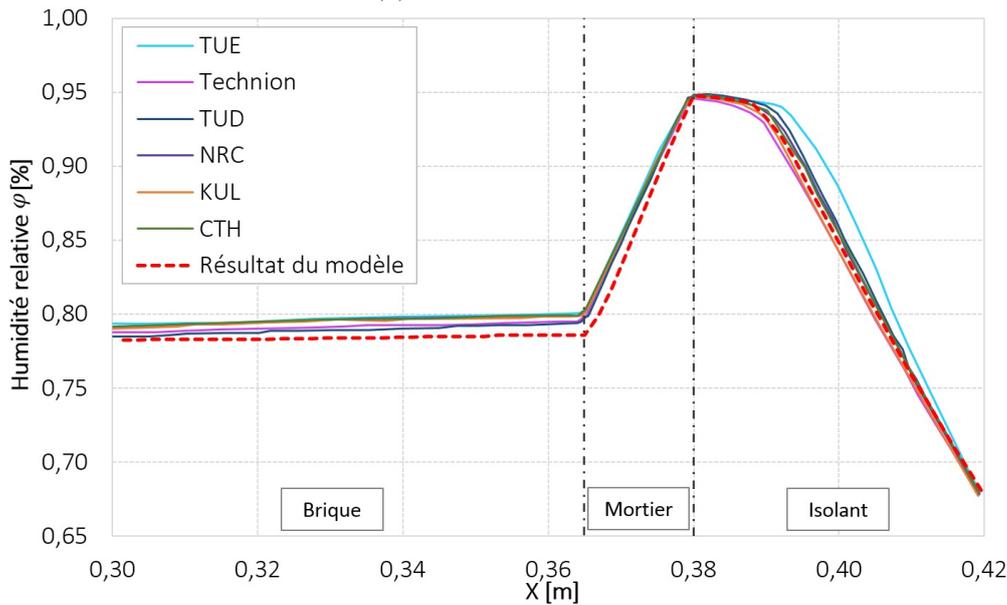
Résultats benchmark N°5

Comme indiqué dans l'énoncé du *benchmark*, la modélisation a été lancée pour une période de 60 jours, cependant seuls les résultats du dernier pas de temps sont présentés pour la clarté du graphique. Dans les figures 6.5a et 6.5b sont présentés les résultats de la teneur en humidité (w) et de l'humidité relative (φ) de la paroi, obtenus avec le modèle adopté et les résultats obtenus par les participants du benchmark. On constate des écarts générés dans l'ensemble des résultats, notamment dans la couche isolante (figure 6.5a). Cet écart peut être expliqué par le fait que la résolution numérique adoptée par chaque participant du benchmark pour résoudre les équation du modèle de transfert de chaleur et de masse n'est pas forcément la même. D'autre part, la discrétisation spatiale et temporelle étant différente dans l'ensemble des solutions, cela peut conduire à des différences dans les résultats. Cependant, concernant les résultats obtenus avec le modèle on constate que la courbe suit une évolution similaire à celle trouvée par les autres participants, le modèle est donc en bon accord avec les résultats du benchmark.

L'adoption des deux *benchmarks* développés dans le cadre du projet HAMSTAD a permis de vérifier la fiabilité du modèle développé pour évaluer le transfert de chaleur et d'humidité dans des parois multicouches.



(a) Teneur en humidité



(b) Humidité relative

FIGURE 6.5 – Résultats benchmark HAMSTAD N°5 à 60 jour. Comparaison avec les résultats obtenus par : l'Université technique de Dresden (TUD), Le Technion - Institut israélien de technologie (Technion), l'Université de Leuven (KUL), L'Université technique d'Eindhoven (TUE), l'école polytechnique de Chalmers (CTH) et le conseil national de recherches Canada (NRC) [Hagentoft 2002]

Cas d'étude : caractéristiques des parois

Dans ce chapitre sont présentées les configurations des parois avec isolation thermique par l'intérieur (ITI) et par l'extérieur (ITE) et qui feront l'objet d'analyse dans le chapitre 8. Dans cette partie sont également présentées les propriétés hygrothermiques des matériaux constituant les configurations étudiées, ainsi que les conditions dans lesquelles les simulations ont été menées (conditions initiales et conditions aux limites) et les variables étudiées.

7.1 Description des configurations

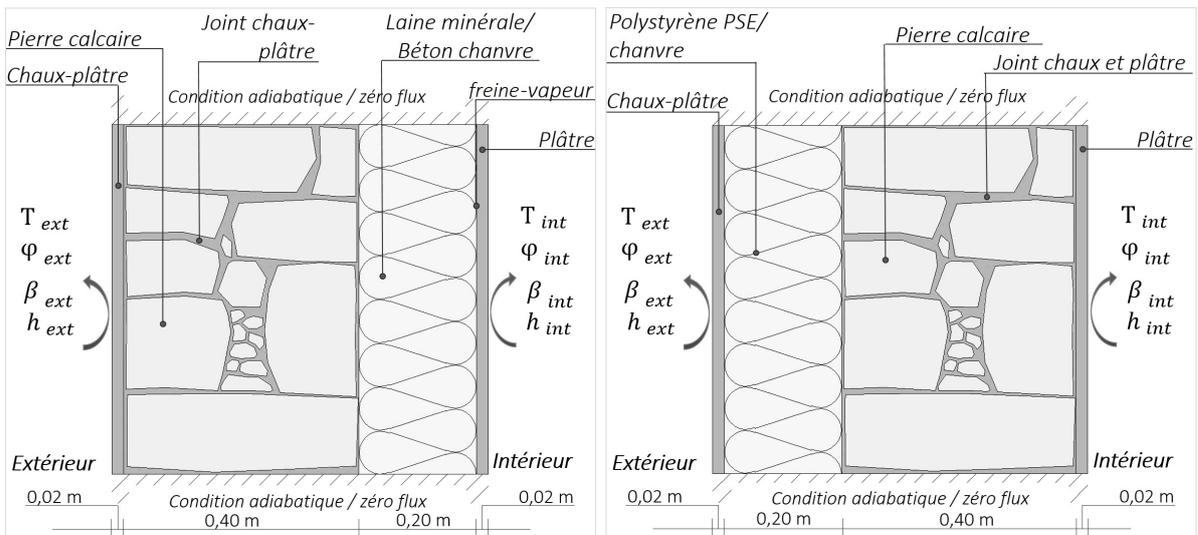
Comme mentionné aux chapitres 1.1 et 4.2, en France le caractère local des techniques et des matériaux de constructions anciens ont donné lieu à des typologies de parois très diversifiées. À Paris, les bâtiments existants construits avant 1914 sont majoritairement en maçonnerie en pierre calcaire [Bigorgne *et al.* 2011]. Cette typologie connaît également une diversité des parois en fonction du type de pierre (e.g., pierres tendres, semi-tendres, dures) et de leur disposition dans le mur (e.g., apparente, revêtue). Dans les logements étudiés, la façade principale (exposée sud) est constituée de moellons ébauchés (i.e., non standardisés) à deux parements. Comme résultat de cette disposition des pierres, les parois ont de grandes épaisseurs (parfois supérieures à 40 cm) avec des profils très hétérogènes qu'il convient d'étudier plus en détail (figures 4.4(a) et 7.1).

Les murs des façades étudiées dans cette partie sont constitués de moellons en calcaire, hourdés avec du mortier à base de chaux et de plâtre, joints et revêtement extérieur de même nature et le revêtement intérieur en plâtre. Sur ces parois, de l'isolation thermique a été installée avec deux techniques distinctes, suivant la position de la couche isolante (figures 7.1a et 7.1b) : (i) isolation thermique par l'intérieur (ITI) avec laine minérale et (ii) isolation thermique par l'extérieur (ITE) avec du polystyrène (PSE¹). Ces deux solutions ont été comparées à des parois isolées par l'intérieur et par l'extérieur avec du béton de chanvre formulation HLC1² [Samri 2008] (exposée dans la section 7.1.1.3). Des configurations ou cas d'études ont été créés à partir de ces quatre compositions de parois à quatre couches

1. PSE : mousse expansée à cellules fermées; EPS Expanded polystyrene (en anglais)

2. De l'anglais Hemp Lime Concrete (HLC)

(revêtement intérieur et extérieur, pierre calcaire et isolant en ITI³ ou ITE) lesquelles constituent les parois de référence. Les configurations décrites et illustrées dans le tableau 7.1 ont été construites en variant la direction (verticale, horizontale, combinée) et la part volumique des joints (5%, 10% et 20%) par rapport à la pierre calcaire afin d'évaluer leur effet sur la performance (hygrothermique) globale du mur. Sur la base de quatre types de murs isolés (parois de référence), 17 configurations ont été modélisées, i.e., un total de 68 configurations sont évaluées et comparées entre elles.



(a) Configuration de la paroi de référence avec isolation thermique par l'intérieur (ITI)

(b) Configuration de la paroi de référence avec isolation thermique par l'extérieur (ITE)

FIGURE 7.1 – Composition des parois de référence : parois anciennes rénovées avec isolation thermique par l'intérieur (ITI) et par l'extérieur (ITE). Conditions aux limites et dimensions des couches

7.1.1 Présentation des matériaux

Comme mentionné précédemment, la façade des logements étudiés est constituée de moellons ébauchés à deux parements, sur laquelle on a installé une isolation thermique par l'intérieur dans un des logements et par l'extérieur dans l'autre. Les matériaux des parois étudiées sont présentés ci-après.

3. Pour la paroi avec isolation thermique par l'intérieur un frein-vapeur est mis entre le revêtement intérieur et la couche isolante

Tableau 7.1 – Configurations des parois. Part volumique et direction du joint. N° de référence des configurations modélisées pour chaque parois de base (en ITI et en ITE)

Typologie de paroi ⁱ	Position joint	Proportion joint			Référence configuration
		5%	10%	20%	
	-	-	-	-	0P ⁱⁱ
	Horizontale	oui	oui	oui	5P1H 10P1H 20P1H
	Horizontale	oui	oui	oui	5P2H 10P2H 20P2H
	Verticale	oui	oui	oui	5P1V 10P1V 20P1V
	Verticale	oui	oui	oui	5P2V 10P2V 20P2V
	Horizontale Verticale	Non	Oui	Oui	102H1Va ⁱⁱⁱ 102H1Vb ^{iv} 202H1Va 102H1Vb

(i) Dans la couche constituée de pierre calcaire et de joints

(ii) Couche de pierre calcaire monolithique

(iii) Deux joints horizontaux et un joint vertical : proportion du joint vertical deux fois plus épais que les joints horizontaux

(iv) Deux joints horizontaux et un joint vertical : proportion des joints horizontaux deux fois plus épais que le joint vertical

7.1.1.1 Matériaux paroi ancienne

Les couches constituant la partie existante sont de la pierre calcaire et de l'enduit à base de plâtre-chaux (dans les modélisations on a conservé le même type d'enduit extérieur et du plâtre à l'intérieur). Concernant la pierre calcaire, [Denfer 1891] décrit la maçonnerie de moellons utilisée dans le bâtiment à Paris comme étant de pierres calcaires de trois

types utilisées suivant leurs fonctions : (i) les pierres dures employées dans les fondations et soubassement, (ii) les pierres demi-dures (ou traitables) utilisées dans le corps des murs et (iii) les moellons tendres utilisés principalement pour la partie haute. D'autre part, dans le chapitre 5.2.3 les propriétés thermiques ont été ajustées dans le processus de calage du modèle (à l'échelle du bâtiment) de manière à réduire les écarts entre les données mesurées et les simulées. En comparant les propriétés retenues dans la simulation, on constate que celles-ci correspondent aux propriétés de pierres classés entre semi-dures et tendres. Ce constat a permis d'identifier un type de pierre avec des propriétés thermiques proches, afin de pouvoir compléter l'information concernant les propriétés hygriques, lesquelles sont données dans le chapitre 7.1.2.

Concernant la composition de l'enduit et du mortier (utilisés dans le revêtement et les joints), une analyse chimique réalisée sur des échantillons prélevés pendant la rénovation du bâtiment où sont localisés les logements étudiés, indique que ces matériaux sont composés d'environ 10% de chaux et 90% de plâtre. Ces valeurs ont été obtenues dans le cadre d'une étude menée par [Velazques & Calberg-Ellen 2014]. Cependant dans son étude, [Velazques & Calberg-Ellen 2014] ne donnent pas de précisions concernant la formulation de la chaux, ni la composition de l'enduit utilisé à l'extérieur. Cette information laisse néanmoins entrevoir la nature des mortiers et des enduits utilisés dans le bâtiment étudié, laquelle est confirmée grâce aux travaux réalisés dans le bâtiment ancien tels que ceux réalisés par [Cantin & Guarracino 2012], [MEDDE 2013], [Royet *et al.* 2007]. La formulation des enduits et mortiers utilisés dans les constructions anciennes correspond à une formulation de chaux aérienne, de plâtre gros, de sable et d'eau⁴. Le plâtre gros est le plus adéquat pour des applications extérieures, car à la différence des plâtres fins (donnant des enduits plus poreux, ils sont utilisés à l'intérieur), il ne risque pas de se dégrader en présence d'humidité. Dans la modélisation, on a conservé la même formulation pour l'enduit extérieur et pour le mortier des joints. Du point de vue hygrique, la chaux aérienne⁵ est caractérisée par une hygroscopicité élevée, avec une résistance à la vapeur d'eau faible. Concernant le plâtre utilisé à l'intérieur, il a une hygroscopicité moyenne avec une résistance à la vapeur faible, par contre ce matériau présente une capillarité élevée [MEDDE 2013].

7.1.1.2 Matériaux d'isolation mis en place

Dans la rénovation thermique des logements deux solutions ont été retenues : (i) Polystyrène expansé (PSE) installé sur la façade rénovée avec de l'isolation thermique par l'extérieur et (ii) laine minérale sur la façade rénovée avec de l'isolation thermique par l'intérieur. Le polystyrène PSE est un matériau fabriqué à partir de molécules de styrène (par polymérisation), issues du raffinage du pétrole brut. Le polystyrène contient 98% d'air d'où sa légèreté

4. Proportions le plus souvent utilisées pour l'utilisation de cet enduit dans la rénovation : trois volumes de plâtre gros, deux volumes de sable, un volume de chaux aérienne, un volume et demi d'eau de gâchage <http://caue78.archi.fr/IMG/pdf/BAT.pdf>

5. La chaux hydraulique n'est pas un matériau adéquat pour la rénovation de façades anciennes, car les propriétés sont proches de celles du ciment (durcit avec de l'eau), le combinant au plâtre produit une réaction chimique qui se manifeste par le gonflement de l'enduit

avec une masse volumique d'environ $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [Yucel *et al.* 2003]. Le polystyrène possède des propriétés quasi étanches vis-à-vis de la vapeur d'eau. La laine minérale, obtenue de la fusion du verre, de la roche ou du laitier⁶, est un matériau constitué de fibres minérales à orientation aléatoire. À la différence du polystyrène, la laine minérale a une faible résistance à la diffusion de la vapeur, et une faible capacité de teneur en humidité, l'eau entrant dans son sein se condense rapidement. Afin d'éviter l'infiltration de l'eau dans le matériau, la laine minérale est soumise à des traitements d'hydrophobisation⁷ [Jiříčková *et al.* 2006], [Dugué *et al.* 2010].

7.1.1.3 Scénario : Béton de chanvre

Le béton de chanvre est un matériau de construction utilisé principalement pour ses propriétés isolantes. Ce matériau est constitué d'un granulats d'origine végétale, d'un liant à base de chaux hydraulique et aérienne et d'eau. Le granulats du béton de chanvre, appelé chènevotte, est constitué de particules de chanvre lesquelles possèdent une structure interne formée par des vides intra-particules occupant environ 78% du volume total de la particule, d'où sa légèreté. Le chènevotte se présente sous forme de copeaux de bois avec des tailles qui varient entre 5 et 15 mm et d'épaisseur inférieure à 2mm (avec de légères variations selon le processus de fabrication), et une masse volumique des particules d'environ $320 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. La forte porosité de la chènevotte lui concède une grande capacité d'adsorption d'eau sous forme liquide (jusqu'à 400% du poids initial à sec) et de vapeur d'eau [Cerezon 2005], [Samri 2008]. Dans le cadre de cette thèse, les propriétés du béton de chanvre ont été obtenues des travaux réalisés par [Samri 2008] avec la formulation HLC1. Cette formulation, utilisée pour l'isolation des murs, est caractérisée par un dosage en liant intermédiaire (avec part volumique faible). La dénomination commerciale du liant utilisé dans le béton de chanvre HLC1 est tradical PF70⁸, composé à 37% de chaux hydraulique et 63% de chaux aérienne (chaux grasse), lui conférant des propriétés de perméabilité vis-à-vis de la vapeur d'eau. La masse volumique du HLC1 (matériau sec) est de $430 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. On constate que la masse volumique du béton de chanvre est relativement proche de celle des particules, ceci est dû à l'arrangement entre les particules lesquelles au moment du dosage laissent des vides avec le liant. Pour une formulation HLC1 la part volumique de l'air correspond à 71,5%, 17,4% de liant (PF70) et 11,1% de chènevotte [Samri 2008].

7.1.2 Propriétés hygrothermiques des matériaux

Dans les simulations réalisées à l'échelle des logements (dont les résultats sont exposés au chapitre 5.2), les propriétés thermiques des matériaux (issues de la littérature et de la base de données du logiciel WUFI) sont constantes. Ceci s'explique, en partie, par le fait que les échanges de masse entre les parois ont été négligés. Cependant dans la modélisation des transferts de chaleur et de masse à l'échelle de la paroi, l'effet de l'humidité et de la température doit être pris en considération. Des informations supplémentaires sont alors

6. Coproduit de la métallurgie, obtenu de la fusion des particules non-métalliques formées dans les hauts fourneaux. <http://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-93/ed93.pdf>

7. Application de substances pour rendre le matériau hydrophobe

8. fournisseur Balthazard et cote bâtiment BCB

nécessaires afin d'évaluer le flux de chaleur et de masse traversant la paroi (e.g. la variation de la conductivité thermique λ en fonction de la teneur en humidité dans le matériau). Dans ce chapitre les propriétés hygriques des matériaux sont également exposées et discutées.

D'autre part, à la différence des parois simulées dans la partie II, dans cette partie, les configurations de parois sont construites en respectant les dimensions des couches et non pas par la résistance thermique. Toutes les configurations ont une couche isolante de 20cm, une couche de pierre calcaire (et joints) de 40cm et des couches de revêtement de 2cm de chaque côté des surfaces pour une épaisseur totale de 64cm. Cette approche permet de comparer le comportement des différentes solutions par leur performance hygrothermique sur la même base géométrique. L'intérêt de conserver une géométrie dans l'ensemble des configurations repose sur un critère pratique : tout d'abord⁹, si les couches isolantes sont simulées avec une même résistance thermique, cela mettrait en avant l'aspect thermique et il serait plus difficile de comparer les configurations également sur l'aspect hygrique. D'autre part, dans la rénovation des constructions anciennes il peut exister une contrainte spatiale pour la mise en place d'un isolant. Si l'on cherche à avoir une même résistance thermique, les matériaux tels que le béton de chanvre (dont la conductivité thermique λ est environ 3 fois supérieure à celle du polystyrène et de la laine minérale), auraient besoin de compenser la différence de résistance par l'épaisseur.

7.1.2.1 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des matériaux constituant les parois sont données dans le tableau 4.2 du chapitre 5.2.3 (à l'exception des propriétés du chanvre HLC1 qui sont données dans le tableau 7.3). La densité de flux traversant chacune des couches de la paroi dépend entre autre¹⁰ de la conductivité thermique (λ) du matériau. La valeur de la conductivité thermique est donnée comme étant une valeur constante, souvent pour le matériau à l'état sec et dans une plage de températures données. Cependant λ est dépendant de la température et de l'humidité du matériau. Concernant la dépendance à la température, pour un grand nombre de matériaux de construction λ ne varie que très légèrement [Künzel 1995], l'effet direct de la température sur λ est donc négligé dans le modèle adopté. Concernant la dépendance de λ par rapport à l'humidité, l'eau emmagasinée dans les pores possède une conductivité thermique jusqu'à 24 fois supérieure à celle de l'air occupant les pores à l'état sec, elle doit donc être prise en considération dans le modèle [Künzel 1995]. Il existe une relation linéaire entre la conductivité thermique λ et la teneur en humidité du matériau, donnée par l'expression (7.1).

$$\lambda_{humid} = \lambda_{sec} + (c_{pente} \cdot w) \quad (7.1)$$

9. Sachant que la couche constituée de pierre calcaire (paroi ancienne) possède une épaisseur proche de celui en place : 40 ± 2 cm

10. L'évaporation et la condensation ont également un effet sur le flux de chaleur, cependant elles ne sont pas directement définies dans l'équation de transfert de chaleur par conduction, mais introduites à travers la chaleur latente de changement de phase.

λ_{humid} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] correspond à la conductivité thermique du matériau en fonction de la teneur en humidité; λ_{sec} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] est la conductivité thermique du matériau sec (donnée dans le tableau 4.2); c_{pente} est un coefficient calculé à partir de la pente générée entre la conductivité thermique du matériau sec et la conductivité thermique du matériau humide¹¹, sa valeur est donnée dans le tableau 7.2; w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] est la teneur en humidité du matériau.

Tableau 7.2 – Coefficient c_{pente} : valeur de la conductivité thermique en fonction de la teneur en humidité dans le matériau

Matériau	λ_{sec} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	c_{pente}
Pierre calcaire	0,870	$7,00\cdot 10^{-3}$
Plâtre	0,600	$4,80\cdot 10^{-3}$
Mortier plâtre/chaux	0,670	$4,2\cdot 10^{-3}$
Polystyrène PSE ¹²	0,036	-
Laine minérale	0,036	$6,71\cdot 10^{-5}$

Concernant les propriétés thermiques du béton de chanvre HLC1, elles sont données dans le tableau 7.3. En comparaison avec les autres types d'isolant (dont le polystyrène PSE et la laine minérale, tableau 4.2) le béton de chanvre possède une conductivité thermique environ 2,8 plus élevée que les isolants mis en place, mais avec des propriétés plus performantes vis-à-vis de l'humidité (discutées dans le chapitre 7.1.2.2).

Tableau 7.3 – Propriétés thermiques du béton de chanvre HLC1

Conductivité Thermique λ	Masse volumique ρ	Capacité thermique c_p	Diffusivité thermique α
[$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	[$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	[$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
0.105	430	1000	2,442E-07

La conductivité thermique (λ) du béton de chanvre HLC1 en fonction de l'humidité, [Samri 2008] abouti à l'expression (7.2) qui permet de calculer l'évolution de λ en fonction de la teneur en humidité massique u [%]. Ce dernier terme est obtenu par le rapport de la teneur en humidité du matériau et sa masse volumique ($u = w/\rho$) :

$$\lambda_{HLC1} = \lambda_{sec} + (0,35 \cdot u) \quad (7.2)$$

7.1.2.2 Propriétés hygriques

Comme mentionné précédemment, les propriétés thermiques des matériaux constituant les parois analysées dans cette partie, sont celles obtenues dans le calage du modèle à l'échelle du

11. La valeur de ce coefficient est calculée à partir de la base de données du logiciel WUFI

bâtiment (partie II). Des matériaux ayant de propriétés thermique proches de celles obtenues dans la calage du modèle ont été identifiés dans la base de données du logiciel WUFI et [Trechsel 2001], afin de compléter les propriétés hygriques. Ces propriétés sont exposées ci-après.

Diffusion à la vapeur d'eau

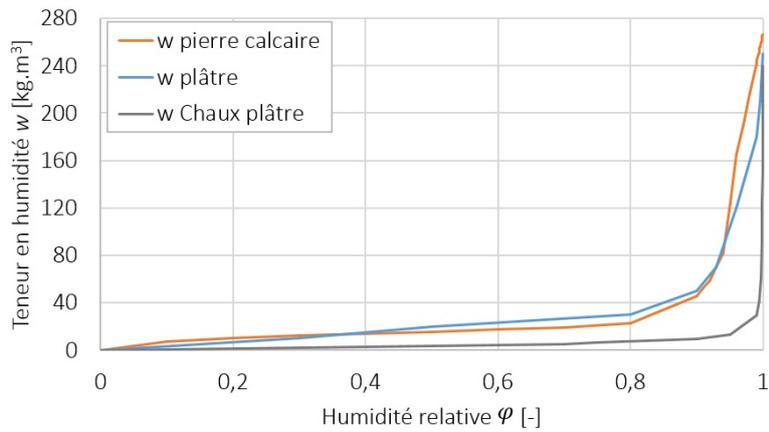
Concernant les valeurs de diffusion à la vapeur d'eau, on constate que le polystyrène PSE possède la plus grande résistance à la vapeur d'eau, contrairement à la laine minérale qui présente la résistance à la vapeur d'eau la plus basse par rapport aux autres matériaux analysés. Cette propriété a des effets importants sur la vitesse de migration de l'humidité au sein du matériau (tableau 7.4).

Tableau 7.4 – Propriétés hygriques des matériaux : résistance à la vapeur d'eau μ_m et coefficient de transmission de vapeur δ_p (équation (1.4))

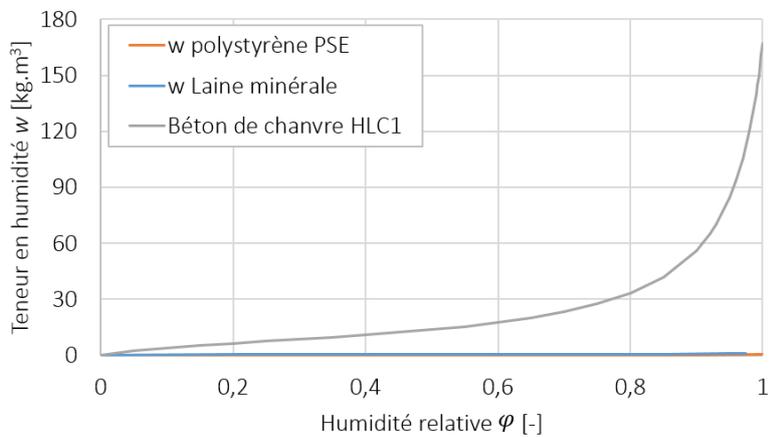
Matériau	Résistance à la vapeur d'eau μ [-]	Coefficient de diffusion δ_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$]
Pierre calcaire	36	$5,00\cdot 10^{-12}$
Plâtre	6,3	$2,86\cdot 10^{-11}$
Mortier plâtre/chaux	7	$2,57\cdot 10^{-11}$
Polystyrène PSE	70	$2,57\cdot 10^{-12}$
Laine minérale	1,4	$1,27\cdot 10^{-10}$
Béton de chanvre HLC1	11,5	$1,56\cdot 10^{-11}$

Teneur en humidité

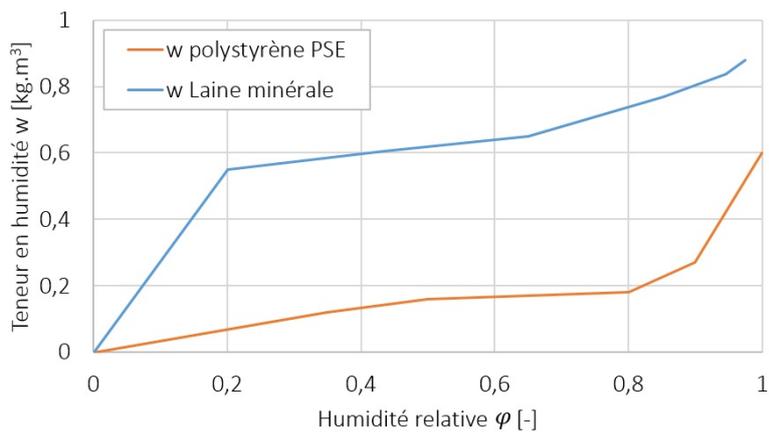
Dans la figure 7.2 sont illustrées les isothermes de sorption (en fonction de l'humidité relative (φ)) pour l'ensemble des matériaux étudiés. On observe que les matériaux constituant la couche de pierre calcaire (avec les joints) et les revêtements (intérieur et extérieur) des parois, présentent une grande capacité à stocker de l'humidité. Dans le cas du béton de chanvre HLC1, le profil de teneur en humidité est très proche de celui des matériaux anciens (figures 7.2a et 7.2b). Concernant les matériaux d'isolation, le polystyrène PSE et la laine minérale, les isothermes de sorption varient entre 0 et $0,9\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (humidité relative (φ) entre 0 et 1), i.e., à l'état de saturation le polystyrène PSE n'accueille qu'environ 2,4% de son poids et la laine minérale environ 1,45%, ils ont tous les deux une très faible capacité à stocker de l'humidité. Cependant à la différence du polystyrène, la laine minérale reste très sensible à la vapeur d'eau (avec une résistance à la vapeur d'eau très basse en comparaison aux autres matériaux analysés), ceci à cause des vides d'air séparant les fibres du matériau. La vapeur d'eau entrant dans le matériau se condense très rapidement. [Vrána 2007] a mis en évidence cette sensibilité à l'humidité pour différentes densités de laine minérale auxquelles un agent protecteur est appliqué (figure 7.3).



(a) Pierre calcaire, plâtre et chaux plâtre



(b) Béton de chanvre HLC1, polystyrène et laine minérale



(c) Laine minérale et polystyrène [Kumaran 1996]

FIGURE 7.2 – Teneur en humidité w des matériaux constituant les parois modélisées [Samri 2008] et WUFI [Fraunhofer IBP 2014]

D'autre part, on constate que dans la zone hygroscopique (définie dans le chapitre 3.1.2), la pierre calcaire, l'enduit en plâtre et en chaux plâtre (particulièrement ce dernier) ont une faible capacité d'adsorption, mais celle-ci augmente dans la zone capillaire. À la différence de ces matériaux, on constate que dans le béton de chanvre HLC1 la capacité d'absorption dans la zone hygroscopique est plus élevée que dans l'ensemble des matériaux.

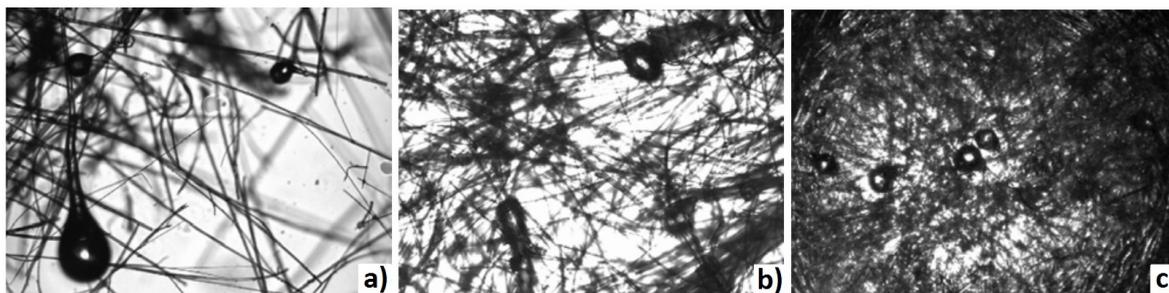


FIGURE 7.3 – Structure microscopique de la laine minérale pour différentes densités a) $44 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, b) $112 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et c) $145 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [Vrána 2007]

7.2 Description des conditions aux limites et initiales

7.2.1 Conditions aux limites

Afin d'évaluer le comportement hygrothermiques des parois, trois types de conditions aux limites ont été appliquées : (i) échelon, (ii) sinusoïdales, et (iii) des conditions basées sur des données météorologiques à Paris : “cas 2014” et “vague de chaleur”. Les deux premières conditions permettent d'analyser le comportement hygrothermique et l'effet des joints dans les parois rénovées, de manière globale à travers l'application de la méthode d'analyse des données ACP (décrite dans le chapitre 3.4.2). Le choix des conditions (i) et (ii) est fait afin de vérifier la cohérence des résultats dans l'ACP, pour ensuite étudier les parois soumises à des conditions météorologiques à Paris (iii).

Concernant les conditions échelon et sinusoïdale, elles sont appliquées aux configurations décrites dans le tableau 7.1. Dans ce cas, les simulations ont été réalisées pour dix jours. Ces conditions sont divisées en deux périodes : une première période durant laquelle le signal, type échelon ou sinusoïdale, est appliquée à la surface extérieure : pour la condition échelon cette première période est de 48 heures et de 96 heures dans le cas des conditions sinusoïdales. Cette première période est suivie d'une deuxième dans laquelle les conditions restent constantes jusqu'à la fin de la simulation (240 heures) afin d'observer la réponse des configurations et leur cinétique pour atteindre l'équilibre. Étant donné que l'équilibre hygrothermique (suite à ces perturbations) diffère potentiellement dans chaque configuration, une limite de temps de simulation est donnée à la fin de laquelle on observe l'évolution de la grandeur étudiée. Concernant les conditions à la surface intérieure dans (i) et (ii), elles

restent constantes. Ceci afin d’observer le temps qui prend le front de chaleur et de masse à traverser les couches constituant les configurations.

Concernant les conditions aux limites basées sur les données météorologiques à Paris deux types sont étudiés : (a) les premières conditions sont obtenues des simulations réalisées à partir des données enregistrées en 2014 à l’échelle des logements ITI et ITE et de la station météo. Ces conditions seront appelées par la suite conditions “cas 2014” (b) les deuxièmes conditions correspondent à des conditions en “vague de chaleur”. Les données des conditions extérieures ont été obtenues avec le logiciel Meteonorm et les conditions intérieures sont le résultat des simulations en vague de chaleur exposées dans la partie II de cette thèse.

D’autres part, comme exposé au chapitre 6.1.2, les conditions aux limites appliquées aux surfaces sont de troisième espèce, i.e., les échanges entre la paroi et l’air environnant est déterminé par un flux convectif. Dans le tableau 7.5 sont donnés les coefficients d’échange des transferts de chaleur et de masse aux surfaces intérieures et extérieures. Ces coefficients ont été adoptés dans les trois types des conditions aux limites.

Tableau 7.5 – Coefficients d’échange de chaleur et de masse aux surfaces intérieure et extérieure ([Künzel 1995])

Coefficient d’échange thermique [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]		Coefficient d’échange de masse [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$]	
h_{int}	h_{ext}	β_{int}	β_{ext}
8	17	$25 \cdot 10^{-9}$	$75 \cdot 10^{-9}$

7.2.1.1 Condition aux limites échelon

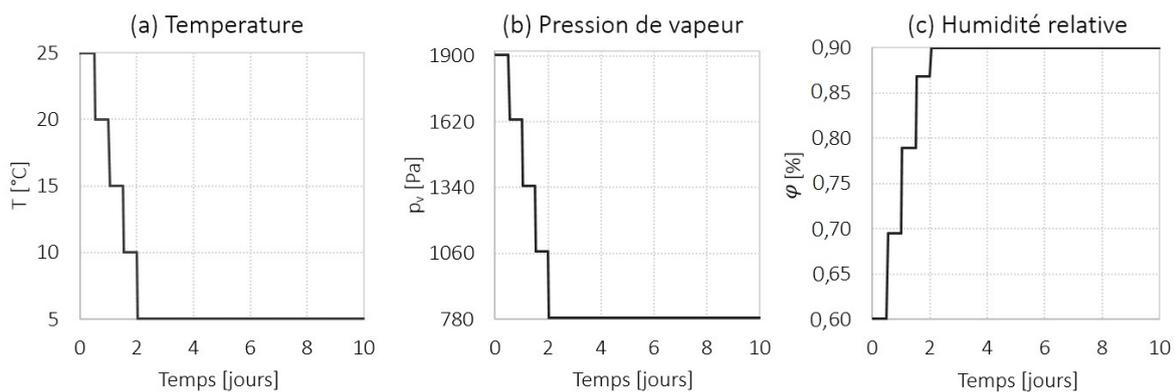


FIGURE 7.4 – Conditions aux limites type échelon

La condition aux limites type échelon appliquée à la surface extérieure correspond à une baisse de température progressive de 25°C à 5°C (figure 7.4a) durant une période de

deux jours; après cette période, la température reste constante à 5°C pendant huit jours. Concernant l'humidité relative, elle augmente de 60 à 90% (figure 7.4c) durant deux jours et reste constante (à 90%) pendant huit jours. La pression de vapeur varie de 1904,12 Pa à 785,87 Pa (figure 7.4b). Concernant la condition aux limites à l'intérieur, elle est constante et égale à celle appliquée à l'instant initiale : température à 25°C , humidité relative à 60% et pression de vapeur à 1904,12 Pa.

Concernant les conditions initiales, l'ensemble des couches est soumis à la même condition initiale. Elle correspond à la valeur de la condition aux limites extérieure à l'instant t_0 , i.e., une température de 25°C et une humidité relative de 60%.

7.2.1.2 Condition aux limites sinusoïdales

À l'instant initial et durant une période de six heures, le matériau est en équilibre hygrothermique avec son environnement, puis une condition sinusoïdale (cyclique) est appliquée à la surface extérieure durant une période de quatre jours (cycles de 24 heures), avant de reprendre une valeur constante durant les six jours suivants. Les quatre cycles ont été choisis afin d'observer l'évolution avec des possibles augmentations ou diminutions progressives dans chaque cycle de la grandeur étudiée (chapitre 7.6). Les figures 7.5a, 7.5b et 7.5c montrent respectivement les conditions aux limites en terme de température (variant entre 20 et 5°C), de pression de vapeur (variant entre 1171,31 et 698,55Pa) et d'humidité relative (variant entre 50 et 80%). Concernant les conditions intérieures, elles restent constantes durant toute la période de simulation, égales à 20°C par rapport à la température, et 50% concernant l'humidité relative.

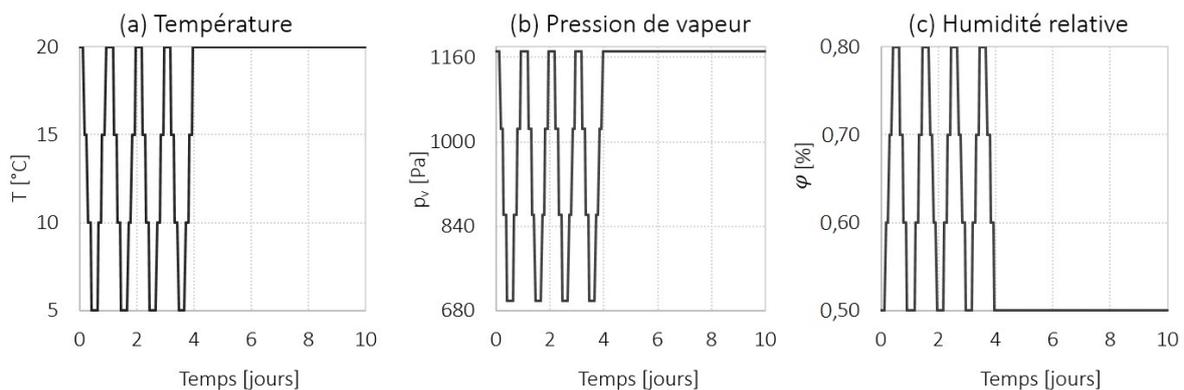


FIGURE 7.5 – Conditions aux limites sinusoïdale

Concernant les conditions initiales, comme dans le cas précédent, l'ensemble des couches est soumis à la même condition initiale. Elle correspond à la valeur de la condition aux limites extérieure à l'instant initial, i.e., une température de 20°C et une humidité relative de 50%.

7.2.1.3 Conditions aux limites basées sur des données météorologiques à Paris : “cas 2014” et “vague de chaleur”

Comme exposé précédemment, les résultats des simulations des configurations soumises à des conditions type échelon et sinusoïdales sont analysés à l’aide de la méthode ACP. Une fois l’analyse réalisée, des conditions aux limites issues des conditions météorologiques à Paris sont appliquées. Ces conditions sont les résultats des simulations menées à l’échelle des logements qui ont été exposées dans la partie II de cette thèse. Deux types des conditions sont alors appliquées aux surfaces des parois rénovées avec ITI et ITE :

- Conditions “cas 2014” qui correspondent aux résultats de simulations obtenues à l’aide de données enregistrées durant l’année 2014 et qui ont permis de réaliser le calage du modèle à l’échelle des logements (chapitre 5.2).
- Conditions “vague de chaleur” qui correspondent aux résultats obtenus lors de l’analyse de logements soumis à des conditions extrêmes de chaleur (chapitre 5.4).

Les deux types de conditions, en terme de température (T) et d’humidité relative (φ), sont données dans les annexes E (conditions “cas 2014”) et F (conditions “vague de chaleur”). Concernant les conditions initiales des parois ITI et ITE, elles correspondent à la valeur de T et φ à l’instant initial des conditions appliquées à la surface intérieure.

7.3 Variables étudiées

Afin d’évaluer le comportement hygrothermique des configurations, cinq variables sont étudiées en plusieurs points (figure 7.6) :

- Flux de chaleur [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] : surface intérieure
- Flux de masse [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] : surface intérieure
- Humidité relative (φ) [-] et Température (T) [$^{\circ}\text{C}$] : quatre points d’observation (huit dans le cas des parois avec joints horizontales). Dans le cas d’isolation thermique par l’intérieur (ITI) un point d’observation additionnel est pris entre le revêtement intérieur et le frein-vapeur.
- Teneur en humidité (w) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] : dans la pierre calcaire. Ceci comme indicateur du comportement de la couche isolante en contact avec la pierre.

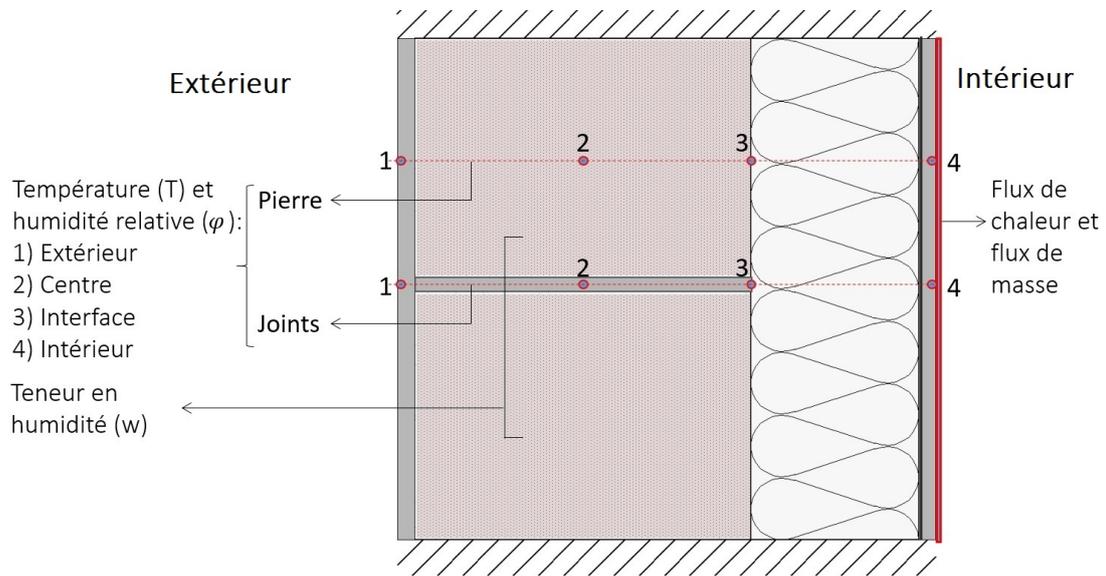


FIGURE 7.6 – Points d'observation des variables étudiées

Concernant les résultats de simulations des parois soumises aux conditions “cas 2014” et “vague de chaleur”, les variables étudiées sont groupées en analyses hygrique et thermique. Dans ce cas, on étudie d’abord le comportement hygrique à partir de résultats en terme de teneur en humidité dans la paroi en pierre et d’humidité relative à l’interface pierre/isolant. Ensuite, l’analyse thermique est réalisée à l’aide de la température et flux de chaleur à la surface intérieure.

Analyse des données : résultats de la modélisation à l'échelle de la paroi

8.1 Analyse en composantes principales (ACP)

Comme exposé au chapitre 3.4.2, l'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse de données qui permet de réduire un problème de dimension p dans un problème de dimension r , tel que $r < p$, tout en conservant la majeure quantité d'information possible. Dans l'ACP on dispose de p -variables et n -individus distribués dans une matrice X de dimension $n \times p$ ¹.

ACP Flux de chaleur					
Temps (h)	0P	5P1H	*****	202H1Va	102H1Vb
1	0,000	0,000		0,000	0,000
2	0,000	0,000		0,000	0,000
3	0,000	0,000		0,000	0,000
*	*	*			
*	*	*			
238	0,098	0,038			
239	0,095	0,037			
240	0,093	0,036			

ACP Humidité relative					
Temps (h)	0P	5P1H	*****	202H1Va	102H1Vb
1	0,500	0,500		0,500	0,500
2	0,500	0,500		0,500	0,500
3	0,500	0,500		0,500	0,500
*	*	*			
*	*	*			
238	0,501	0,501			
239	0,501	0,501			
240	0,501	0,501			

ACP Température					
Temps (h)	0P	5P1H	*****	202H1Va	102H1Vb
1	20,000	20,000		20,000	20,000
2	20,000	20,000		20,000	20,000
3	20,000	20,000		20,000	20,000
*	*	*		*	*
*	*	*		*	*
238	19,963	19,972		19,988	19,995
239	19,964	19,973		19,988	19,995
240	19,965	19,974		19,988	19,995

FIGURE 8.1 – Représentation des matrices X' ($n' \times p'$) pour les variables de flux de chaleur, d'humidité relative et de température

Dans l'analyse du comportement hygrothermique des parois anciennes rénovées on dispose de résultats de simulations des configurations des parois (tableau 7.1) avec isolation thermique par l'extérieur (ITE) et isolation thermique par l'intérieur (ITI), pour chaque variable décrite au chapitre 7.3 (figure 7.6). Dans le cadre de cette thèse l'ACP est formulée dans l'objectif de grouper les configurations par leur ressemblance ou corrélation. On dispose alors de p' -configurations (constituées des résultats de la variable analysée) et de n' -individus (constitués des résultats pour chaque pas de temps) distribués dans une matrice X' de

1. Les variables sont en colonnes et les individus en lignes

dimension $n' \times p'$, telle que représentée dans la figure 8.1.

Concernant les individus (grandeurs étudiés à l'instant t), leur comportement est lié à l'évolution temporelle de la variable (modélisation à des pas de temps de l'heure durant 10 jours) et des conditions appliquées aux surfaces (échelon ou sinusoïdale), i.e. l'ACP des individus est conditionnée par la dynamique de la modélisation. Le nuage de points obtenu dans l'ACP des individus se présente sous la forme d'une succession de points, déterminé par la dynamique du problème. Dans l'ACP des individus, on obtient un nuage de points suivant un motif fortement lié aux conditions auxquelles les configurations sont soumises. Ce comportement est connu sous le nom l'effet Guttman (illustré dans la figure 8.2). Cet effet indique que le nuage de points constitué par les individus représentés dans les deux premiers plans factoriels prend la forme d'un arc ou d'un fer au cheval. La distribution des points individus peut cependant prendre d'autres formes [Camiz 2005]. Dans l'ACP des individus, lorsqu'on ne distingue plus des nuages de points/individus groupés par leur ressemblance, mais par la dynamique des résultats, l'analyse de ceux-ci n'a pas d'intérêt, l'ACP des individus est donc négligée dans le cadre de cette thèse.

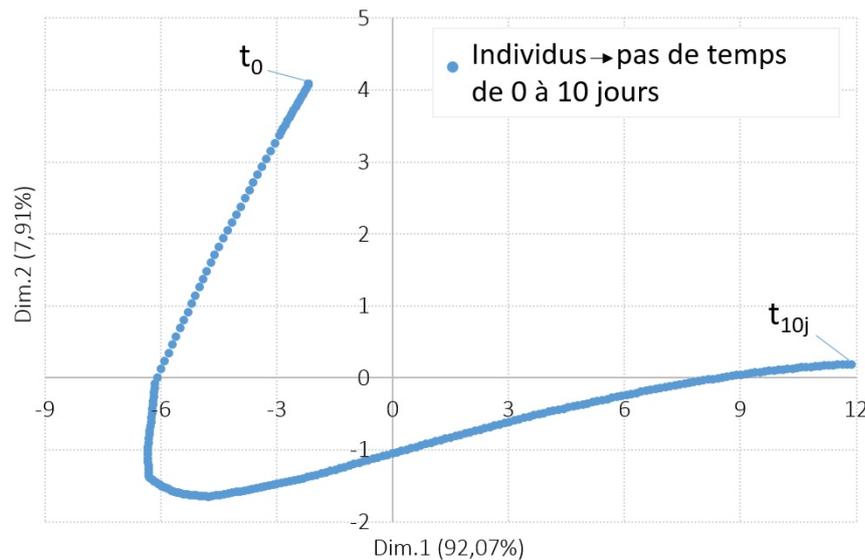


FIGURE 8.2 – Effet Guttman observé dans le nuage des individus. Condition aux limites type échelon en terme de teneur en humidité (w). Paroi avec isolation thermique extérieure (ITE)

Concernant le nuage de variables de l'ACP (dans ce cas formé par les configurations), comme expliqué au chapitre 3.4.2, la lecture (interprétation) est faite suivant l'angle entre les variables et entre les composantes projetées dans le plan factoriel². Le coefficient de corrélation est égal au cosinus de cet angle [Chesné 2012]. Dans la figure 8.3 sont donnés trois cas à titre d'exemple.

2. Seul le premier plan factoriel est présenté

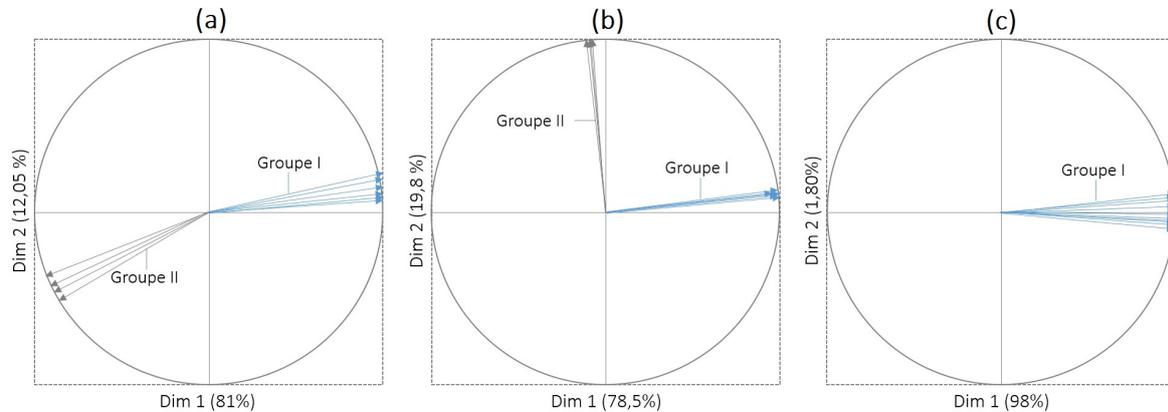


FIGURE 8.3 – Lecture globale des résultats d’une analyse en composantes principales (ACP)

- **Cas (a)** : on distingue deux groupes anti-corrélés entre eux (angle proche de 180° , coefficient de corrélation proche de -1). Le groupe I est corrélé positivement avec la composante 1³, laquelle explique 81% du comportement de l’ensemble des configurations ; le groupe II est corrélé négativement avec la composante 1, i.e. les configurations du groupe II ont un comportement opposé à celles du groupe I. On constate également que les configurations sont légèrement dispersées, i.e. leur comportement global n’est pas complètement identique.
- **Cas (b)** : on distingue également deux groupes, mais ils sont décorrélés entre eux (angle proche de 90° , coefficient de corrélation proche de 0). Le groupe I est corrélé avec la composante 1, tandis que le groupe II est corrélé avec la composante 2. Ce dernier n’est expliqué que par 19,8% de leur comportement, contre 78,5% expliquant le comportement du groupe I. D’autre part, à la différence du cas (a), les configurations sont bien réunies dans chaque groupe, i.e. le comportement de chaque configuration d’un même groupe est quasi identique.
- **Cas (c)** : Toutes les configurations sont réunies dans un seul groupe fortement corrélé avec la composante 1. De la même manière que dans le cas (a), on observe une légère dispersion des individus qui explique des légères différences dans leur comportement global.

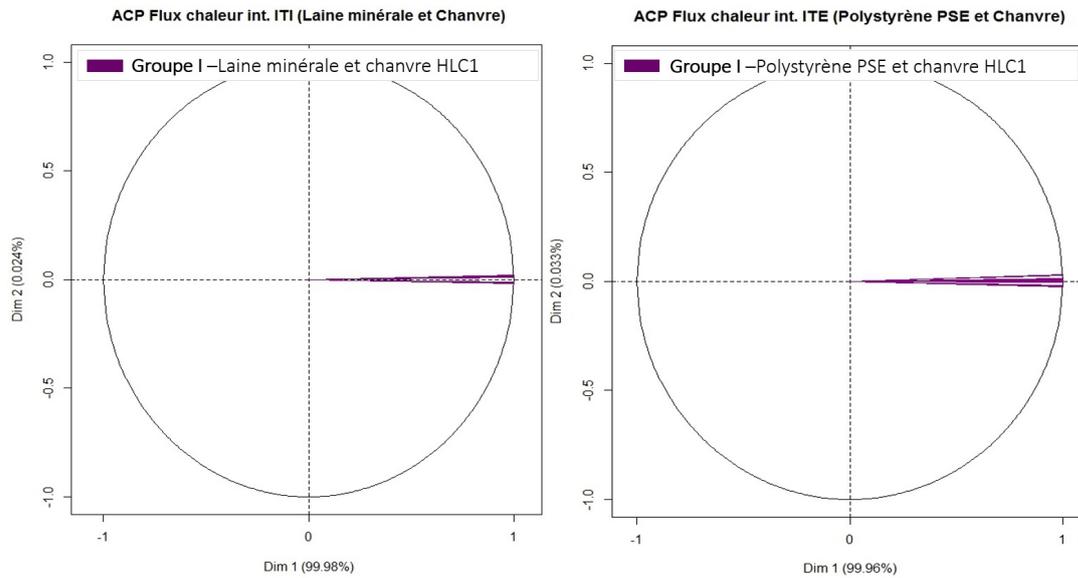
Ainsi la méthode employée permet d’avoir une vision globale sur le comportement des configurations par rapport aux grandeurs étudiées (température, humidité relative, flux de chaleur et de masse, et teneur en humidité). Cette vision globale sera comparée aux résultats temporels dans les sections suivantes afin de mieux comprendre les résultats obtenus.

3. Composante 1 = Dim 1 du graphique ; composante 2 = Dim 2 du graphique

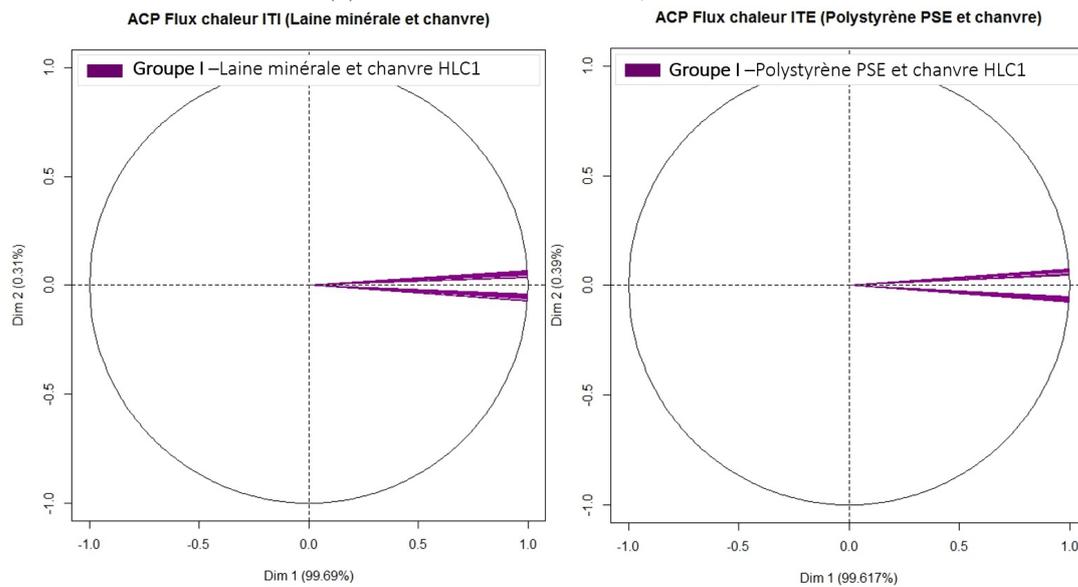
8.1.1 Flux de chaleur à la surface intérieure

La figure 8.4a illustre l'ACP des résultats de simulations obtenus en terme de flux de chaleur avec la condition aux limites type échelon appliquée pour ITI et ITE. On constate que, dans l'ACP, les configurations sont rassemblées dans la composante 1 laquelle explique 99,98% et 99,96% du comportement de l'ensemble des configurations en ITI et ITE respectivement. Le flux de chaleur suit un comportement (tendance) similaire dans toutes les configurations. La condition aux limites type échelon se caractérise par une diminution progressive de la température, accompagnée d'une augmentation de l'humidité relative sur une durée de deux jours contre dix jours simulés (conditions constantes durant huit jours). Sous cette condition les parois ne subissent pas de variations importantes. Par conséquent, les résultats des simulations avec la condition type échelon ne permettent pas d'évaluer la réponse des configurations aux changements fréquents. D'autre part, le flux de chaleur n'est pas influencé par les joints (pas de dispersion des configurations comme sur figure 8.3b). Ceci s'explique par le fait que les propriétés thermiques de l'enduit (chaux plâtre) utilisé dans les joints sont très proches de celles de la pierre calcaire.

Pour la condition sinusoïdale (figure 8.4b) on constate un comportement proche de celui observé dans l'ACP de la condition aux limites échelon : le nuage des configurations est fortement corrélé avec la composante 1 laquelle retient le plus d'information ($> 99,5\%$). On note cependant une légère distinction des configurations suivant les solutions d'isolation thermique. Le fait d'appliquer une condition aux limites cyclique (sinusoïdale), permet de mieux évaluer la réponse des parois aux variations, d'où la formation de deux groupes. L'ACP est un outil d'analyse des données qui permet de traiter le problème de forme globale. L'ACP des résultats de simulations en terme de flux de chaleur (observé à la surface intérieure), explique la tendance des configurations à suivre un certain comportement.



(a) Condition aux limites type échelon



(b) Condition aux limites sinusoïdales

FIGURE 8.4 – ACP des résultats de simulation des configurations (en ITI et en ITE) en terme de flux de chaleur traversant la surface intérieure

Les figures 8.5a et 8.5b illustrent le flux de chaleur, en fonction du temps, traversant la surface intérieure pour des configurations dont la part volumique des joints varie entre 5% et 20%. On constate que, pour chaque technique d'isolation, deux groupes sont formés : (i) un groupe constitué des parois en laine minérale (ITI) ou polystyrène PSE (ITE) et (ii) un groupe constitué des parois avec isolation en béton de chanvre HLC1 (ITI et ITE). L'écart en

terme de flux de chaleur généré entre les configurations suivant le type d'isolant thermique est quasiment négligé dans l'ACP avec la condition aux limites sinusoïdale⁴. Sur la figure 8.4b on distingue deux groupes qui restent fortement corrélés avec la composante 1.

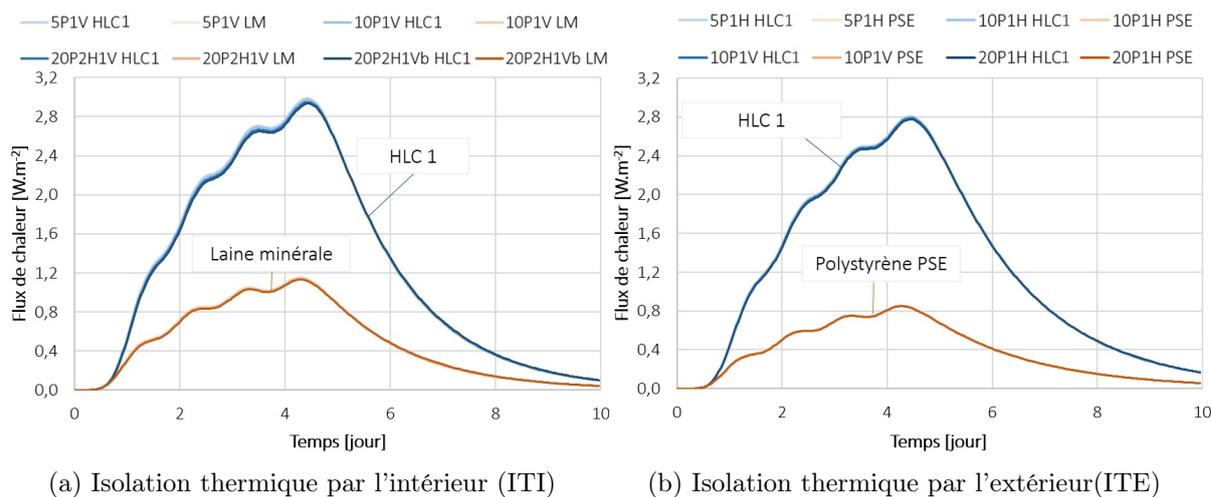


FIGURE 8.5 – Flux de chaleur traversant la surface intérieure. Configurations de parois en ITE (Polystyrène PSE et chanvre HLC1) et ITE (Laine minérale (LM) et chanvre HLC1) référence 5P1H, 5P1V, 10P1H, 10P1V, 20P1H, 20P2H, 20P2H1Vb. Condition aux limites sinusoïdale

L'ACP explique dans ce cas les profils (tendance) de la grandeur et non pas sa valeur. D'autre part, vis-à-vis du flux de chaleur, on constate qu'en ITE pour une même épaisseur de couche isolante, la paroi avec isolation en polystyrène PSE est environ 3,3 fois plus résistante que la paroi avec isolation en béton de chanvre HLC1 (observée au pic du flux de chaleur, figure 8.5b). En ITI la laine minérale est 2,5 fois plus résistante que le béton de chanvre HLC1 (observée au pic du flux de chaleur, figure 8.5a). Dans l'ensemble des solutions, les configurations avec ITE restent, dans les cas étudiés, plus performantes que les parois avec ITI d'un point de vue thermique. Un effet de la position de la couche isolante sur le flux de chaleur est constaté dans les configurations avec du béton de chanvre HLC1, où pour une même géométrie, le flux de chaleur traversant la surface intérieure des configurations avec ITE est inférieur à celui des configurations avec ITI (-5,4% observé au pic des deux courbes à 4,5 jours)⁵. D'autre part, on constate que les courbes de flux de chaleur des configurations avec une même type d'isolant thermique sont superposées, i.e. la part volumique des joints n'a pas d'effet sur le flux de chaleur pendant la période étudiée (figures 8.5a et 8.5b).

4. Comportement également constaté avec les résultats de simulations avec la condition aux limites type échelon.

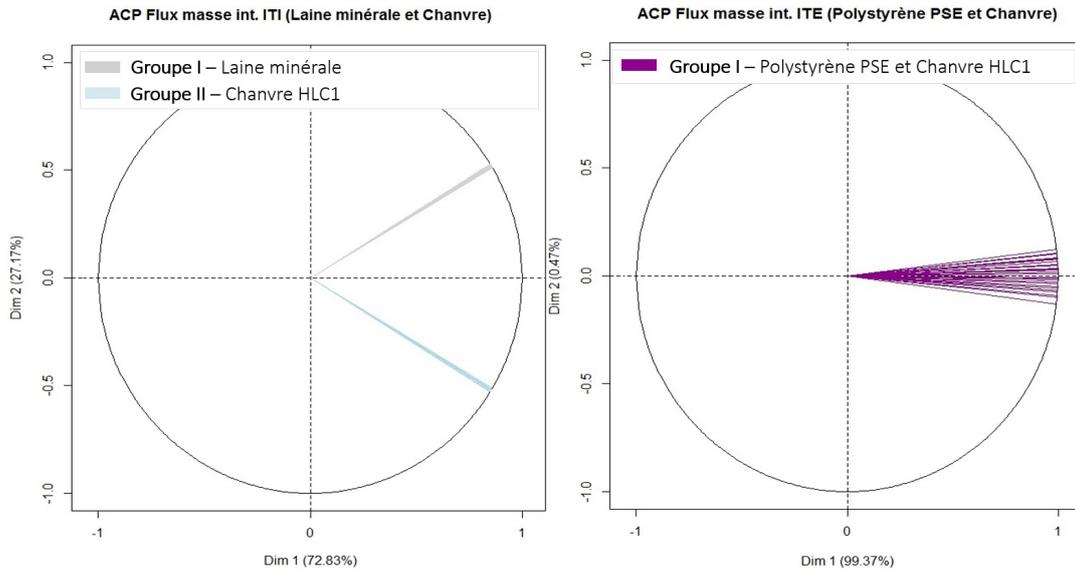
5. Ces résultats sont influencés les conditions initiales et les conditions aux limites appliquées

8.1.2 Flux de masse à la surface intérieure

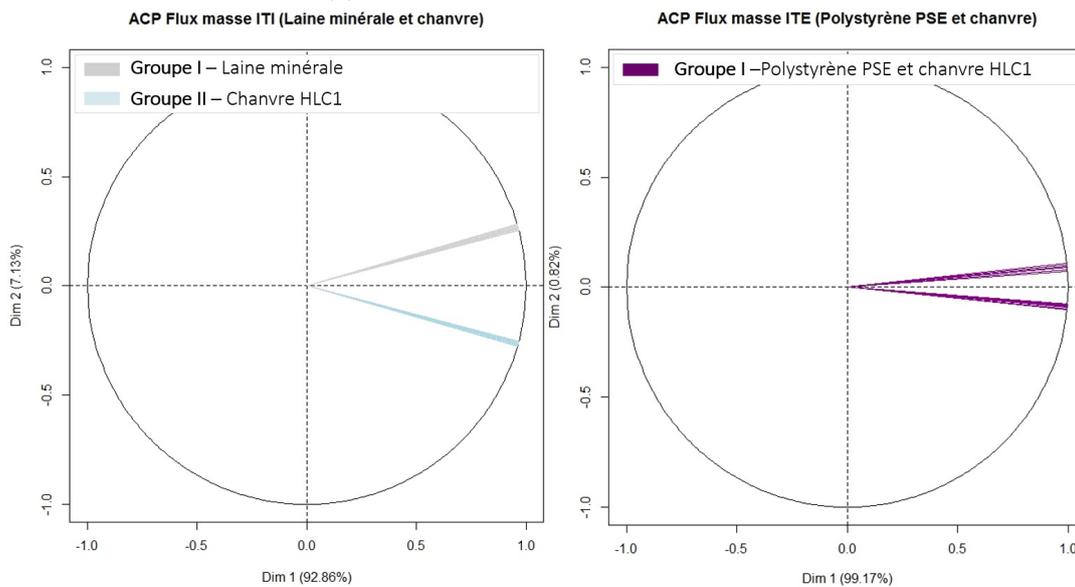
Dans les figures 8.6a et 8.6b est présentée l'ACP des résultats des simulations en terme de flux de masse obtenus avec les conditions aux limites type échelon et sinusoïdale respectivement. À la différence du flux de chaleur, le flux de masse montre, dans le cas de la paroi avec isolation thermique par l'intérieur (ITI), deux groupes bien séparés en fonction du type d'isolant thermique. Le groupe I (constitué des configurations avec isolation en laine minérale) est corrélé positivement, tandis que le groupe II (constitué de l'ensemble des configurations avec isolation en béton de chanvre HLC1) est corrélé négativement, mais l'angle entre eux est proche de 90° , i.e. les deux groupes ont un comportement décorrélé (figure 8.6a). Pour les parois constituées d'isolation en béton de chanvre HLC1, on observe sur la figure 8.7a un flux de masse positif (croissant) durant les trois premiers jours (avec une rupture de la vitesse de croissance de la courbe le deuxième jour) avant de décroître en réponse aux conditions constantes (appliquées durant les huit jours qui suivent l'échelon). Dans ce cas, les configurations avec isolation en béton de chanvre HLC1, cherchent à atteindre l'équilibre hygrique plus rapidement que dans le cas des configurations avec isolation en laine minérale. Les résultats temporels de la figure 8.7a sont bien en accord avec l'approche globale de la figure 8.6a : deux groupes aux comportements différents.

Concernant les configurations en laine minérale (figure 8.7a), on constate une évolution du flux de masse similaire à celle observée dans les configurations avec du béton de chanvre HLC1 durant les trois premiers jours, mais avec une croissance légèrement inférieure qui se prolonge jusqu'au quatrième jour. Suite à cette période, le flux de masse diminue plus lentement que dans les configurations en béton de chanvre HLC1. Dans les résultats on constate que l'équilibre hygrique n'est pas atteint à la fin de la simulation par les configurations de parois en laine minérale ou béton de chanvre. Cependant, le groupe des courbes (de flux de masse) formé par les configurations en laine minérale montre au bout de quatre jours une tendance à atteindre le régime équilibré plus rapidement : lorsque le flux de masse diminue, la pente des courbes en laine minérale est inférieure à celle des courbes formées par les configurations en béton de chanvre.

Dans la figure 8.6b est présentée l'ACP des résultats de simulations en terme de flux de masse obtenues avec la condition aux limites sinusoïdales. Dans les configurations avec isolation thermique par l'intérieur (ITI), on observe un comportement très similaire à celui de l'ACP avec les conditions aux limites type échelon. Deux groupes distincts se forment : (i) les parois isolées avec de la laine minérale et (ii) celles isolées avec du béton de chanvre HLC1. Ces résultats permettent de vérifier la cohérence de l'ACP avec les deux conditions aux limites étudiées dans ce chapitre.



(a) Condition aux limites type échelon



(b) Condition aux limites sinusoïdales

FIGURE 8.6 – ACP des résultats de simulation des configurations (en ITI et en ITE) en terme de flux de chaleur traversant la surface intérieure pour ITI et ITE

Concernant le comportement des parois isolées par l'extérieur (ITE), soumises à la condition aux limites type échelon (figure 8.6a), on observe une distribution dispersée des configurations, qui n'est pas constatée dans l'ACP des résultats obtenues avec la condition aux limites sinusoïdale (figure 8.6b) où l'on distingue deux groupes. Cependant, il n'est pas possible d'en conclure qu'il existe une différence entre les deux résultats, vu que dans

le premier cas, la composante 2 (Dim 2) explique cette dispersion avec seulement 0,47 % (0,82% dans l'ACP avec les conditions sinusoïdales) et que la corrélation des configurations avec cette composante est négligeable. Dans les deux types des conditions, les configurations restent plus corrélées avec la composante 1 (Dim 1).

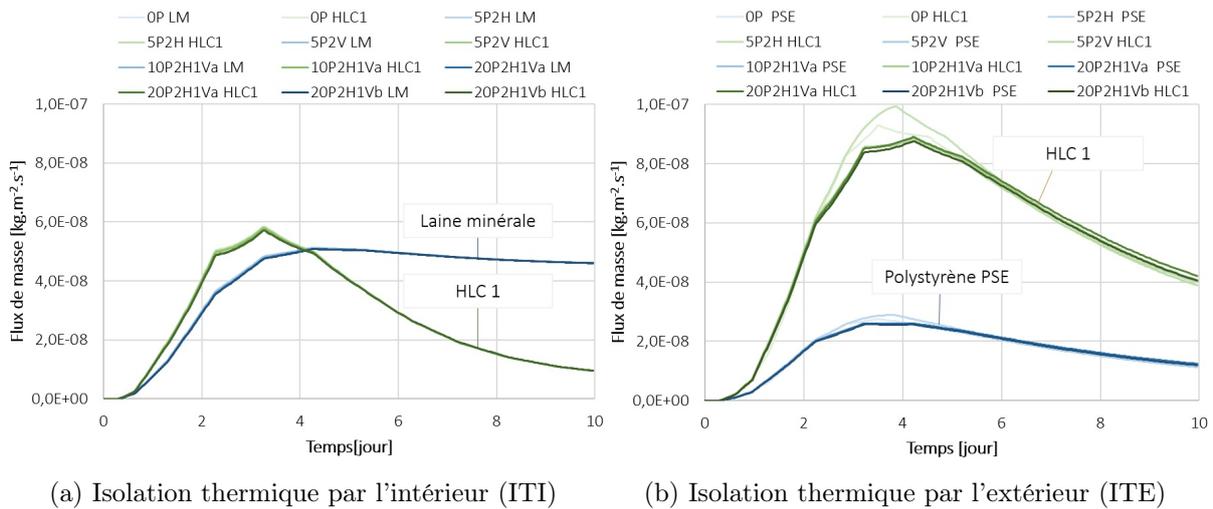


FIGURE 8.7 – Flux de masse traversant la surface intérieure. Configurations de parois en ITE (Polystyrène PSE et béton de chanvre HLC1) et ITI (Laine minérale (LM) et béton de chanvre HLC1) référence 5P1H, 5P1V, 10P1H, 10P1V, 20P1H, 20P2H, 20P2H1Vb obtenu avec des conditions aux limites type échelon

Dans la figure 8.7b sont présentés les résultats en fonction du temps de simulation en terme de flux de masse des configurations avec ITE soumises à la condition aux limites type échelon. À la différence des configurations avec ITI, le flux de masse des configurations avec isolation thermique en béton de chanvre HLC1 (ITE) augmente et décroît plus rapidement que le flux de masse des configurations avec polystyrène PSE. Durant les trois premiers jours de la simulation le flux de masse des configurations avec polystyrène PSE (courbes en bleu) passent de 0 à $2,88 \cdot 10^{-8} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (valeur maximale à 85 heures), tandis que dans les configurations avec du béton de chanvre HLC1 (courbes en vert) le flux de masse atteint $9,78 \cdot 10^{-8} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (à environ 90 heures), i.e., les configurations avec de l'isolation en béton de chanvre HLC1 présentent un pic de flux de masse de 3,4 fois supérieur au pic atteint par les configurations avec de l'isolation en polystyrène PSE (comparaison entre les configurations 5P2H PSE et 5P2H HLC1). D'ailleurs les configurations avec isolation thermique par l'extérieur en béton de chanvre HLC1 présentent un flux de masse plus important que les configurations avec isolation thermique par l'intérieur (ITI), ceci à cause du frein-vapeur.

Dans les configurations avec isolation thermique par l'intérieur un frein-vapeur (avec μ^6

6. Résistance à diffusion de la vapeur

égale à 1000, et Sd^7 égale à 5m) a été mis en place entre l'isolant et le revêtement. Le rôle du frein-vapeur est d'éviter la condensation d'eau à l'interface entre la couche en pierre (et joints) et l'isolant causée par la migration d'humidité de l'intérieur vers l'extérieur en période d'hiver⁸. La figure 8.7a montre qu'en dépit du frein-vapeur, le flux de masse observé à la surface intérieure n'est pas négligeable⁹. En vue de comprendre le rôle du frein-vapeur et du revêtement intérieur sur le flux de masse, trois cas ont été simulés : (i) paroi avec frein-vapeur et revêtement intérieur, (ii) paroi sans frein-vapeur, avec revêtement intérieur et (iii) paroi sans revêtement intérieur, avec frein-vapeur. Dans les figures 8.8a et 8.8b sont illustrés les résultats de flux de masse à la surface intérieure des trois cas, testés sur la configuration 10P1H avec isolation thermique en béton de chanvre HLC1, soumise aux deux types des conditions : échelon et sinusoïdale. Comme attendu, on constate que le revêtement joue un rôle non-négligeable sur le flux de masse. Cette couche en plâtre, agissant comme tampon hygrique, permet des échanges de masse avec le volume d'air. De plus, la nature de la couche isolante a une influence sur le comportement du flux de masse. Le frein-vapeur n'étant pas complètement étanche, des échanges plus ou moins importants sont générés en fonction des propriétés hygriques de la couche isolante dans le cas des parois avec ITI.

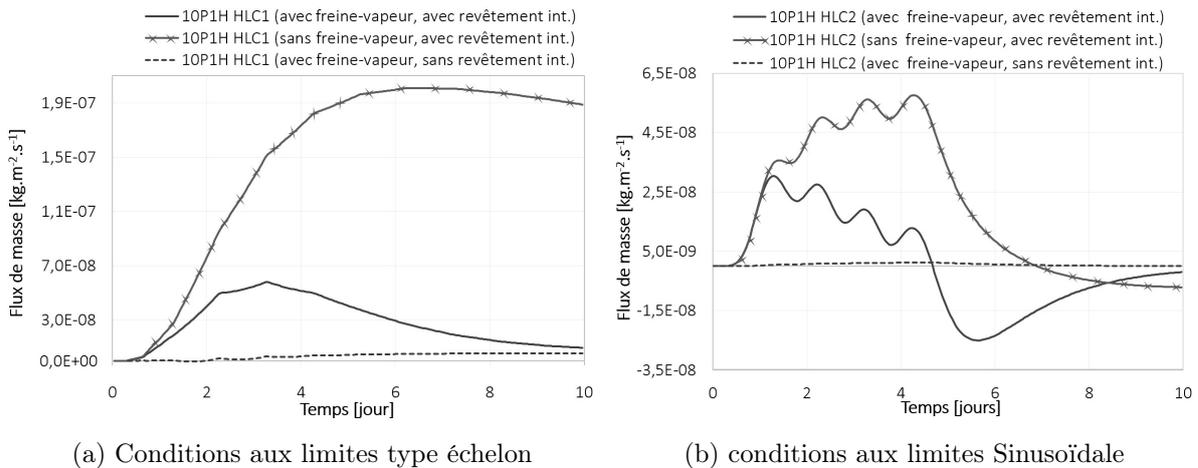


FIGURE 8.8 – Flux de masse traversant la surface intérieure. Configuration de paroi 10P1H isolée par l'intérieur avec du chanvre HLC1. Évaluation de l'effet du frein-vapeur et du revêtement

7. Le facteur de diffusion de la vapeur ou épaisseur équivalente de diffusion Sd est un facteur qui met en relation la résistance à diffusion de la vapeur μ avec l'épaisseur de la couche. Sd renseigne sur la perméabilité à la vapeur d'eau d'une couche. La valeur de Sd permet de classer les membranes en pare-vapeur (souvent $Sd \geq 10m$) ou frein-vapeur ($Sd < 10m$)

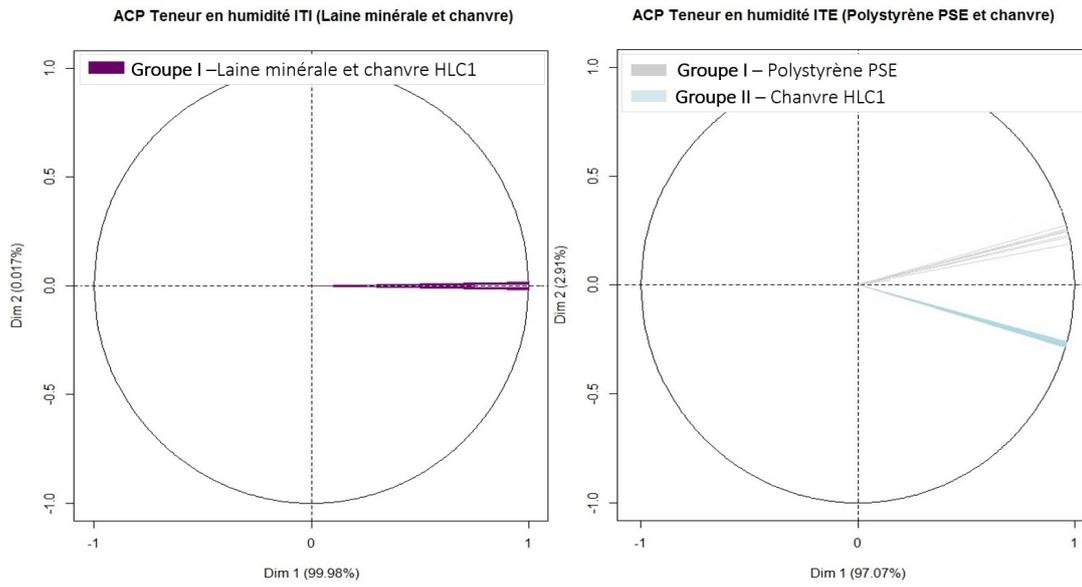
8. Ce comportement est inversé en période d'été où les pressions de vapeur sont plus importantes à l'extérieur qu'à l'intérieur

9. Constaté également dans les configurations soumises à la condition aux limites sinusoïdale

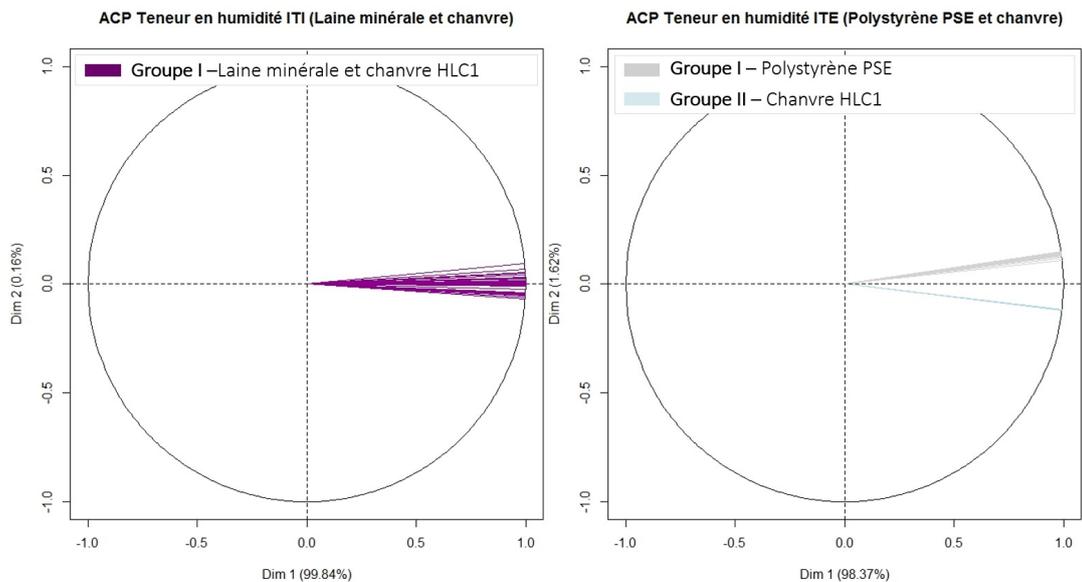
8.1.3 Teneur en humidité dans la pierre calcaire

La figure 8.9a montre l'ACP des résultats de simulations des configurations en terme de teneur en humidité de la pierre calcaire avec la condition aux limites type échelon. Dans les parois avec isolation thermique par l'intérieur (ITI), on constate que les configurations sont rassemblées dans un seul groupe fortement corrélé avec la composante 1 (Dim 1). Ce résultat pourrait être expliqué par (i) la dynamique de la condition auxquelles sont soumises les configurations et (ii) par l'effet combiné de la couche isolante et du frein-vapeur. Concernant l'ACP des résultats de simulations des configurations avec ITI dans la condition aux limite sinusoïdale (figure 8.9b), l'ensemble des configurations est également groupé et corrélé avec la composante 1 (Dim 1), mais avec une légère dispersion. La dispersion des configurations peut être expliquée par l'effet des joints et par le type de condition aux limites appliquée à ces parois. Dans la condition aux limites sinusoïdale les parois sont constamment soumises à des cycles de charge et décharge d'humidité. Dans la figure 8.10a on constate de légers écarts liés à la part volumique des joints dans les configurations. La nature de l'isolant joue également un rôle non négligeable, car comme constaté avec les configurations 5P1H LM et 20P2H1Vb LM (configurations avec isolation en laine minérale), la teneur en humidité est supérieure que dans les parois avec béton de chanvre HLC1 ayant un même pourcentage en joints (configurations 5P1H HLC1 et 20P2H1Vb HLC1).

Concernant l'ACP des résultats de simulations en terme de teneur en humidité dans la paroi avec isolation thermique par l'extérieur (ITE) avec la condition aux limites type échelon (figure 8.9a), on constate que deux groupes sont formés, un pour les configurations en polystyrène PSE et l'autre pour les configurations en béton de chanvre HLC1, corrélés tous les deux avec la composante 1 (Dim 1) laquelle explique 97,07% de leur comportement. Ce comportement est également observé dans l'ACP des résultats des configurations avec ITE soumises à la condition sinusoïdale avec une corrélation des groupes plus importante avec la composante 1 (Dim 1) laquelle explique 98,37% de leur comportement. Sur les résultats temporels, avec la condition aux limites sinusoïdale (figure 8.10b), les configurations avec isolation en béton de chanvre HLC1 présentent des valeurs dont la teneur en humidité est supérieure à celle des parois avec isolation en polystyrène. Dans ces dernières, la teneur en humidité de la pierre calcaire est quasiment constante. La couche isolante agit comme une barrière aux variations d'humidité extérieures. D'ailleurs, si l'on compare ces résultats à ceux observés avec le flux de masse, on constate que les configurations avec polystyrène PSE, limitent les échanges entre la paroi et le volume d'air.



(a) Condition aux limites type échelon



(b) Condition aux limites sinusoïdales

FIGURE 8.9 – ACP des résultats des simulations des configurations (en ITI et en ITE) en terme de teneur en humidité dans la pierre calcaire

L'ACP réalisée aux parois ITI et ITE en terme de flux de chaleur, flux de masse et teneur en humidité dans la pierre (sections 8.1.1, 8.1.2 et 8.1.3) a permis de grouper les configurations principalement par rapport à la nature de l'isolant. Un comportement similaire a été observé dans l'ACP réalisée avec les résultats de simulations des configurations avec deux types de conditions aux limites : échelon et sinusoïdale. Concernant les joints, l'ACP n'a pas

permis de constater des effets notables sur le comportement hygrothermique des différentes configurations au regard des grandeurs analysées précédemment. Cela peut s'expliquer par :

(i) Les conditions aux limites : dans le cas du flux de chaleur et de masse, le point d'observation est placé à la surface intérieure. Dans cette position, l'évolution de la variable est fortement influencée par la condition appliquée à cette surface.

(ii) L'aspect temporel de la méthode : les résultats de l'ACP en terme de représentation des variables (dans ce cas les configurations) sont fortement influencés par l'évolution de la variable dans le temps. Ainsi la première composante, expliquerait dans un pourcentage plus élevé la dynamique des résultats et dans un pourcentage plus faible l'effet des couches isolantes et l'effet des joints.

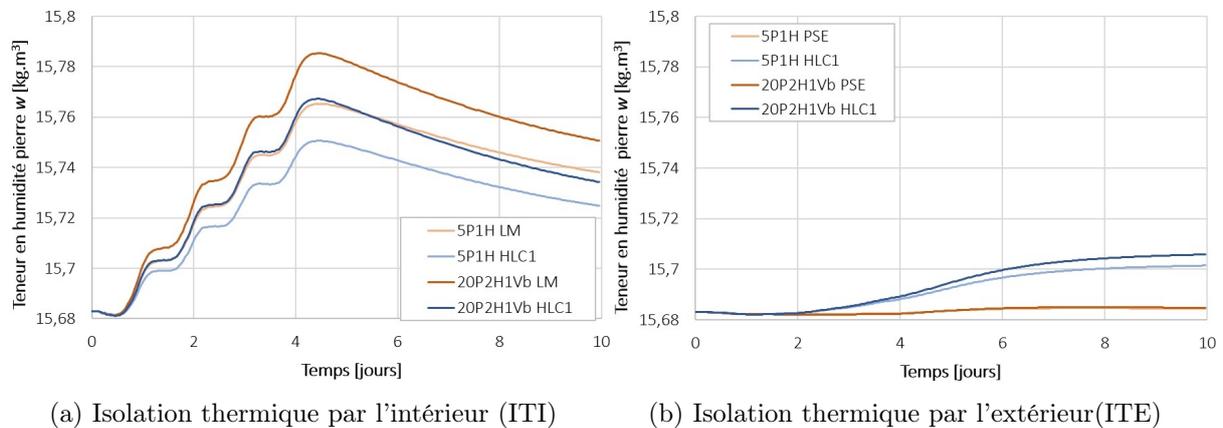


FIGURE 8.10 – Teneur en humidité dans la pierre calcaire w pour les configurations de parois en ITE (Plystyrène PSE et chanvre HLC1) et ITE (Laine minérale (LM) et chanvre HLC1) référence 5P1H, 20P2H1V avec des conditions aux limites sinusoïdale

L'analyse du comportement hygrothermique des configurations est faite également à travers les résultats des simulations en terme de température et d'humidité relative. Dans ce cas, des points d'observations sont placés dans la paroi (figure 7.6). Les résultats exposés et discutés ci-après, correspondent à ceux obtenus dans les points localisés à l'interface entre la paroi (ancienne) et l'isolant (dans la pierre et dans le joint). D'autre part, dans les sections 8.1.4 et 8.1.5 seuls les résultats des simulations réalisées avec la condition aux limites sinusoïdale sont analysés.

8.1.4 Humidité relative à l'interface entre la pierre et l'isolant

Dans la figure 8.11 est exposée l'ACP des résultats de simulations des configurations avec ITI et ITE en terme d'humidité relative (φ) observée à l'interface entre la pierre calcaire et l'isolant, au niveau de la pierre et au niveau des joints (point 3, figure 7.6). Dans l'ACP

on identifie pour chaque type de paroi (ITI et ITE) des groupes formés en fonction du type d'isolation thermique :

– En ITI : le groupe I est constitué des configurations avec isolation en béton de chanvre dont la valeur de φ est observée au niveau du joint et de la pierre ; le groupe II est constitué des configurations avec isolation en laine minérale dont la valeur de φ est observée au niveau du joint et de la pierre. Dans les deux groupes la distribution des configurations est dispersée.

– En ITE : le groupe I est constitué des configurations avec isolation en béton de chanvre HLC1 dont la valeur de φ est observée au niveau du joint et de la pierre ; le groupe V est constitué des configurations avec isolation en polystyrène PSE dont la valeur de φ est observée au niveau de la pierre. Dans l'ACP des configurations avec ITE, trois autres groupes sont formés : II, III, IV. Ces groupes sont constitués des configurations avec isolation en polystyrène PSE dont la valeur de φ est observée au niveau des joints.

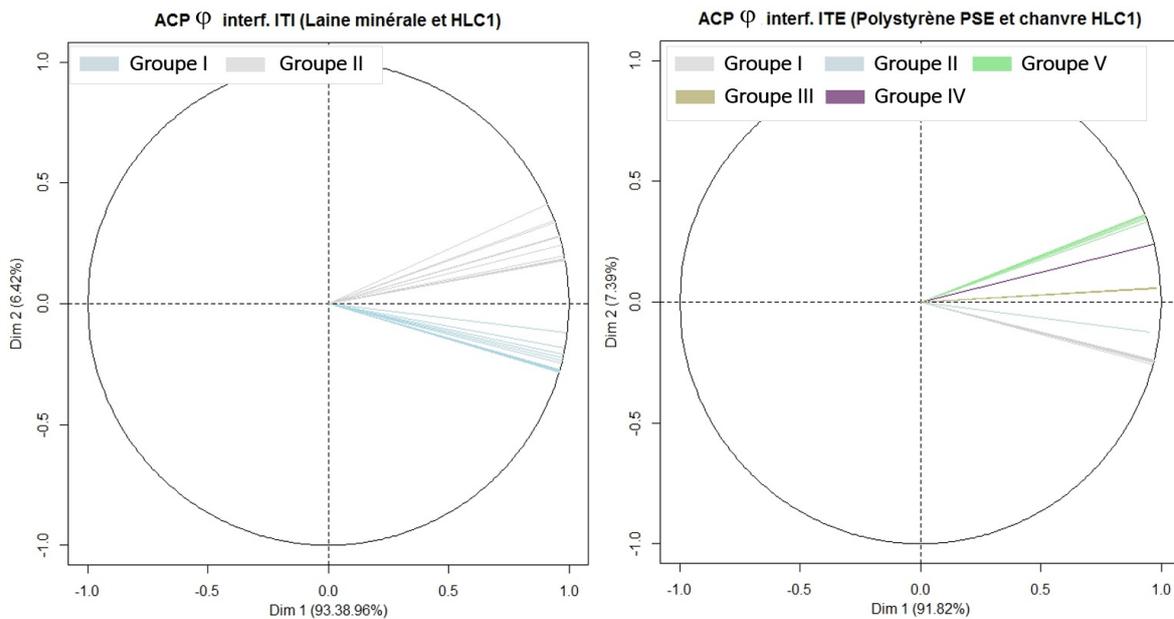
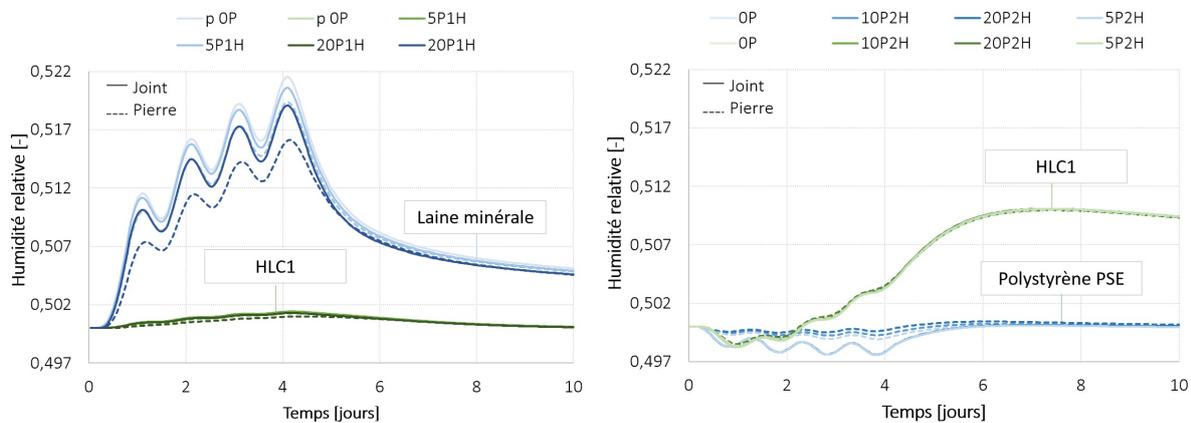


FIGURE 8.11 – ACP des résultats en terme d'humidité relative (φ) à l'interface entre la pierre calcaire et l'isolant. Isolation thermique par l'intérieur (ITI) groupe I : configurations avec isolation en béton de chanvre HLC1 ; groupe II : configurations avec isolation en laine minérale. Isolation thermique par l'extérieur (ITE) groupe I : configurations avec isolation en béton de chanvre HLC1 ; groupes II, III et IV : configurations avec isolation en polystyrène PSE (φ observée dans les joint) ; groupe V : configurations avec isolation en polystyrène PSE (φ observée dans la pierre)

Dans les deux types de parois, avec ITI et avec ITE, les configurations restent plus corrélées avec la composante 1 (Dim 1) qu'avec la composante 2 (Dim 2). La composante

2 explique possiblement le comportement des configurations par rapport au matériau dans lequel le point d'observation de φ est placé : pierre au enduit en chaux plâtre.



(a) Isolation thermique par l'intérieur (ITI)

(b) Isolation thermique par l'extérieur (ITE)

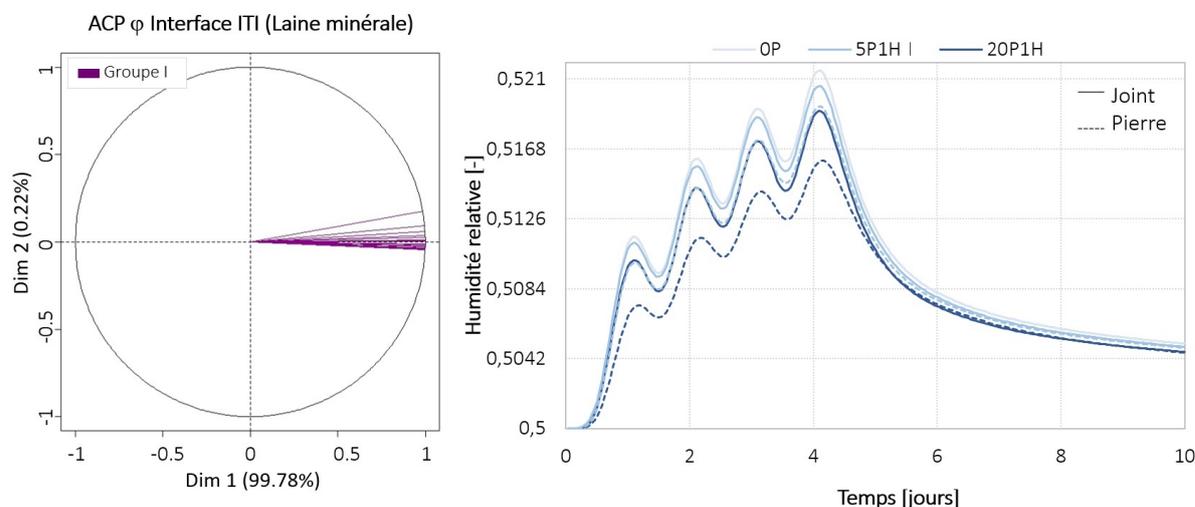
FIGURE 8.12 – Humidité relative à l'interface entre la pierre et l'isolante. Isolation thermique par l'intérieur (ITI) : laine minérale et béton de chanvre HLC1. Isolation thermique par l'extérieur (ITE) : polystyrène PSE et béton de chanvre HLC1.

Les résultats de l'ACP sont confrontés aux résultats des simulations des configurations avec ITI et ITE, exposés dans les figures 8.12a et 8.12b respectivement. Dans ces graphiques, les courbes de φ sont mises à la même échelle de manière à pouvoir les comparer entre elles. On constate que les valeurs de φ dans les configurations avec isolation thermique par l'intérieur (ITI) en laine minérale sont supérieures aux valeurs dans les configurations avec béton de chanvre HLC1 (figure 8.12a). D'autre part, en ITI, φ tend à augmenter dans chaque cycle¹⁰ (effet d'accumulation qui dépend également de la condition initiale), notamment dans les configurations en laine minérale; dans les configurations avec béton de chanvre HLC1 cette augmentation est quasiment nulle. Dans le cas des parois avec isolation thermique par l'extérieur (ITE), les configurations avec béton de chanvre HLC1 présentent des valeurs de φ supérieures à celles observées dans les configurations avec polystyrène PSE (figure 8.12b); à l'exception des deux premiers jours, où les configurations avec béton de chanvre HLC1 ont une valeur φ inférieure à celle observée dans les joints des configurations avec polystyrène PSE.

Concernant l'effet des joints, on observe des écarts entre les valeurs de φ dans la pierre et dans les joints, particulièrement dans les configurations avec laine minérale en ITI et dans les configurations avec polystyrène PSE en ITE. Dans le cas des configurations avec béton de chanvre HLC1 en ITE, les courbes se superposent. Afin d'évaluer l'effet des joints, la méthode ACP est appliquée à des configurations avec le même type d'isolant thermique dans les configurations avec isolation thermique par l'intérieur, où la mise en place de l'isolant peut engendrer des problèmes d'humidité. Cette condition permet d'écarter l'influence de la

10. Condition aux limites sinusoïdale

nature de l'isolant sur les résultats de l'ACP ¹¹.



(a) ACP humidité relative (φ) ITI laine minérale

(b) Humidité relative (φ) ITI laine minérale

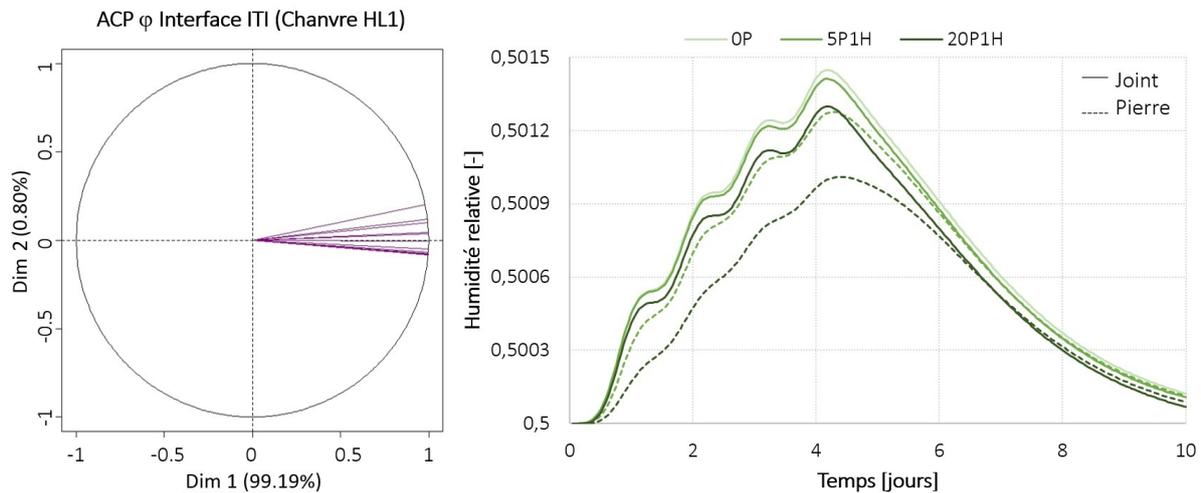
FIGURE 8.13 – ACP des résultats d'humidité relative φ observée à l'interface entre la pierre calcaire et l'isolation par l'intérieur (ITI) en laine minérale. Groupe I : toutes les configurations φ observée dans la pierre et dans les joints.

Dans les figures 8.13a et 8.13b sont illustrés l'ACP et les résultats de l'humidité relative (φ) à l'interface entre la paroi en pierre calcaire et l'isolant en laine minérale (au niveau de la pierre et des joints). Les parois isolées avec ce matériau présentent les valeurs de φ les plus élevées par rapport aux autres solutions. Comme mentionné précédemment, le pic de φ dans ces configurations augmente à chaque cycle imposé à la limite, jusqu'à atteindre sa valeur maximale durant le quatrième jour ; suite à quoi l'humidité relative décroît progressivement. On constate que les valeurs de φ les plus élevées sont atteintes dans la pierre et dans les configurations dont la part volumique des joints est la plus basse. Ce comportement est lié au coefficient de diffusion de la vapeur des matériaux lequel est plus élevé dans l'enduit chaux plâtre des joints que dans la pierre ; facilitant ainsi la migration de la vapeur vers l'extérieur. Concernant l'augmentation progressive de φ , la période de modélisation et les conditions sinusoïdales étant relativement courtes, il s'avère particulièrement difficile de prédire si cette évolution progresse avec la même vitesse pour des périodes plus longues dans des conditions similaires ou plus critiques (e.g. des chutes de températures plus importantes pour des humidités relatives au dessus de 90%). Cependant, ces résultats donnent une information importante sur la tendance des matériaux à répondre à ce type de condition.

Dans les figures 8.14a et 8.14b sont illustrés l'ACP et les résultats de l'humidité relative (φ) à l'interface entre la paroi en pierre calcaire et l'isolant en béton de chanvre HLC1 (au

11. L'ACP est présentée directement avec les résultats de simulations pour chaque type de solution thermique

niveau de la pierre et des joints). Dans l'ACP on constate une dispersion des configurations (observée également dans l'ACP de la figure 8.11, configuration avec ITI) liée à l'effet des joints en chaux plâtre qui, comme exposé dans le chapitre 7.1.2.2, ont une résistance à la diffusion de la vapeur 5,14 fois inférieures à celle de la pierre calcaire. Ainsi, le flux de vapeur provenant de l'intérieur se dissipe plus rapidement vers l'extérieur à travers les joints qu'à travers la pierre, d'où une valeur de φ plus importante dans la pierre que dans les joints¹². Dans les résultats, on constate cependant que la valeur de φ pour l'ensemble des configurations reste très proche de 0,50. Ce comportement est lié à l'effet combiné de la diffusion de la vapeur et la teneur en humidité de la couche isolante. Le béton de chanvre HLC1 a une capacité à emmagasiner plus de vapeur d'eau que la laine minérale et un coefficient de diffusion à la vapeur d'eau inférieur à celui de la laine minérale. Dans le cas des parois en laine minérale, l'humidité est rapidement diffusée vers la paroi en pierre calcaire, d'où cet écart entre les deux types d'isolation.



(a) ACP humidité relative (φ) ITI béton de chanvre HLC1

(b) Humidité relative (φ) ITI béton de chanvre HLC1

FIGURE 8.14 – ACP des résultats d'humidité relative φ à l'interface (ITI) (isolant en béton de chanvre HLC1). Groupe I : toutes les configurations φ dans la pierre et dans les joints.

8.1.5 Température à l'interface entre la pierre et l'isolant

Dans la figure 8.15 est illustrée l'ACP des résultats de simulation des configurations en terme de température, à l'interface entre la pierre calcaire et l'isolant : configurations avec isolation thermique par l'intérieur en laine minérale, configurations avec isolation thermique par l'extérieur en béton de chanvre HLC1. On constate que l'effet des joints sur la température est négligeable dans les deux types de parois. Cela s'explique par les propriétés thermiques de

12. Ce comportement est également observé dans les parois avec isolation en laine minérale

la pierre calcaire et des joints à base de chaux plâtre, lesquelles sont proches. D'autre part, l'humidité ne semble pas avoir un effet notable sur la température.

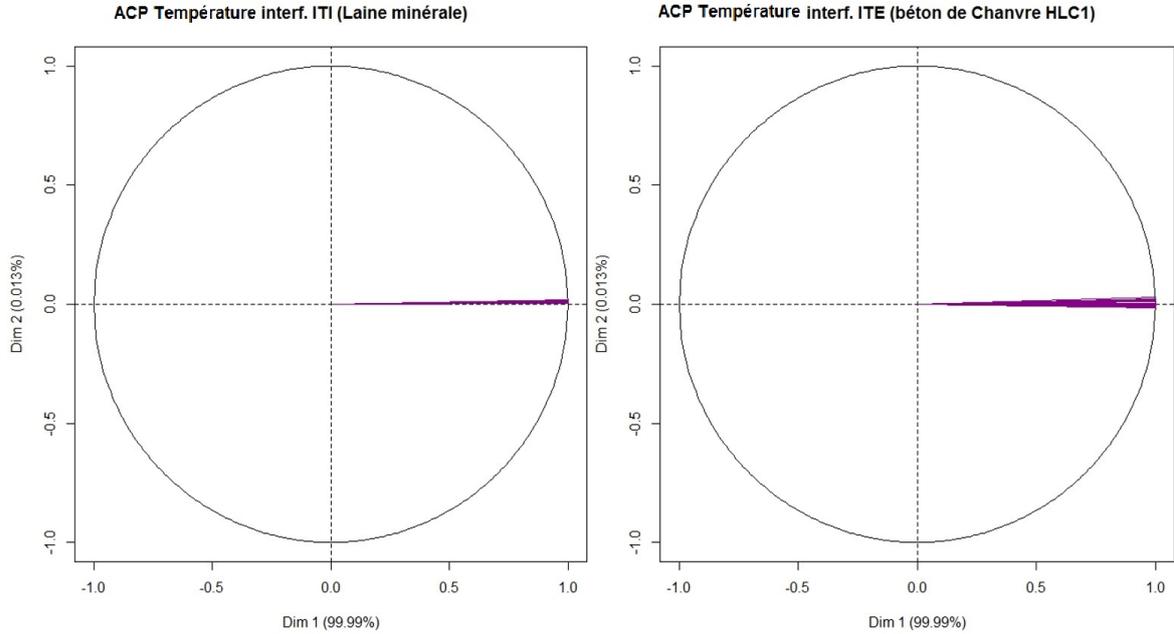


FIGURE 8.15 – ACP des résultats en terme température (T)

8.2 Comportement hygrothermique des parois soumises à des conditions “cas 2014” et de “vague de chaleur”¹³

L'analyse en composantes principales (ACP) réalisée dans le chapitre 8.1 a permis de distinguer les parois en fonction de la nature et de la position de l'isolant thermique. Concernant les joints, du point de vue thermique leur part volumique (par rapport à la pierre) et leur direction n'ont pas d'impact constaté dans les conditions simulées (échelon et sinusoïdale) sur une durée de dix jours. Du point de vue hygrique, les joints ont un effet sur l'évolution de l'humidité relative (φ), notamment dans les parois avec isolation thermique par l'intérieur où l'humidité peut avoir des effets négatifs sur la pérennité des parois anciennes rénovées [Kolaitis *et al.* 2013], [Stazi *et al.* 2013]. Cependant, l'effet des joints n'est pas dissocié de la nature et de la position de l'isolant. Comme constaté dans la figure 8.12, les configurations avec ITI en laine minérale (avec frein-vapeur) présentent les valeurs de φ les plus élevées à l'interface entre la pierre/joints et l'isolant. Dans les parois soumises à la condition aux limites sinusoïdale, une augmentation progressive de l'humidité relative a été

13. Le “cas 2014” fait référence aux résultats obtenus dans les simulations des logements (ITI et ITE) dans le processus de calage du modèle, lequel a été réalisé à partir des données enregistrées à l'intérieur et à l'extérieur dans l'année 2014. Les conditions en “vague de chaleur” sont issues des données obtenues avec le logiciel Meteonorm (chapitre 4.3.2.2).

observée à ce niveau de la paroi. D’autre part, on a constaté que (i) la valeur de φ observée dans la pierre était supérieure à celle observée dans les joints, et (ii) dans les configurations dont la part volumique des joints est la plus élevée, la valeur de φ était la plus basse, i.e. la vapeur d’eau migre plus rapidement à travers les joints qu’à travers la pierre. Dans le cas des configurations avec ITI en béton de chanvre HLC1, cet effet est également constaté mais, à la différence de la laine minérale, l’augmentation de φ à l’interface est nettement inférieure (humidité relative maximale (φ_{max}) 15,2 fois inférieures dans les parois avec béton de chanvre HLC1 que dans les parois avec laine minérale¹⁴). D’après ces résultats, l’humidité aurait plus d’impact pour les configurations dont la part volumique des joints est la plus faible (particulièrement celles rénovées avec isolation thermique par l’intérieur)¹⁵.

Suite à ce constat, une analyse des configurations de parois constituées d’une couche homogène en pierre calcaire (i.e sans joints), isolation et revêtement par intérieur et l’extérieur est réalisée. Le chapitre est structuré suivant le type d’analyse : (i) du point de vue hygrique, le comportement des parois est analysé pour des périodes couvrant l’année et (ii) du point de vue thermique le comportement des parois est analysé pour des périodes d’une semaine. Les résultats des simulations présentés ci-après comprennent deux étapes : d’abord des simulations réalisées en terme de teneur en humidité (w) dans la pierre calcaire et d’humidité relative (φ) à l’interface entre la pierre et l’isolant sont exposées. Ces données sont illustrées à des pas de temps de l’heure pendant une année. La première étape permet d’avoir une première appréciation du comportement des parois (ITI et ITE) vis-à-vis de l’humidité. Ensuite, l’analyse du comportement thermique des parois est réalisée à partir des résultats en terme de température (T) et de flux de chaleur à la surface intérieure. Dans la deuxième étape on s’intéresse particulièrement au comportement thermique des parois en période d’été. Les données sont donc illustrées pour des périodes d’une semaine.

L’analyse du comportement hygrothermique des parois est d’abord réalisée dans des conditions “cas 2014” ; ensuite, un comparatif par rapport à ces résultats est réalisée pour des parois soumises à des conditions extrêmes de chaleur.

8.2.1 Résultats des simulations des parois rénovées avec ITI et ITE dans des conditions “cas 2014”

Dans ce chapitre sont exposés et discutés les résultats des simulations de parois anciennes en pierre calcaire rénovées (avec ITI et ITE), soumises à des conditions météorologiques à Paris en 2014. Ainsi, les conditions appliquées à la surface intérieure correspondent aux résultats des simulations (à l’échelle des logements) obtenues dans le salon de chaque logement ; les conditions appliquées à la surface extérieure correspondent aux données enregistrées dans la station météo (chapitre 4.3.2.1) pour l’année 2014. Concernant l’isolation thermique, les solutions adoptées dans la rénovation (dont le polystyrène PSE installé par l’extérieur et la

14. Dans les configurations avec isolation en béton de chanvre HLC1 φ varie entre 0,5 et 0,5014, tandis que dans les configurations avec laine minérale φ varie entre 0,5 et 0,5213 .

15. L’effet de la direction des joints est négligeable dans les conditions étudiées.

laine minérale installée par l'intérieur) sont comparées à des parois anciennes rénovées avec isolation en béton de chanvre HLC1 par l'extérieur et par l'intérieur. De plus, dans le cas de parois avec isolation thermique par l'intérieur, deux cas de figure sont analysés : (i) avec frein-vapeur et (ii) sans frein-vapeur.

8.2.1.1 Comportement des parois vis-à-vis de l'humidité : teneur en humidité (w) dans la pierre calcaire et humidité relative (φ) à l'interface entre la pierre et l'isolant

Comme mentionné au chapitre 7.3, la teneur en humidité (w) dans la pierre calcaire est étudiée comme un indicateur de l'effet de l'isolant sur le flux d'humidité. Lorsque le flux d'humidité rencontre la couche d'isolant, celle-ci agit comme élément diffuseur ou comme une barrière, faisant ainsi varier la valeur de w dans la couche avec laquelle l'isolant est en contact, dans ce cas la pierre. Dans la figure 8.16 sont illustrés les résultats des simulations de w dans la pierre calcaire des parois isolées par l'intérieur (ITI) avec de la laine minérale, et du béton de chanvre HLC1 (cas avec et sans frein-vapeur). Dans l'ensemble des configurations on constate une augmentation de w . Au cours de l'année quatre périodes sont repérées : (i) dans les deux premières semaines, on constate une rapide augmentation de la grandeur simulée, notamment dans la configuration en laine minérale sans frein-vapeur, mais également constatée pour les autres configurations ; (ii) après cette période la vitesse d'augmentation de w diminue jusqu'à début mars ; (iii) une troisième période est observée entre mi-mars et fin avril durant laquelle la valeur de w reste quasi constante dans le cas des parois avec ITI en polystyrène, et décroît dans les parois avec isolation en béton de chanvre HLC1 ; (iv) une dernière période est observée après fin avril jusqu'à la fin de la simulation en décembre où w augmente à une vitesse quasi constante avec des légères oscillations. En ITI la paroi avec isolation en laine minérale sans frein-vapeur présente la valeur de w la plus élevée ($19,73 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, le 19 décembre) ; la paroi en béton de chanvre HLC1 avec frein-vapeur présente à la fin de la simulation la valeur de w la plus faible ($17,14 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, le 18 décembre), i.e., au cours d'une année la paroi en laine minérale présente une valeur de w 55,7% supérieure à celle de la paroi en béton de chanvre avec frein-vapeur. Dans le cas de la paroi en laine minérale avec frein-vapeur l'écart entre les deux types de paroi avec frein-vapeur (à la fin de la période étudiée) est de $1,09 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, i.e., 34,6% supérieur dans la paroi avec isolation en laine minérale avec frein-vapeur.

Dans la figure 8.17 sont illustrés les résultats de w des parois isolées par l'extérieur (ITE) en polystyrène PSE et en béton de chanvre HLC1. En ITE l'évolution de w diffère dans les deux cas étudiés dès l'instant initial de la simulation. Pour la paroi avec isolation thermique en polystyrène PSE on constate une diminution de w entre janvier et avril (à l'exception des 10 premiers jours de janvier où w reste quasi constante autour de $14,81 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ entre le 01 et le 06, puis une très légère augmentation jusqu'au 10 janvier) ; après cette période, une augmentation de w se produit jusqu'au 21 octobre où w atteint sa valeur maximale de $15,47 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (valeur initiale de $14,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) ; à partir de cette date la valeur de w dans la paroi avec polystyrène PSE décroît à nouveau. Dans le cas de la paroi avec isolation en béton

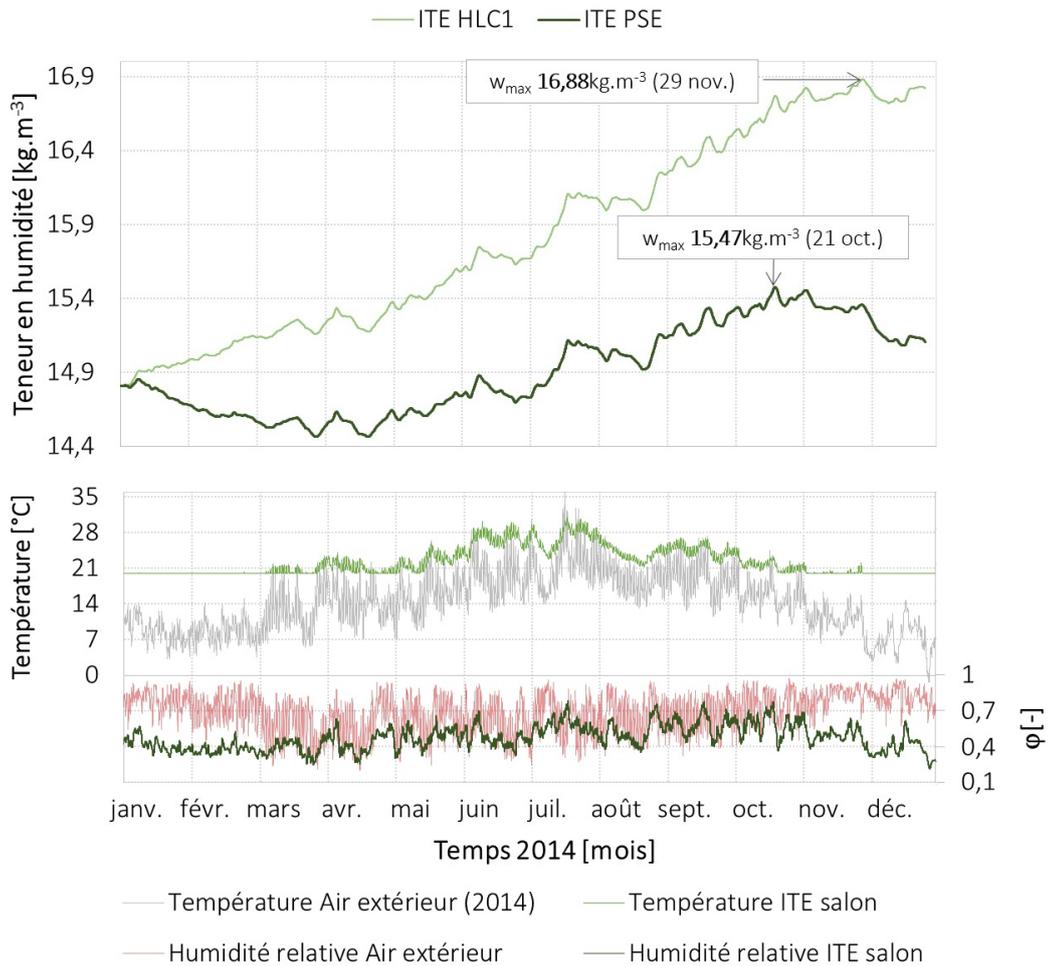


FIGURE 8.17 – Teneur en humidité dans la pierre calcaire paroi ITE “cas 2014”. Conditions aux limites intérieures et extérieures

Dans le cas de la paroi avec isolation thermique par l'extérieur avec du béton de chanvre HLC1, l'augmentation de la teneur en humidité dans la pierre est supérieure à celle de la paroi en polystyrène (augmentation de w de $2,01 \text{ kg.m}^{-3}$ sur un an), cependant, elle reste inférieure à la valeur de w dans les parois avec ITI en laine minérale (avec et sans frein-vapeur). L'isolation en béton de chanvre HLC1 facilite la migration de la vapeur d'eau à travers la paroi (ceci sous l'effet combiné des propriétés de diffusion et teneur en humidité du matériau). Au contraire, le polystyrène ayant une résistance à la diffusion de la vapeur très élevée ($\mu = 70$), reste un matériau quasi imperméable, agissant comme une barrière à la vapeur d'eau (figure 8.17).

Ce comportement est également constaté dans les résultats obtenus en terme de pression de vapeur (pv), dont la valeur la plus élevée est observée à l'interface entre la pierre calcaire

et l’isolation en béton de chanvre dans la paroi ITE. Dans cette configuration de paroi, pv augmente de manière progressive dans les premiers jours de la simulation, tandis que pour la paroi ITE en polystyrène pv reste constante autour de 1000Pa jusqu’à mars avant une augmentation de la température intérieure (annexe G, figure G.3). Dans le cas des parois avec isolation thermique par l’intérieur, la paroi avec de la laine minérale sans frein-vapeur présente les valeurs de pression de vapeur les plus élevées, tandis que les configurations des parois en béton de chanvre (avec et sans frein-vapeur) et laine minérale avec frein vapeur, suivent une évolution de pv proche dans les premiers six mois ; ensuite la configuration avec béton de chanvre avec frein-vapeur présente des évolutions de pv inférieures à celles d’autres configurations (annexe G figure G.3)

D’autre part, dans le cas de parois avec ITI et ITE lorsque l’on compare les résultats de teneur en humidité (w) avec les résultats d’humidité relative (φ)¹⁶, on constate que les parois qui présentent la valeur de w la plus élevée sont celles qui ont des évolutions de φ également élevées au cours de l’année.

Dans la figure 8.18 la paroi ITI en laine minérale (particulièrement celle sans frein-vapeur) présente une augmentation significatif de φ à l’interface entre la pierre et l’isolant¹⁷. Dans ces parois, on constate également des fluctuations régulières (journalières) qui ne sont pas observées pour la configuration en béton de chanvre (avec ou sans frein-vapeur), tel qu’illustrées dans la figure 8.19. Ce comportement est dû à la vitesse de diffusion de la vapeur plus importante dans la laine minérale que dans le béton de chanvre. Dans le cas de la paroi avec isolation thermique en béton de chanvre HLC1 sans frein-vapeur, on constate que la courbe de φ se trouve en dessous de celle obtenue avec isolation en laine minérale avec frein-vapeur. À la différence de la paroi en laine minérale sans frein-vapeur, l’humidité relative à l’interface de cette composition de paroi diminue entre janvier et avril (à l’exception des sept premiers jours de janvier où φ augmente dans l’ensemble des parois), puis φ augmente progressivement entre avril et novembre avec des diminutions localisées en juin-juillet et en août ; à partir de novembre, on constate que φ diminue à nouveau. La paroi en béton de chanvre HLC1 sous l’effet de la température est soumise au cours de l’année au processus de séchage et d’humidification sans qu’il y ait de l’accumulation d’humidité à l’interface comme c’est le cas pour la paroi en laine minérale sans frein-vapeur, où des conditions similaires se produisent (séchage/humidification), mais avec une augmentation au cours de l’année simulée.

16. Évolution de l’humidité relative à l’interface entre la pierre et l’isolant (point 3 figure 7.6)

17. Variation de φ entre 0,46 et 0,63 dans la paroi avec isolation en laine minérale avec frein-vapeur, et entre 0,46 et 0,79 sans le frein-vapeur

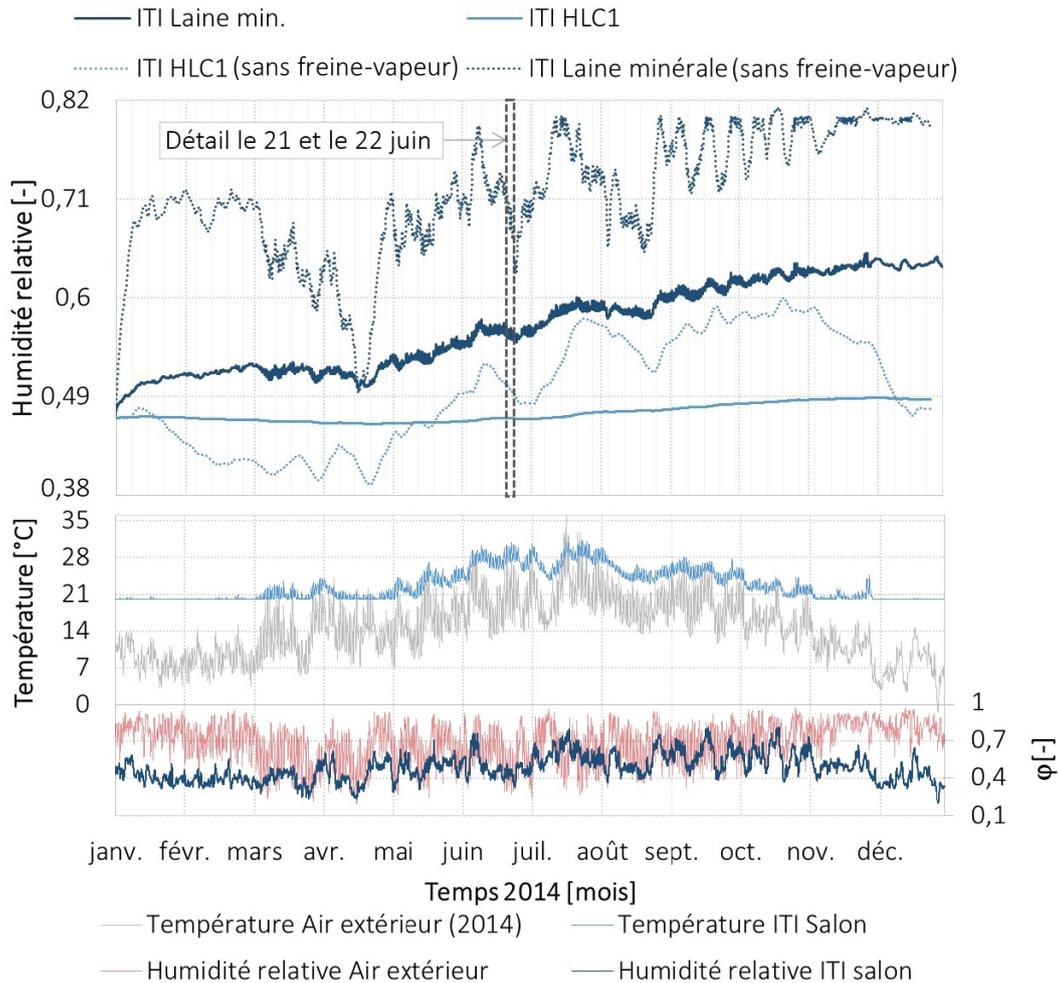


FIGURE 8.18 – Humidité relative (φ) à l'interface entre la paroi en pierre calcaire et l'isolation intérieure (ITI) : isolation en laine minérale et béton de chanvre HLC1 avec et sans frein-vapeur, dans des conditions "cas 2014". Conditions aux limites extérieures

Concernant l'humidité relative (φ) des parois ITE (figure 8.20), la paroi en polystyrène PSE, présente une évolution au cours de l'année quasi constante (avec une humidité relative minimale (φ_{min}) égale à 0,441 et maximale (φ_{max}) égale à 0,456). Dans cette paroi, φ décroît entre janvier et juillet et augmente entre juillet et décembre. Cette variation est négligeable vis-à-vis des valeurs maximales et minimales observées. Dans le cas de la paroi avec isolation en béton de chanvre HLC1, une augmentation de φ de 0,448 à 0,628 se produit dans une période de deux mois avant de diminuer entre mars et mi-avril, suite à une augmentation de la température moyenne intérieure et extérieure. Durant la période comprise entre mai et septembre, φ fluctue autour de 0,58 avant d'augmenter à nouveau lorsque les températures descendent. La variation de φ dans la paroi avec ITE en béton de chanvre HLC1, présente une augmentation non négligeable vis-à-vis de l'humidité. À la différence des parois en laine

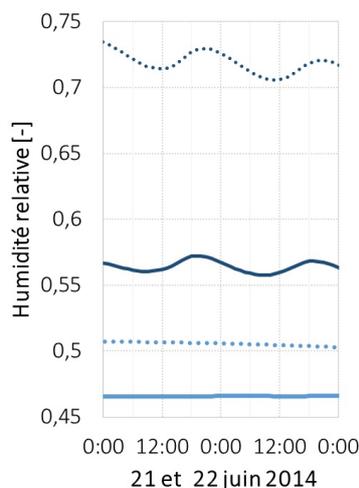


FIGURE 8.19 – Détail deux jours : humidité relative (φ) à l’interface entre la paroi en pierre calcaire et l’isolation intérieure (ITI)

minérale en ITI, les parois avec ITE ne présentent pas de variations journalière (figure 8.21).

D’autre part, si l’on compare les résultats aux conditions aux limites appliquées (figures E.1 et E.2), on constate que dans le cas des parois avec ITI sans frein-vapeur et la paroi avec ITE en béton de chanvre la valeur de φ décroît avec l’augmentation de la température. Ce qui permet d’établir un lien entre la variation de l’humidité de la paroi (en terme de w et de φ) et la température (T).

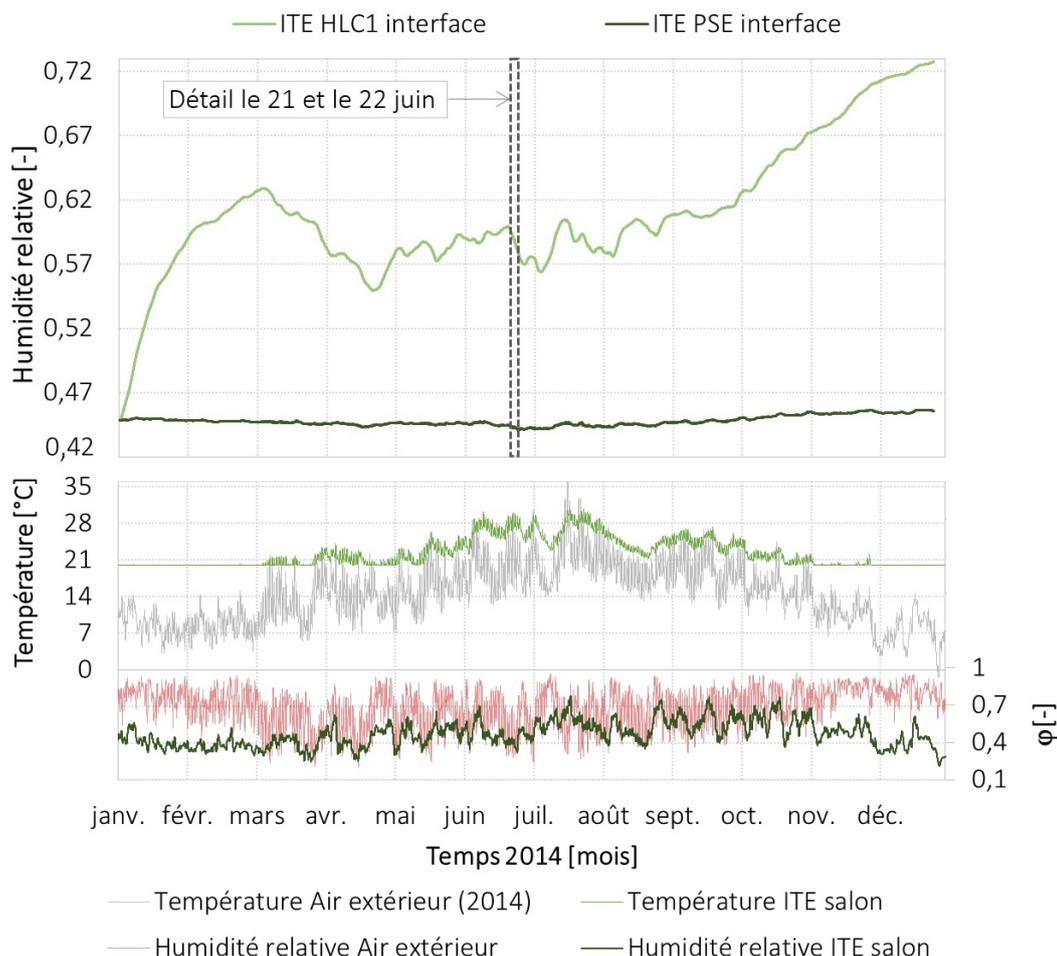


FIGURE 8.20 – Humidité relative (φ) à l'interface entre la paroi en pierre calcaire et l'isolation extérieure (ITE) : isolation en polystyrène PSE et béton de chanvre HLC1, dans des conditions "cas 2014". Conditions aux limites extérieures

Comme exposé précédemment, dans la paroi avec ITI en laine minérale avec frein-vapeur, la teneur en humidité (w) dans la pierre calcaire (figure 8.16) et l'humidité relative (φ) à l'interface pierre/isolant (figure 8.18) suivent une évolution croissante au long de l'année. Dans le cas de la paroi en béton de chanvre HLC1 sans frein-vapeur, w augmente également, mais reste inférieure au cas de la paroi en laine minérale avec frein-vapeur (figure 8.16). D'ailleurs entre janvier et juin la valeur de w est inférieure dans la paroi en béton de chanvre HLC1 sans frein-vapeur que celle avec frein-vapeur. Concernant l'évolution de l'humidité relative φ à l'interface entre la pierre et l'isolant en béton de chanvre HLC1 (sans frein-vapeur), on constate que la courbe reste toujours en dessous de celle en laine minérale, mais avec de plus grandes variations (figure 8.18). Afin d'étudier le comportement hygrique de ces deux types de parois (laine minérale avec frein-vapeur et béton de chanvre sans frein-vapeur), des simulations ont été réalisées sur une période de trois ans.

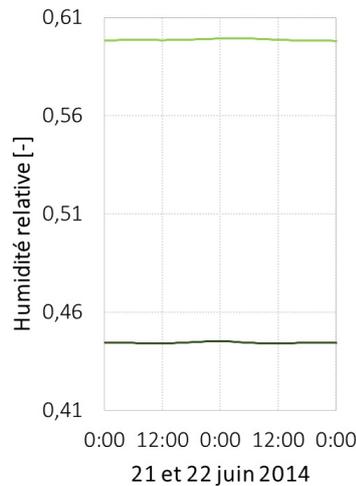


FIGURE 8.21 – Détail deux jours : : humidité relative (φ) à l’interface entre la paroi en pierre calcaire et l’isolation extérieure (ITE)

Les conditions aux limites appliquées à la surface intérieure correspondent aux résultats de simulation à l’échelle des logements dans le salon (en ITI) réalisée pour l’année 2014 (ces conditions sont appliquées pour les trois ans de forme cyclique); les conditions appliquées à la surface extérieure correspondent aux données enregistrées par la station météo durant la même année (figure 8.22).

Les figures 8.22a et 8.22b illustrent les résultats de simulations de teneur en humidité (w) et d’humidité relative (φ) pour les deux types de parois. On constate que le comportement des parois au cours des trois années est similaire à celui observé pour une période d’une année : les parois avec isolation en laine minérale présentent des valeurs de w et de φ supérieures à celles obtenues dans les parois avec isolation en béton de chanvre HLC1. En terme de w les parois ont une évolution croissante, cependant à la différence de la première année, la cinétique diminue chaque année sans que l’équilibre soit atteint au cours de la période étudiée. Dans le cas de la paroi avec béton de chanvre, le taux de croissance est inférieur à celui de la paroi en laine minérale. Dans le tableau 8.1 est calculée la différence entre la valeur de w à l’instant initial et à l’instant à la fin de chaque année ($\Delta w_x = w_{t=365} - w_{t=0}$). Il faut savoir que la valeur à l’instant final de l’année ne correspond pas à la maximale (w_{max}) de chaque cycle, car dans chaque paroi elle est atteinte à des périodes différentes (i.e. la valeur de w_{max} est décalée dans ces deux configurations). Dans la paroi en béton de chanvre HLC1, le point maximal du cycle est atteint quelques jours avant la fin de l’année, tandis que dans la paroi avec isolation en laine minérale, cette valeur est atteinte durant les premières semaines de l’année. Lorsque les températures augmentent, dans le béton de chanvre HLC1 la paroi commence à sécher plus rapidement, possiblement dû au fait que ce processus se produit à travers les deux surfaces de la paroi. Pour les parois avec isolation en laine minérale, Δw_1 est 3,2 fois supérieure à Δw_2 , et Δw_2 est 2,3 fois supérieure à Δw_3 . Dans le cas de la paroi en béton de chanvre Δw_1 est

8 fois supérieure à Δw_2 , et Δw_2 est 5,4 fois supérieure à Δw_3 . Sachant que Δw_n tend vers zéro, la paroi avec béton de chanvre aurait atteint l'équilibre plus rapidement que la paroi en laine minérale.

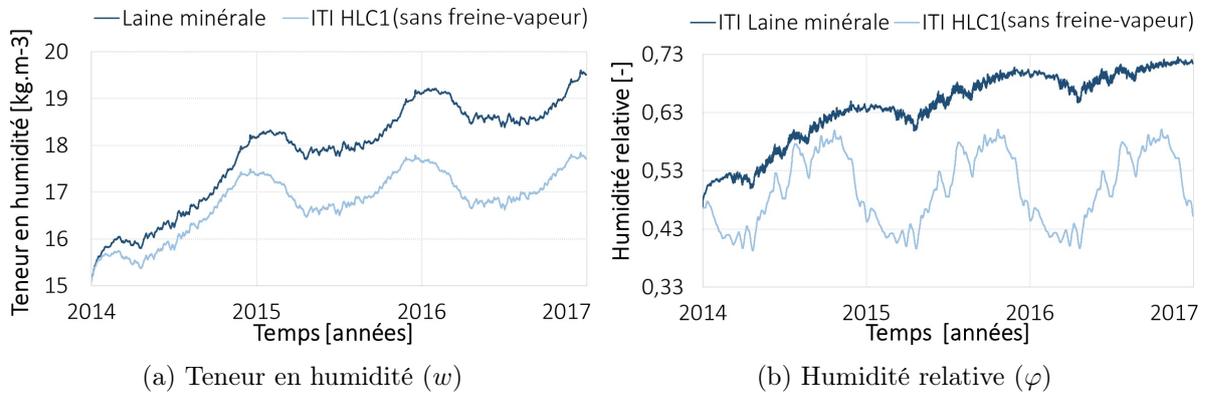


FIGURE 8.22 – Parois avec isolation thermique par l'intérieur (ITI) en laine minérale avec frein-vapeur et en béton de chanvre HLC1 sans frein-vapeur

Tableau 8.1 – Différence de teneur en humidité (Δw) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] dans la pierre calcaire entre l'instant initial et l'instant final de chaque année. Parois avec isolation en laine minérale et en béton de chanvre. *fv : frein-vapeur

Paroi ITI	Δw_1 année 1	Δw_2 année 2	Δw_3 année 3
Laine minérale (avec fv*)	3,07	0,948	0,412
Béton de chanvre HLC1 (sans fv)	2,294	0,285	0,052

Concernant les résultats d'humidité relative à l'interface entre la pierre calcaire et l'isolant, la paroi en béton de chanvre HLC1 présente un comportement cyclique, avec des pics d'humidité relative maximaux (φ_{max}) et minimaux (φ_{min}) quasi constants au cours de l'année. Dans le cas de la paroi avec isolation en laine minérale, φ_{max} augmente au cours de chaque cycle. Dans cette paroi un frein-vapeur a été installé entre le revêtement intérieur et l'isolant, empêchant le séchage de la paroi à travers cette surface.

8.2.1.2 Comportement thermique des parois : température et flux de chaleur à la surface intérieure

Comme expliqué précédemment, le comportement thermique des parois est étudié sur une semaine en été : du 22 au 30 juillet. Les figures 8.23a et 8.23b illustrent les températures obtenues à la surface intérieure des parois rénovées avec isolation thermique intérieure (ITI) et extérieure (ITE) respectivement¹⁸. Comme exposé dans les chapitres 5.1.2.1 et

18. Les données de température exposées dans les graphiques correspondent à celles observées au point 4 de la figure 7.6

5.2.3.1, durant la période d’été, le logement en ITI présente des valeurs de température de l’air supérieures à celles observées dans le logement en ITE. Durant la semaine étudiée ce comportement est également observé avec des températures qui varient entre 27,1°C et 31,3°C en ITI et 26,9°C et 30,6°C en ITE (figure 8.23).

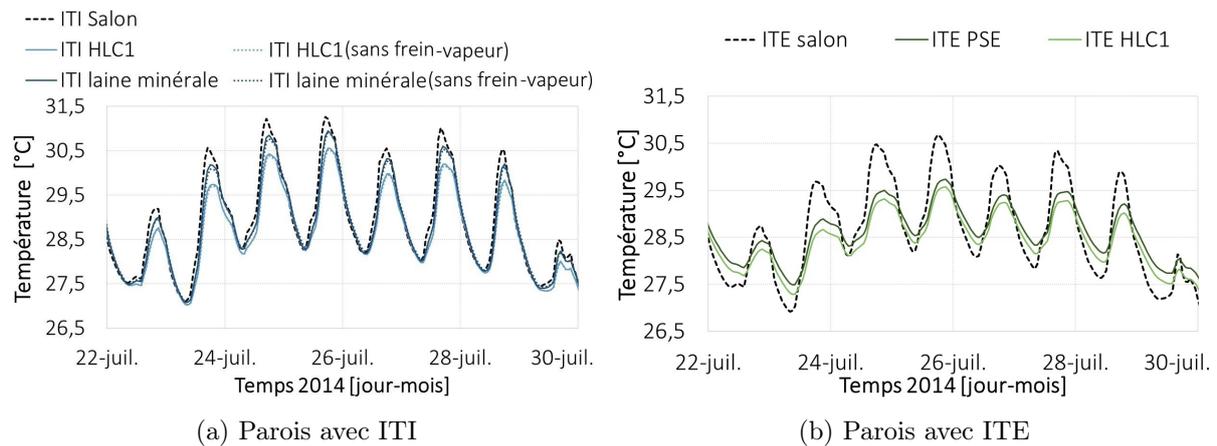


FIGURE 8.23 – Température à la surface intérieure (lignes continues et pointillées en couleur). Température de l’air du salon (ligne pointillée en noir), dans des conditions “cas 2014”

Les variations de la température à la surface des parois ITI en laine minérale (avec ou sans frein-vapeur), sont proches de celles dans le volume d’air (figure 8.23a). Dans ce cas, l’écart maximal de température (surface/air intérieur) est de 0,4°C la journée et de seulement 0,02°C durant la nuit (pour des cas ponctuels la température à la surface inférieure à celle de l’air, mais l’écart reste négligeable). Concernant les parois avec ITI en béton de chanvre HLC1 (avec ou sans frein-vapeur), les températures obtenues à la surface intérieure sont légèrement inférieures à celles de la paroi en laine minérale. Dans ce cas, l’écart maximal par rapport à la température de l’air intérieur est d’environ 0,8°C durant la journée et jusqu’à 0,3°C la nuit (la température à la surface étant inférieure à celle de l’air). Cependant, durant la nuit, la température des deux types de parois (avec isolation en laine minérale ou en béton de chanvre HLC1) est très proche à celle de l’air ; on observe que l’ensemble des courbes est quasiment superposé lorsque la température chute. D’autre part, on constate qu’il y a un déphasage d’environ une heure entre le pic maximal de température de l’air et celui observé à la surface des parois ITI. Ce déphasage et la différence de température journalière entre les deux types de parois sont liés à la capacité calorifique des isolants, laquelle est supérieure dans le béton de chanvre HLC1. Ainsi, le béton de chanvre HLC1 permet de stocker une plus grande quantité d’énergie (par rapport à la laine minérale) avant d’augmenter sa température. D’où des écarts de température à la surface entre les deux types de parois. Concernant le frein-vapeur, celui-ci semble ne pas avoir d’effet sur la température à la surface intérieure.

Dans le cas des parois ITE (figure 8.23b), la température à la surface est inférieure à celle observée dans les parois ITI. Concernant la paroi ITE en polystyrène PSE, l’écart de

température entre la surface et celle de l'air durant la journée atteint $1,02^{\circ}\text{C}$ (la température de l'air étant supérieure à celle calculée à la surface) et $0,51^{\circ}\text{C}$ pendant la nuit (la température à la surface est supérieure à celle de l'air, i.e. l'écart de température jour/nuit à la surface est inférieur à celui de l'air). Dans le cas de la paroi avec isolation en béton de chanvre HLC1, la courbe de température est légèrement inférieure à celle en polystyrène PSE. Ainsi, durant la journée, l'écart de température à la surface par rapport à la température de l'air dans le salon est supérieur à celui observé dans la paroi isolée avec polystyrène PSE (allant jusqu'à $1,5^{\circ}\text{C}$). Cependant, durant la nuit, cet écart se réduit, i.e., la courbe de température de l'air et celle à la surface de la paroi en béton de chanvre HLC1 sont rapprochées ($\Delta T_{max} = 0,30^{\circ}\text{C}$). D'autre part, le pic de température maximal à la surface des parois ITE en polystyrène PSE et béton de chanvre HLC1 est atteint deux heures après le pic de température de l'air dans le salon, i.e. une heure plus tard par rapport aux parois ITI. Dans les parois ITE, la pierre est en contact avec le volume d'air intérieur. Ce matériau se caractérise par une très grande inertie thermique. Ce matériau a la capacité d'emmagasiner une grande quantité d'énergie sans augmenter sa température. Par conséquent, les températures à la surface de la paroi sont moins fluctuantes que celle de la paroi en ITI.

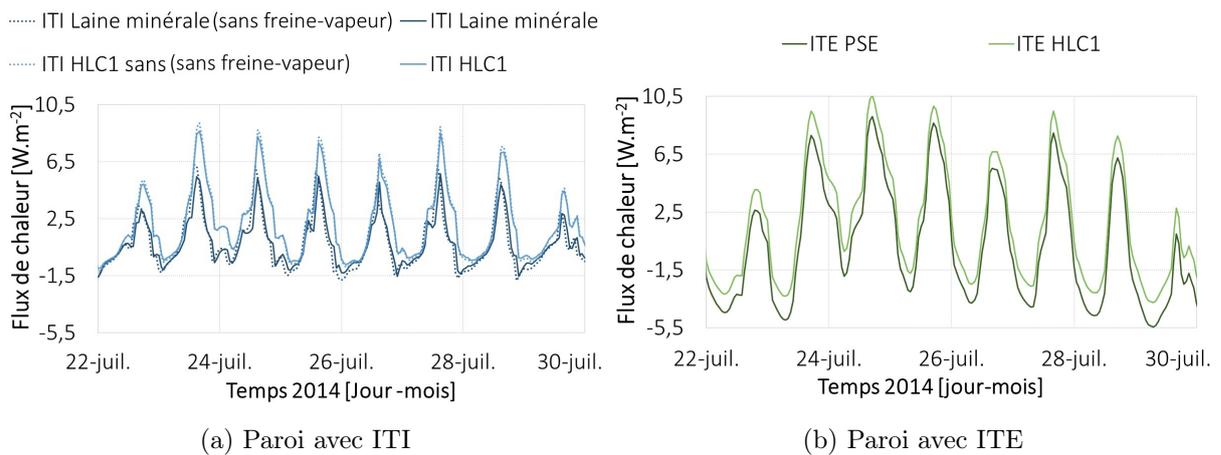


FIGURE 8.24 – Flux de chaleur échangé à la surface intérieure (lignes continues et pointillés en couleur), dans des conditions de “cas 2014”

Sur les figures 8.24a et 8.24b sont présentées les résultats de flux de chaleur échangé à la surface intérieure des parois avec ITI et ITE respectivement. On constate que dans le cas des parois ITI (figure 8.24a), où la température à la surface est proche de celle de l'air intérieur, le flux de chaleur est inférieur à celui des parois ITE (figure 8.24b) où l'écart de température entre la surface et celle de l'air est plus important. Dans le cas des parois ITI, le flux de chaleur varie entre $-1,6$ et $5,5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ dans la paroi avec isolation en laine minérale (avec frein-vapeur); et entre $1,9$ et $6,3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ dans la paroi avec isolation en béton de chanvre HLC1 (avec frein-vapeur)¹⁹. Dans le cas des parois sans frein-vapeur le flux de chaleur échangé à

19. Un flux de chaleur entrant dans la paroi est considéré positif, un flux de chaleur sortant est noté

la surface est supérieur à celui de parois avec frein-vapeur (différence maximale de $0,8\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ pour la paroi en laine minérale et de $0,5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ dans la paroi avec béton de chanvre HLC1). Pour les parois ITE, le flux de chaleur varie entre $-4,8$ et $9,1\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (paroi avec isolation en polystyrène PSE) et entre $-4,1$ et $10,6\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (paroi avec ITE en béton de chanvre HLC1). Des valeurs de flux de chaleur pour le béton de chanvre HLC1 sont supérieures à celles de la paroi en polystyrène PSE).

8.2.2 Résultats des simulations des parois rénovées avec ITI et ITE dans des conditions “vague de chaleur”

Dans le cadre de cette thèse on s’intéresse au comportement hygrothermique des logements soumis à des conditions extrêmes de chaleur. Ainsi, des simulations des parois rénovées en ITI et ITE (ayant une même configuration que dans le cas précédent) ont été conduites dans des conditions de “vague de chaleur”. Dans ce chapitre les résultats sont exposés et commentés. Concernant les conditions appliquées aux deux surfaces elles sont présentés dans l’annexe F. En vague des chaleur, la température dans le salon est, durant la période d’été, très élevée, et l’humidité relative (φ) inférieure à celle obtenue dans des conditions “cas 2014” : φ fluctue entre 0,25 et 0,7 (figures E.1, E.2, F.1 et F.2, en annexe E et F).

8.2.2.1 Comportement des parois vis-à-vis de l’humidité : teneur en humidité (w) dans la pierre calcaire et humidité relative (φ) à l’interface entre la pierre et l’isolant

Sur les figures 8.25 et 8.26 sont illustrés les résultats de simulation de teneur en humidité w dans la pierre, des parois soumises à des conditions de “vague de chaleur”. Dans le cas des parois avec ITI, w montre une évolution toujours croissante (à la différence des parois soumises à des conditions “cas 2014” où pendant environs six semaines w décroît). Cependant, la valeur maximale de w est proche de celle trouvée au bout d’un an de simulation dans des conditions “cas 2014” (w légèrement inférieure dans le cas de la paroi en béton de chanvre HLC1 et légèrement supérieure dans le cas de la paroi en laine minérale). Dans le cas des parois avec isolation thermique intérieure (ITI), on distingue trois zones (figure 8.25) : (i) dans les trois premières semaines w augmente rapidement (de forme similaire à la zone (i) des parois avec ITI dans de conditions “cas 2014”). Dans cette zone l’écart maximal entre la paroi en laine minérale et en béton de chanvre HLC1 (les deux avec frein-vapeur) est de $0,14\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. (ii) une deuxième zone est comprise entre la fin de janvier et la deuxième semaine d’août où w présente une légère augmentation. Cette augmentation reste cependant plus importante dans la paroi avec isolation en laine minérale (d’autant plus que le frein-vapeur est omis), i.e., l’écart entre les deux solutions d’isolation augmente progressivement en fonction du temps. À partir des deux dernières semaines d’août, on note une dernière zone (iii) dans laquelle, lorsque la température (intérieure et extérieure) décroît, le processus d’augmentation de w s’accélère. Dans cette zone, w atteint sa valeur maximale le 16 décembre pour les quatre types de solutions thermiques étudiés.

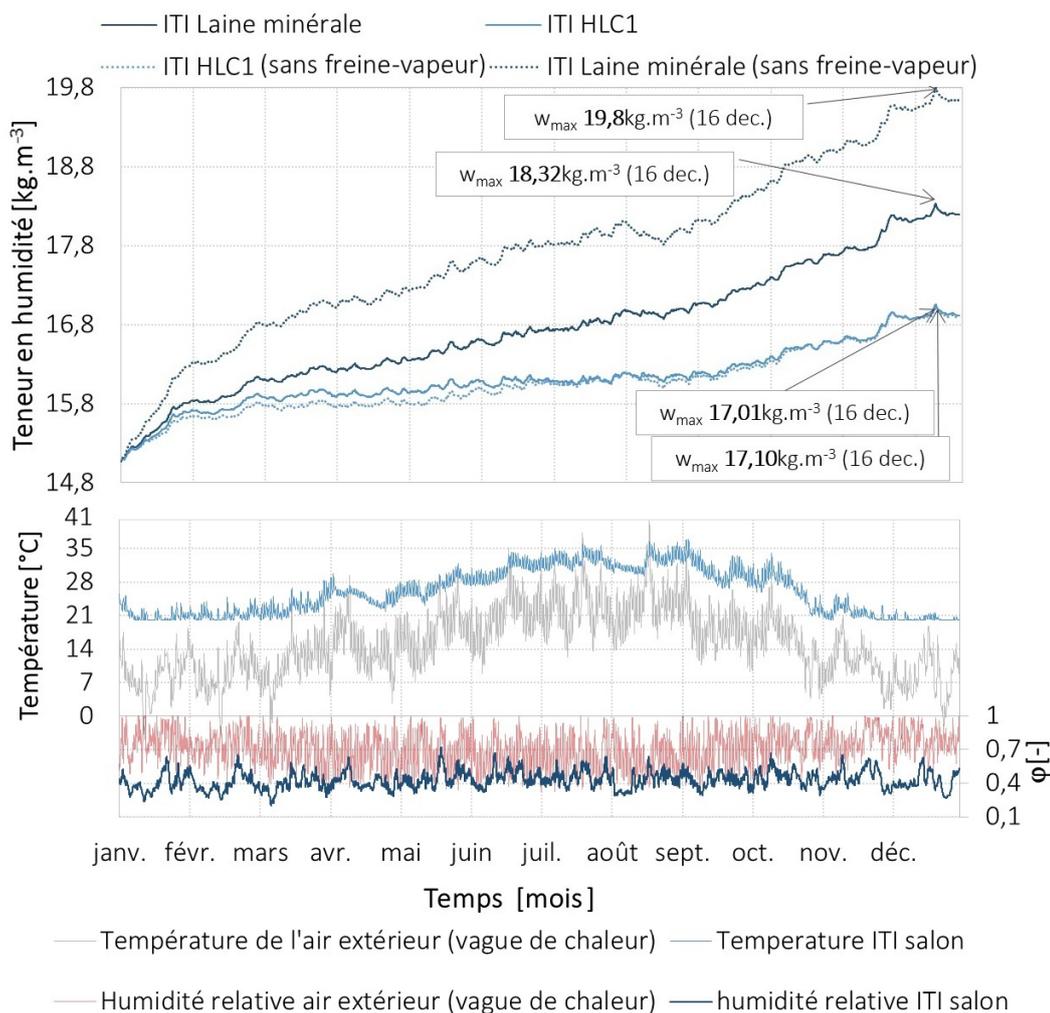


FIGURE 8.25 – Teneur en humidité (w) dans la pierre calcaire paroi ITI soumise à des conditions “vague de chaleur”. Conditions aux limites intérieures et extérieures

D'autre part, les parois avec ITI en béton de chanvre HLC1 avec et sans frein-vapeur présentent une évolution de w similaire au cours de l'année simulée. Durant les sept premiers mois, dans la paroi sans frein-vapeur, w est légèrement inférieure à celle de la paroi avec frein-vapeur. Suite à cette période, on observe que les valeurs de w dans les deux compositions de paroi (avec et sans frein-vapeur) est très proche. Dans le cas de la paroi sans frein-vapeur, les échanges d'humidité avec l'air environnant se produisent à travers les deux surfaces (extérieure et intérieure). La couche en béton de chanvre HLC1 facilite le processus de séchage et d'humidification auquel est soumis la paroi au cours de l'année.

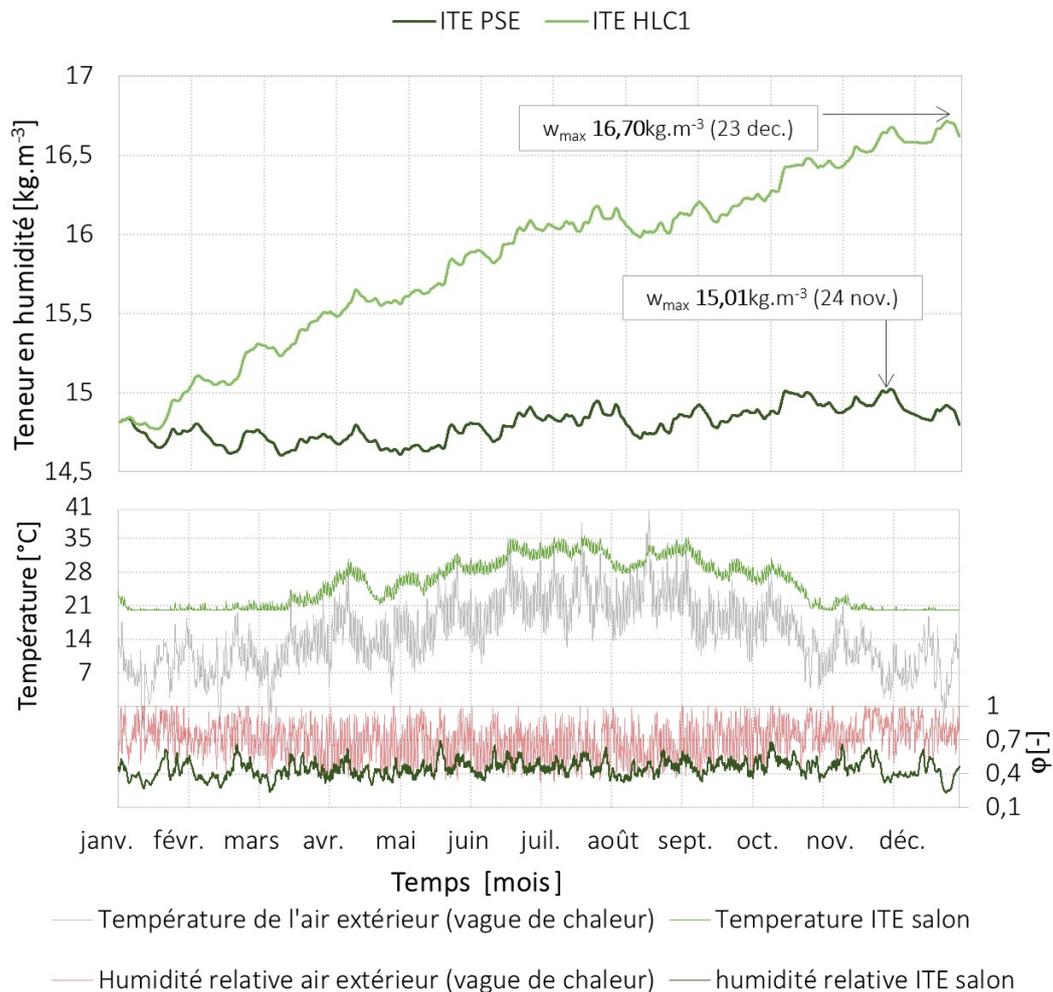


FIGURE 8.26 – Teneur en humidité w dans la pierre calcaire paroi ITE soumise à des conditions “vague de chaleur”. Conditions aux limites intérieures et extérieures

Dans le cas des parois avec isolation thermique par l’extérieur (ITE), les valeurs maximales de w trouvées sont très proches de celles de parois dans des conditions “cas 2014” (w est légèrement inférieure de $0,18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ dans la cas de la paroi ITE en polystyrène PSE et de $0,30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ dans la paroi en béton de chanvre HLC1). Cependant, en “vague de chaleur”, pour la paroi avec isolation en polystyrène PSE l’évolution de w au cours de l’année ne suit pas la même évolution que celle des parois soumises à des conditions “cas 2014”. Dans la figure 8.26, l’évolution de w dans la paroi ITE en polystyrène PSE est quasi constante autour de $14,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Dans des conditions de “vague de chaleur”, la teneur en humidité présente des fluctuations (de charge et décharge d’humidité) fréquentes, sans qu’une augmentation ou diminution notable de w soit constatée comme dans le cas de la paroi soumise à des conditions “cas 2014”.

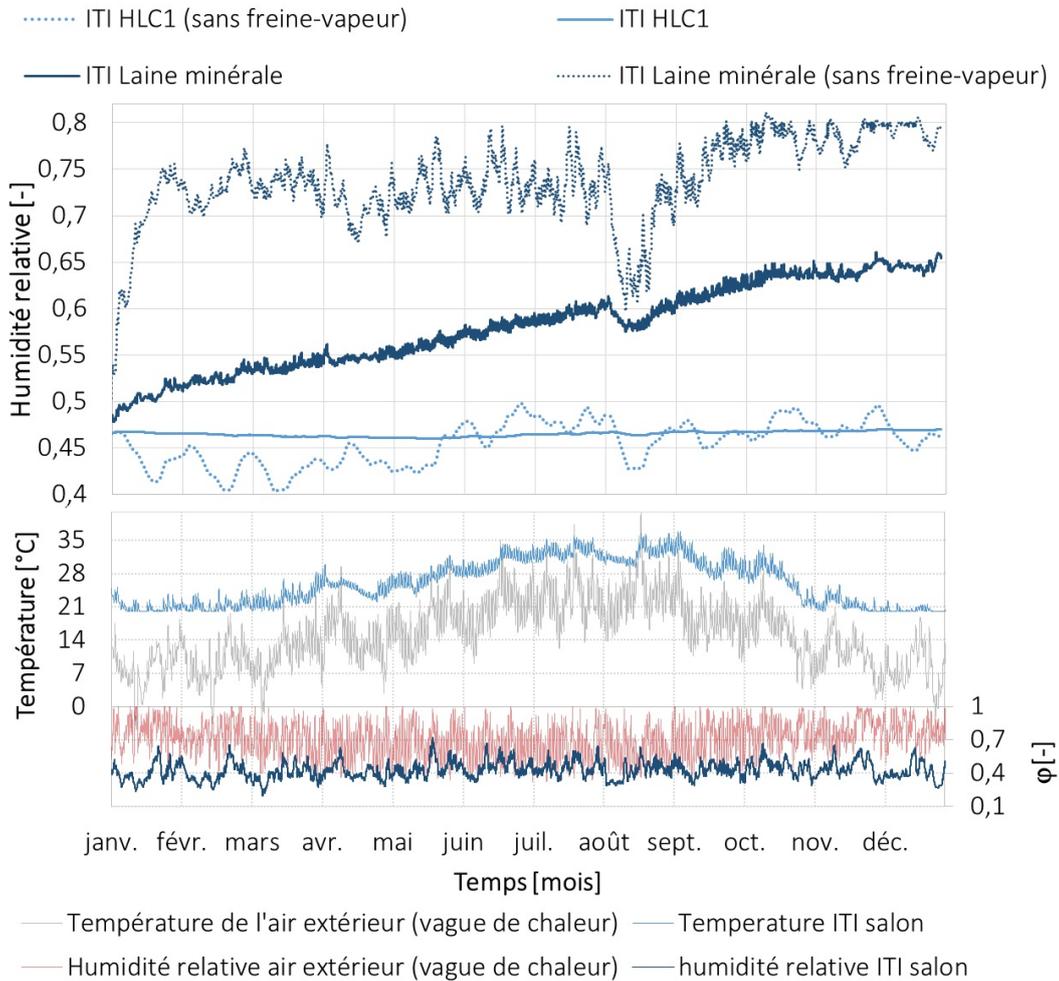


FIGURE 8.27 – Humidité relative interface pierre-isolant paroi ITI “cas vague de chaleur”. Conditions aux limites extérieures

Concernant la paroi ITE en béton de chanvre HLC1, le comportement reste très proche de celui observé dans des conditions “cas 2014”. On constate une augmentation non négligeable de w lorsque la couche d’isolation en béton de chanvre HLC1 est mise à l’extérieur. Ce comportement peut, en partie, être expliqué par le fait que l’humidité provenant de l’extérieur (et circulant d’abord à travers le béton de chanvre et ensuite la pierre) prend plus de temps à être évacuée à travers la surface intérieure. Dans le cas de la paroi avec isolation en polystyrène PSE, l’humidité provenant de l’extérieur est pratiquement bloquée par ce matériau ; les échanges d’humidité se produisent principalement à travers la surface intérieure.

Concernant l’humidité relative (φ)²⁰, on constate qu’en “vague de chaleur”, les parois ITI avec frein-vapeur présentent une évolution de φ similaire à celle des parois ITI avec

20. Évolution de l’humidité relative à l’interface entre la pierre et l’isolant (point 3 figure 7.6)

frein-vapeur soumises à des conditions “cas 2014”. Par exemple, la paroi ITI en laine minérale présente également de fluctuations journalières qui ne sont pas constatées dans la paroi avec isolation en béton de chanvre HLC1 avec frein-vapeur.

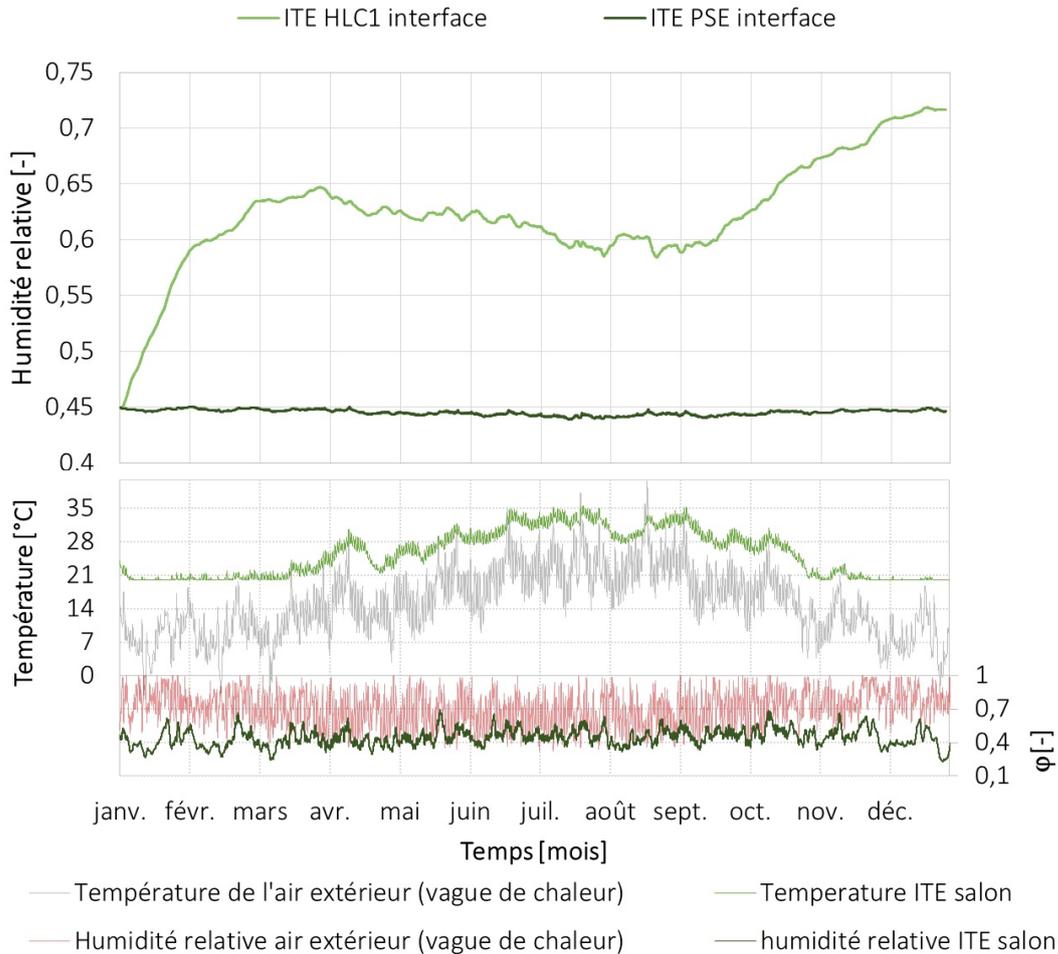


FIGURE 8.28 – Humidité relative interface pierre-isolant paroi ITI “cas vague de chaleur”. Conditions aux limites extérieures

Dans le cas de la paroi ITI en béton de chanvre HLC1 sans frein-vapeur, l'évolution de φ diffère de celle observée dans le même type de paroi avec des conditions “cas 2014” : la variation annuelle de φ est inférieure dans le cas de la paroi dans des conditions “vague de chaleur”. Dans la paroi en béton de chanvre HLC1 sans frein-vapeur, φ est, durant les 5 premiers mois, légèrement inférieure à celle de la paroi avec frein-vapeur (même type d'isolant). À partir de la fin du mois de mai φ augmente légèrement et présente une évolution oscillant autour de la valeur de φ dans la paroi avec frein-vapeur. La courbe de φ en béton de chanvre HLC1 sans frein-vapeur présente plus des fluctuations mensuelles en comparaison à la paroi avec frein-vapeur.

Concernant les parois avec isolation thermique par l'extérieur (figure 8.28), les résultats de simulation en vague de chaleur montrent un comportement similaire par rapport aux parois soumises à des conditions "cas 2014". La paroi n'est significativement pas impactée par ces conditions. Dans le cas de la paroi avec isolation en polystyrène, la différence est négligeable (écart maximal de φ : 0,008). Dans le cas de la paroi en béton de chanvre HLC1, on constate qu'à la différence de la paroi dans des conditions "cas 2014", la diminution de φ qui se produit après mars, est plus lente, i.e. φ diminue progressivement durant une période plus longue (entre mars et septembre), tandis que pour l'autre paroi cette diminution se produit sur une période de deux mois.

8.2.2.2 Comportement thermique des parois : température et flux de chaleur à la surface intérieure

Les figures 8.29 et 8.30 illustrent les résultats de simulation des parois soumises à des conditions de vague de chaleur. Dans ce chapitre la période d'étude correspond à celle adoptée au chapitre 8.2.1.2 : une semaine en été, du 22 au 30 juillet, durant laquelle la température et le flux à la surface intérieure sont étudiés.

Les résultats de simulations en terme de température à la surface intérieure des parois rénovés avec ITI et ITE sont respectivement exposés sur la figure 8.29a et 8.29b. Les courbes de température de l'air intérieur (simulée dans le salon) sont également présentées. En vague de chaleur, la température de l'air dans le salon du logement avec ITI est jusqu'à 7,46°C supérieure à celle dans des conditions "cas 2014", en journée, et jusqu'à 6,12°C le soir. Dans le logement avec ITE l'écart maximal de température entre les conditions ("vague de chaleur" et "cas 2014") est de 7,78°C en journée et de 6,5°C le soir ; pour des températures toujours supérieures en ITI par rapport à ITE. Concernant la paroi ITI en laine minérale, on constate que les écarts journaliers entre la température à la surface et l'air dans le salon sont similaires à ceux observés dans des conditions "cas 2014" (ΔT_{max} égale à 0,43°C, le 27 juillet à 17h00 (UTC+2)). Durant la nuit, l'écart maximal de température (entre la surface et l'air) généré en "vague de chaleur" est de 0,14°C. Concernant la paroi avec ITI en béton de chanvre HLC1, on constate que l'écart maximal de température est légèrement supérieur à celui trouvé dans les conditions "cas 2014", jusqu'à 1,03°C en journée et 0,41°C la nuit (la température à la surface de la paroi étant toujours inférieure à celle de l'air dans le salon).

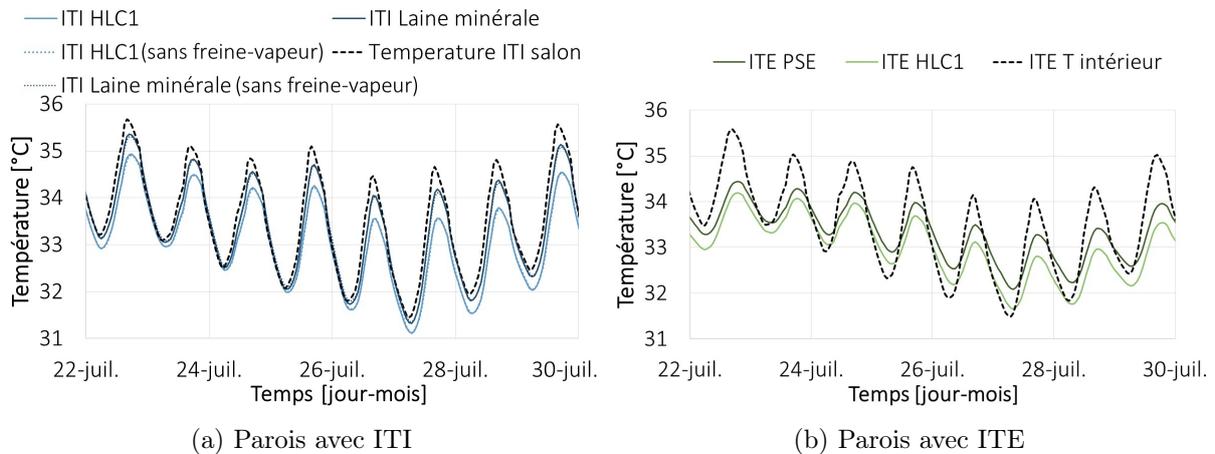


FIGURE 8.29 – Température à la surface intérieure (lignes continues et pointillées en couleur). Température de l’air (ligne pointillée en noir) dans des conditions de “vague de chaleur”

Concernant les parois ITE en polystyrène PSE et béton de chanvre HLC1 (figure 8.29b), on constate que les écarts jour/nuit sont toujours inférieurs aux écarts dans les parois avec ITI. Cependant, à la différence des conditions “cas 2014”, pour la paroi en béton de chanvre HLC1, la température à la surface est durant quatre nuits inférieure à celle de l’air (dans des conditions “cas 2014” la température à la surface des parois ITE avec cet isolant est toujours supérieure la nuit et inférieure le jour). Dans le cas de la paroi ITE en polystyrènes PSE, le comportement en terme de température en vague de chaleur est proche de celui observé dans des conditions “cas 2014”.

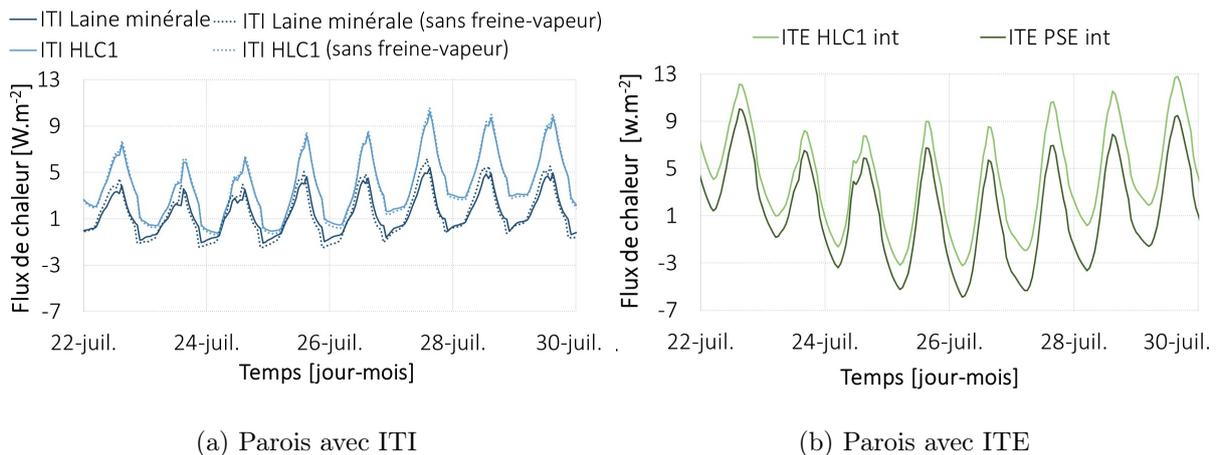


FIGURE 8.30 – Flux de chaleur échangé à la surface intérieure (lignes continues et pointillés en couleur), dans des conditions de “vague de chaleur”

L'évolution des flux de chaleur est présentée sur la figure 8.29. Pour la paroi ITI en laine minérale (avec frein-vapeur), le flux de chaleur varie entre environ $-1,1$ et $5,2\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (les variations du flux de chaleur dans la paroi sans frein-vapeur sont légèrement supérieures). Dans la paroi avec béton de chanvre HLC1 (avec frein-vapeur) la variation du flux est comprise entre $-0,21$ et $10,23\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (de même que pour la paroi en laine minérale, la variation du flux de chaleur dans la paroi sans frein-vapeur est légèrement supérieure). Concernant la paroi avec ITE, les variations restent supérieures à celles observées dans les parois avec ITI. Dans le cas de la paroi avec isolation en polystyrène PSE, le flux de chaleur varie entre $-5,74$ et $9,98\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Dans le cas de la paroi avec isolation en béton de chanvre HLC1, la courbe est décalée vers le haut avec des variations comprises entre $-3,16$ et $11,48\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ durant la période étudiée.

Conclusions partie III

La partie III a été structurée en trois chapitres. Dans le chapitre 6 les équations du modèle KÜNZEL adopté pour évaluer les transferts de chaleur et de masse à travers la paroi, les hypothèses appliquées, ainsi que la validation du modèle ont été présentés. Ensuite, dans le chapitre 7 les caractéristiques des configurations étudiées, ainsi que les propriétés des matériaux les constituant ont été exposés. Dans le chapitre 8 les résultats de l'analyse des configurations dans des conditions aux limites sinusoïdale et échelon ont été montrés. Dans ce dernier chapitre, on présente enfin les résultats du comportement d'une paroi soumise à des conditions "cas 2014" et "vague de chaleur".

Dans le chapitre 6, les équations du modèle de transferts de chaleur et de masse (1D et 2D) à travers une paroi multicouche ont été décrites. Ce modèle a été implémenté dans le logiciel COMSOL afin d'évaluer le comportement hygrothermique des configurations de parois anciennes rénovées. La validation du modèle a été réalisée à l'aide de deux exercices du benchmark HAMSTAD. Les résultats obtenus nous ont permis de constater la précision du modèle : dans les deux exercices, les résultats étaient en bon accord avec les résultats du benchmark, validant ainsi notre modèle.

Dans cette dernière partie on a proposé d'étudier le comportement hygrothermique des parois et l'effet des joints à travers 17 configurations dans lesquelles on a fait varier la part volumique et la direction des joints. Ces configurations ont été évaluées dans les deux techniques d'isolation ITI et ITE (chapitre 7). Les parois rénovées avec ITI en laine minérale et avec ITE en polystyrène PSE ont été comparées à des parois rénovées avec une isolation proposée dans cette partie : le béton de chanvre HLC1. Contrairement aux matériaux mis sur place, ce matériau possède des propriétés hygriques, d'où l'intérêt de comparer les parois avec cette alternative d'isolation. Dans la partie II le résultat du calage du modèle a permis d'obtenir les propriétés thermiques des matériaux. Une fois le matériau identifié, les propriétés hygriques (également issues de la littérature et de la base des données de WUFI) sont venues compléter les informations nécessaires pour la simulation des transferts de chaleur et de masse.

Dans le dernier chapitre de cette thèse (chapitre 8) ont été présentés les résultats des simulations des configurations et leur analyse à travers la méthode ACP. L'ACP a été confrontée aux résultats de la variable en fonction du temps (évolution temporelle de la variable); montrant une cohérence entre les deux. L'utilisation atypique de l'ACP, a mis en évidence que les composantes créées dans la méthode étaient logiquement influencées par la dynamique des données. Par exemple, la composante 1 (Dim 1 des graphiques), explique dans des pourcentages très élevés le comportement de l'ensemble des configurations pour chaque jeu de variables. Dans les résultats de l'ACP, on a constaté que dans les variables de flux de chaleur, flux de masse (pris à la surface intérieure) et la teneur en humidité de la pierre calcaire, l'effet des couches isolantes venait effacer l'effet des joints dans les

configurations (ceci dans les conditions analysées). Cependant lorsqu'on a étudié l'effet des joints sur l'humidité relative à l'interface entre la pierre et l'isolant, on a trouvé par l'ACP une dispersion des configurations qui se traduit par un comportement différent entre la pierre et les joints. Cet effet des joints n'est cependant pas dissocié de la nature et de la position de la couche isolante, car dans le cas de la laine minérale, l'humidité relative à l'interface présente des valeurs supérieures que dans les joints. En effet l'humidité se déplace plus rapidement à travers les joints qu'à travers la pierre. Dans les résultats de l'ACP sur l'humidité relative à l'interface entre la pierre et l'isolant on a constaté que l'humidité aurait plus d'impact pour les configurations dont la part volumique des joints est la plus faible. Cette étape d'analyse nous a conduit ainsi à étudier le comportement d'une configuration de paroi sans joints dans des conditions météorologiques à Paris : "cas 2014" et "vague de chaleur".

Les résultats du comportement des parois du point de vue hygrique (teneur en humidité dans la pierre et humidité relative à l'interface isolant/pierre) dans des conditions météorologiques à Paris "cas 2014" ont permis de constater l'effet des isolants sur les grandeurs mentionnée. Ainsi, dans la paroi avec isolation en béton de chanvre HLC1 (avec ou sans frein-vapeur), la teneur en humidité augmente plus lentement que dans la paroi en laine minérale. Dans le cas de la paroi ITE, la couche en béton de chanvre HLC1 fait augmenter la valeur de la teneur en humidité de la pierre. On constate que la solution en béton de chanvre HLC1 sans frein-vapeur permet une régulation de l'humidité relative avec des cycles de séchage et humidification (période de trois ans). D'ailleurs en comparant la teneur en humidité dans la pierre (w) et l'humidité relative (φ) à l'interface entre les deux types d'isolant en ITI (laine minérale et béton de chanvre) les courbes de w et φ avec isolation en béton de chanvre évoluent toujours en dessous de la courbe avec laine minérale. Concernant le comportement des parois du point de vue thermique on constate que la paroi avec ITE présente des températures inférieures à celle observées dans la paroi avec ITI, mettant en évidence le rôle de la pierre calcaire.

Concernant le comportement des parois dans des conditions de "vague de chaleur", on constate une évolution toujours croissante de φ et w dans l'ensemble des configurations (ITI et ITE), à l'exception de la paroi ITE en polystyrène où la courbe de w et φ reste quasi constante au cours de l'année.

Conclusions générales et perspectives

Ce travail de thèse a permis d'évaluer le comportement hygrothermique des logements anciens (façade principale en pierre calcaire) rénovés (avec ITE en polystyrène PSE et ITI en laine minérale), dans des conditions météorologiques actuelles et lors d'une vague de chaleur à travers une approche multi-échelle.

Dans la partie I, l'approche bibliographique a mis en évidence un manque d'études prospectives intégrant les évolutions du climat dans l'évaluation des stratégies de rénovation pour une ville ancienne et historique comme Paris. D'autre part, on a pu constater que peu d'études traitent l'aspect multi-échelle dans l'évaluation de la rénovation du bâti ancien. L'approche bibliographique a ainsi permis de mettre en évidence des manques que ce travail a essayé de combler.

Les parties II et III ont explicité le cas d'étude de ce projet : deux appartements occupés, du XIX^e siècle, situés dans le 20^{ème} arrondissement de Paris, rénovés différemment (ITE et ITI). Ces deux logements, voisins, ont servi de base pour la construction des modèles (échelle du bâti et échelle de paroi), ainsi que la mise en place de la campagne de mesure de température et d'humidité relative, dans le volume d'air. Pour le modèle à l'échelle du bâti, le processus utilisé est assez classique : mise en place du modèle sous EnergyPlus, calage des paramètres sur une période et validation sur une autre période. A l'échelle de la paroi, une campagne expérimentale n'a pu être réalisée. Le modèle de transfert de chaleur et de masse dans la paroi poreuse multicouche développé sous COMSOL a alors été validé par des résultats de la littérature (benchmark HAMSTAD). Les conditions météorologiques ont été étudiées à deux niveaux : conditions météorologiques "actuelles" ("cas 2014 et 2015") et un scénario hypothétique de vague de chaleur. Les résultats de l'ensemble des modèles sont en bon accord avec les mesures expérimentales ou les résultats du benchmark.

À l'échelle des logements, l'effet des couches isolantes sur les conditions intérieures a pu être évalué. Du point de vue thermique, en période d'inoccupation et estivale, les conditions sont plus "amorties" dans le logement avec ITE que dans le logement avec ITI, ceci sous l'effet de la pierre calcaire en contact avec le volume d'air. Dans le cas du logement ITI une accumulation de la chaleur a été observée, notamment dans les zones exposées au soleil. Lors d'une période d'inoccupation (prise en compte uniquement de la réponse du bâti), la température maximale atteinte en ITI est toujours supérieure, dans le salon, à celle en ITE, indépendamment des conditions météorologiques (1°C d'écart en conditions actuelles et 2°C d'écart en vague de chaleur). Au-delà de ces températures maximales, les résultats ont mis en évidence un temps d'exposition à des températures intérieures supérieures à 30°C plus important en ITI qu'en ITE, en inoccupation ou occupation et quels que soient les conditions météorologiques étudiées. Ainsi, ce temps d'exposition peut aller jusqu'à 100% du temps en période d'occupation pour les conditions de vague de chaleur. Ce résultat peut s'avérer

critique pour certaines catégories de la population (enfant, personne âgée, malade...) si une solution de rafraîchissement n'est pas mise en œuvre. Ce type de résultat montre ainsi l'importance de la prise en compte à la fois de la simulation dynamique mais également de l'évolution du climat afin d'appréhender au plus tôt, par la mise en œuvre de solutions techniques et technologiques, les températures maximales atteintes dans un logement. Dans le cadre de cette thèse, la rénovation des logements anciens a été étudiée sous l'angle des effets sur les conditions intérieures en termes de température et d'humidité relative. Il peut être envisagé d'orienter des futures recherches sur l'effet de la rénovation sur la consommation de chauffage et de climatisation ; toujours sous un angle prospectif qui intègre les conditions du climat futur. Il serait également intéressant d'envisager l'impact de l'orientation et l'effet de l'environnement urbain proche.

De plus, les résultats ont pu mettre en lumière : (i) l'utilité de mesurer de manière concomitante la température et l'humidité. Ces deux grandeurs s'avèrent complémentaires dans une analyse fine des résultats de la campagne de mesure ; (ii) avoir une connaissance maximale du comportement des occupants permet une compréhension plus pertinente des résultats obtenus. Lors de la validation en période d'occupation on a pu constater que les hypothèses de simulation prises sur le comportement de l'habitant sont déterminantes sur les évolutions de température et d'humidité relative à l'intérieur des deux logements. Les hypothèses adoptées durant cette période étaient simplificatrices, mais réalistes car basées sur une enquête globale, du comportement de l'occupant, cela a conduit à des résultats avec des écarts plus importants qu'en période d'inoccupation. Une évaluation plus précise du comportement de l'occupant pourrait ainsi faire l'objet de recherches futures. Par ailleurs, l'occupant devient l'acteur central du comportement du logement qu'il occupe mais également des conditions de confort (e.g. mise en place d'actions type ouverture de fenêtre,...). Il est important de mieux appréhender son comportement en modélisation mais aussi de donner des alternatives pour l'éduquer et adapter son comportement à des logements pensés différemment. (iii) Durant le processus de calage du modèle, bien que celui-ci ne soit pas directement transposable à d'autres projets, on a pu identifier des paramètres sensibles qui déterminent le comportement des logements anciens rénovés et peuvent servir de base pour le calage d'autres modèles. Dans notre étude, l'ajustement de ces paramètres a été effectué manuellement en respectant la gamme de variation de ces paramètres. Dans des projets futurs, il serait nécessaire d'intégrer une méthode systématique pour ce processus de calage du modèle sur des résultats de mesure in situ. Par exemple, les propriétés de matériaux anciens ont été adoptées de la littérature ou de la base de données du logiciel WUFI. Cette démarche est à l'origine des multiples incertitudes. Il serait nécessaire, par la suite, de proposer un moyen pour estimer cette incertitude (e.g. l'effet du vieillissement sur les propriétés hygrothermiques de matériaux existants serait à prendre en compte sur des études à très long terme).

A l'échelle de la paroi, de par le nombre important de simulations réalisées, une méthode d'étude globale (Analyse en Composantes Principales, ACP) a été mise en place de manière originale afin d'étudier les comportements dynamiques. Pour notre étude, l'influence de

la nature de l'isolant a été prépondérante (en dépit de l'effet des joints) sur les variables flux de chaleur, flux de masse et teneur en humidité. Cependant un effet de la variable d'humidité relative à l'interface pierre/joint a été identifié : les joints ont la capacité de diffuser plus rapidement la vapeur d'eau par rapport à la pierre. L'étude du comportement de parois rénovées, avec la méthode ACP développée, sur des périodes plus longues pourrait être envisagée dans une étude future. Pour cette partie à l'échelle de la paroi, une étude spécifique a été réalisée avec l'utilisation du béton de chanvre (formulation HLC1). Celui-ci se présente, au regard des résultats obtenus, comme une alternative tout à fait intéressante pour l'isolation des logements anciens (en pierre calcaire), lorsque des contraintes empêchent la mise en place d'une isolation thermique par l'extérieur. De plus, il s'avère être une solution intéressante pour isoler tout en préservant une capacité de régulation de l'humidité au sein du logement. Il faut cependant noter que des précautions doivent être prises dans le cas d'une isolation thermique en béton de chanvre par l'extérieur, particulièrement dans les zones où l'humidité représente un danger pour la préservation du bâti. Ainsi, son coût supérieur au moment de l'installation, doit être mis en perspective des gains potentiels en confort et en énergie.

Concernant la comparaison de la position de l'isolant, on constate, en vague de chaleur, une évolution toujours croissante de l'humidité relative et de la teneur d'humidité dans l'ensemble des configurations (ITI et ITE), à l'exception de la paroi ITE en polystyrène où l'évolution des paramètres reste quasi constante au cours de l'année. Concernant le comportement des parois du point de vue thermique, on a constaté que, sous l'effet de la pierre calcaire, la paroi avec ITE présente des températures inférieures à celles observées en ITI. La solution en ITE –quand cela est possible– présente, donc, un avantage certain pour le confort d'été, en plus de son intérêt pour le traitement des ponts thermiques et la préservation des espaces intérieurs. Enfin, les résultats ont mis en évidence l'importance d'intégrer l'aspect dynamique dans les études des phénomènes de transferts de chaleur et de masse. Par exemple, la prise en compte de l'alternance jour/nuit permet d'évaluer l'inertie thermique et une étude multi-annuelle permet d'étudier les phénomènes d'accumulation d'humidité dans la matière.

Ainsi, dans une ville historique comme Paris avec des façades extérieures protégées, il devient primordial d'avoir une interrogation sur les priorités entre les aspects urbanistiques (préservation du patrimoine), énergétiques et environnementales (e.g. limitations des climatiseurs autonomes et des rejets thermiques de leur condenseur), économiques (e.g. le surcout d'un matériau de type béton de chanvre) et confort des habitants (notamment avec la prise en compte de l'augmentation de la température urbaine). En effet, un compromis est à trouver entre ces différents indicateurs car il s'avère impossible de les satisfaire tous ensemble.

Fichier météo EnergyPlus

Le fichier météo utilisé dans le logiciel EnergyPlus (.epw), peut être reconstitué à partir des données enregistrées dans une station météo.

LOCATION.Paris-Montsouris--FRA.MN6.71560.48.817.2.333.1.75
 DESIGN CONDITIONS.1.Climate Design Data 2009 ASHRAE Handbook..Heating.1-2.5-1.3-8.6.1.8.0.6...
 TYPICAL/EXTREME PERIODS.6.Summer - Week Nearest Max Temperature For Period.Extreme.8/17.8/23.Summer -...
 GROUND TEMPERATURES.1.1.0...9.6.8.0.7.4.8.0.9.6.11.9.14.2.15.8.16.4.15.8.14.2.11.9
 COMMENTS 1. METEONORM Version 6.0
 COMMENTS 2.
 DATA PERIODS.1.1.Data.Sunday.1/ 1.12/31

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)	(33)	(34)	(35)	
2014	1	1	7	60	*?*	7.55	4.79	32.86	100588	0	0	311	70.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9999	269.5	1.93	10	9	777.7	77777	9	90999	99999	13	0.000	0	88	0.100	0.0	1.0
Date (1,2,3,4,5): Année, mois, jour, heure, minute				Humidité relative [%](9) Température de rosée [°C](8) Température sèche [°C](7)				Rayonnement global horizontal [Wh/m2](14)				Direction [deg] et vitesse[m/s] du vent (21,22)				Précipitations(28)																			
2014	1	1	13	60	*?*	9.22	5.79	79.33	100571	429	1413	317	30.00	16.75	25.03	33.33	16.03	28.53	9999	268.9	2.62	9	8	777.7	77777	9	92999	99999	15	0.000	0	88	0.100	0.0	1.0

FIGURE A.1 – Fichier météo EnergyPlus (.epw) - données mesurées dans la station météo

Les données mesurées dans la station météo sont données dans la figure A.1. Ces données sont remplacées dans le fichier météo .epw du logiciel du site, dans ce cas le fichier de Paris. Comme constaté dans la figure, seul le rayonnement global horizontal est donné ; les rayonnements direct et diffus (colonnes 15 et 16 de la figure A.1) doivent être calculés. À partir du rayonnement global horizontal et en prenant la répartition du rayonnement direct et diffus du fichier utilisé par le logiciel pour les simulations sur Paris les rayonnements direct et diffus sont recalculés. Afin de vérifier les pourcentages de chaque type de rayonnement, ils sont comparés aux conditions de couverture journalière observées.

Les données non renseignées correspondent à :

- 6 Data source
- 10 Pression atmosphérique [Pa]
- 11,12,13 Radiation extraterrestre horizontale [Wh/m²], radiation directe [Wh/m²], radiation IR horizontale du ciel [Wh/m²]
- 17,18,19,20 Luminance globale horizontale [lux], luminance en direct normal, luminance horizontale diffuse [lux], luminance au zénith [Cd/m²]
- 24 Visibilité
- 29, 30 Épaisseur optique (Aerosol Optical Depth) [.001]
- 30, 31,32, 33, 34 Données supplémentaires sur la neige, l'albédo, hauteur de la précipitation et temps de pluie

Humidité relative en vague de chaleur

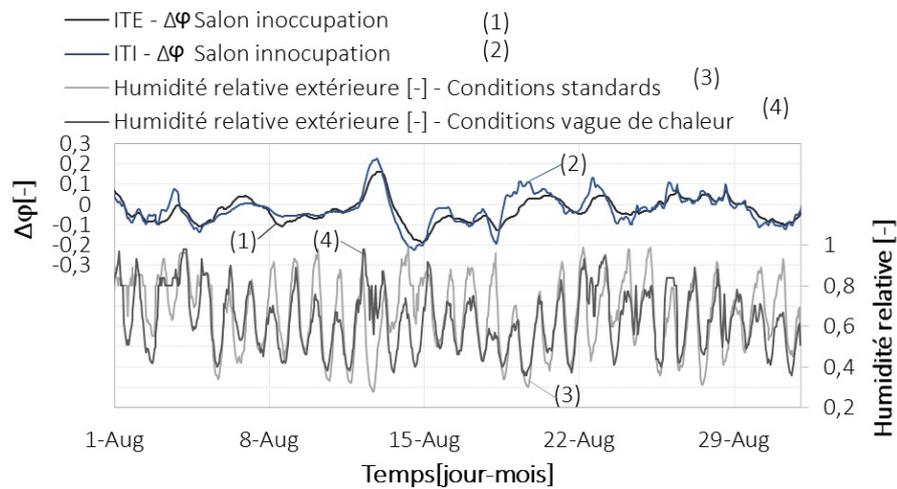


FIGURE B.1 – Période d’inoccupation : différence d’humidité relative entre les conditions standard et vague de chaleur ($\Delta\varphi_{int}$) : pour une zone exposée. Humidité relative extérieure (φ_{ext}) avec et sans l’effet de la vague de chaleur

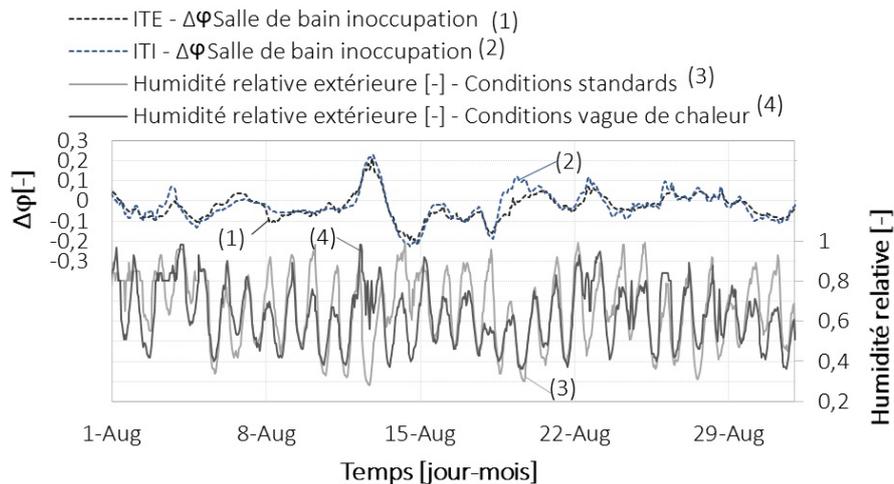


FIGURE B.2 – Période d’inoccupation : différence d’humidité relative entre les conditions standard et vague de chaleur ($\Delta\varphi_{int}$) : pour une zone non-exposée. Humidité relative extérieure (φ_{ext}) avec et sans l’effet de la vague de chaleur

Comparaison des données enregistrées : choix du pas de temps

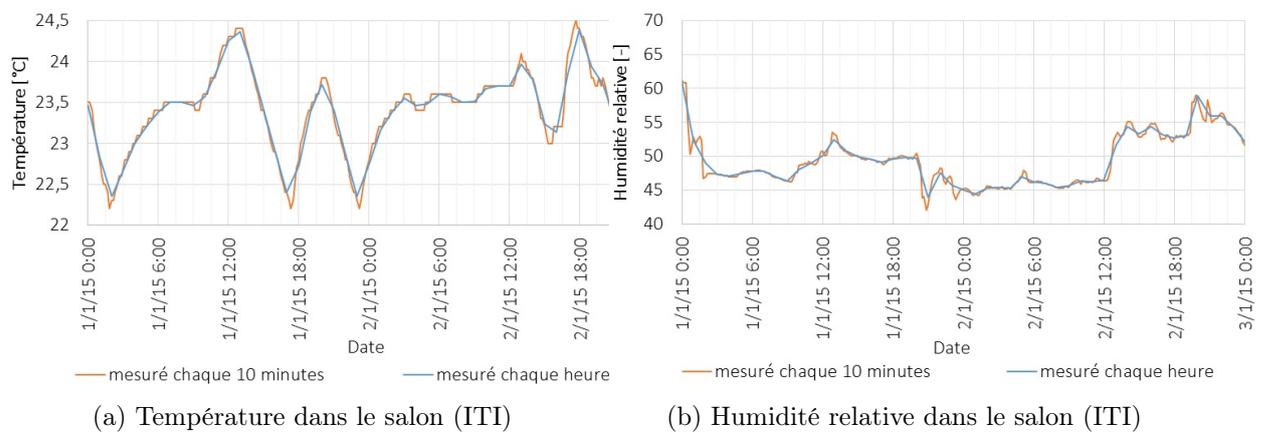


FIGURE C.1 – Données enregistrées à des pas de temps de 10 minutes et de l'heure. Période d'hiver : du 01 janvier 2015 au 03 janvier 2015

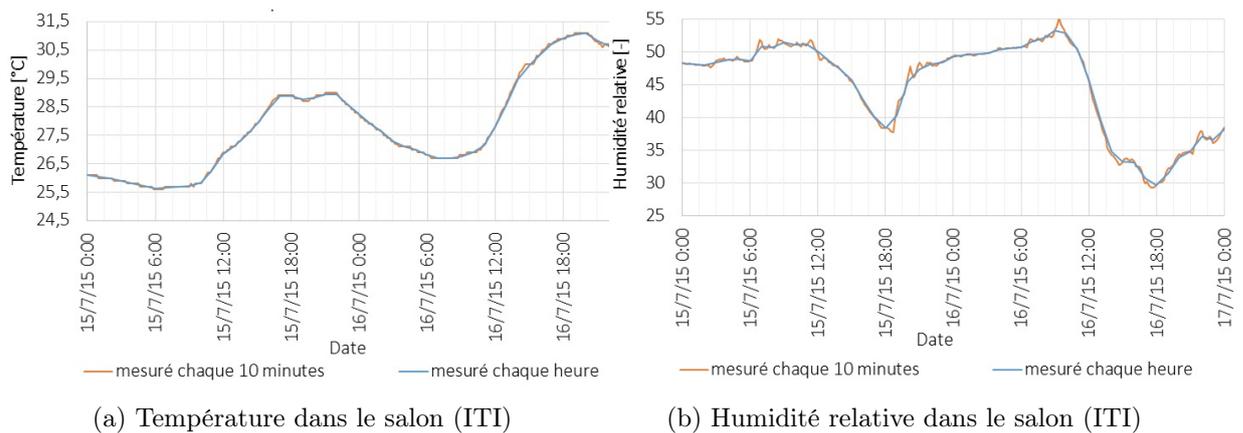


FIGURE C.2 – Données enregistrées à des pas de temps de 10 minutes et de l'heure. Période d'été : du 15 juillet 2015 au 15 juillet 2015

Équations et coefficients Benchmark

N°5

Paramètres des matériaux

Tableau D.1 – Propriétés hygrothermiques des matériaux benchmark HAMSTAD N°5 (figure 6.4). Matériau *sec, **humide et ***saturé

Coefficient	Unité	Brique	Mortier	Isolant
Thermal conduction				
λ_{dry*}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,682	0,6	0,006
λ_{mst**}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0	0,56	0,56
Rétention d'eau				
w_{sat***}	$kg \cdot m^{-3}$	373,5	700	871
k_1	–	0,46	0,20	0,41
k_2	–	0,54	0,80	0,59
a_1	m^{-1}	0,47	0,50	0,006
a_2	m^{-1}	0,20	0,004	0,012
n_1	–	1,5	1,5	2,5
n_2	–	3,8	3,8	2,4
Diffusion de la vapeur				
μ_{dry}	–	7,5	50	5,6
p	–	0,20	0,20	0,20
Conduction de l'eau liquide				
x_0	–	-36,484	-40,425	-46,245
x_1	–	461,325	83,319	294,506
x_2	–	-5240	-175,961	-1439
x_3	–	29070	123,863	3249
x_4	–	-74100	0	-3370
x_5	–	69970	0	1305

Paramètres généraux

Tableau D.2 – Paramètres généraux benchmark HAMSTAD N°5 (figure 6.1)

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Température de référence	T_{ref}	K	293,15
Densité de l'eau liquide	ρ_w	$kg \cdot m^{-3}$	1000
Constante générale du gaz	R	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	8,314
Masse molaire de l'eau	M_w	$kg \cdot mol^{-1}$	0,018
Constante spécifique de la vapeur	R_v	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	R/M_w
Accélération de l'apesanteur	g	$m \cdot s^{-2}$	9,81

Conductivité thermique

$$\lambda = \left(\lambda_{dry} + \lambda_{mst} \cdot \frac{w}{\rho_w} \right) \quad (D.1)$$

Teneur en humidité

$$w = w_{sat} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{\left(1 - \left(\frac{a_i \cdot R \cdot T \cdot \ln(\varphi)}{M_w \cdot g} \right)^{n_i} \right)^{1 - \frac{1}{n_i}}} \quad (D.2)$$

Diffusion de la vapeur

$$\delta_p = \frac{M_w}{R \cdot T} \cdot D_{vapeur} \quad (D.3)$$

$$D_{vapeur} = \left(\frac{26,1 \cdot 10^{-6}}{\mu_{dry}} \right) \cdot \frac{1 - \frac{w}{w_{sat}}}{(1-p) \cdot \left(1 - \frac{w}{w_{sat}} \right)^2 + p} \quad (D.4)$$

Conduction de l'eau liquide

$$K_w = exp \left(\sum_{i=0}^5 x_i \cdot \left(\frac{w}{\rho_w} \right)^i \right) \quad (D.5)$$

Conditions aux limites “cas 2014”

E.1 Conditions aux limites à la surface intérieure

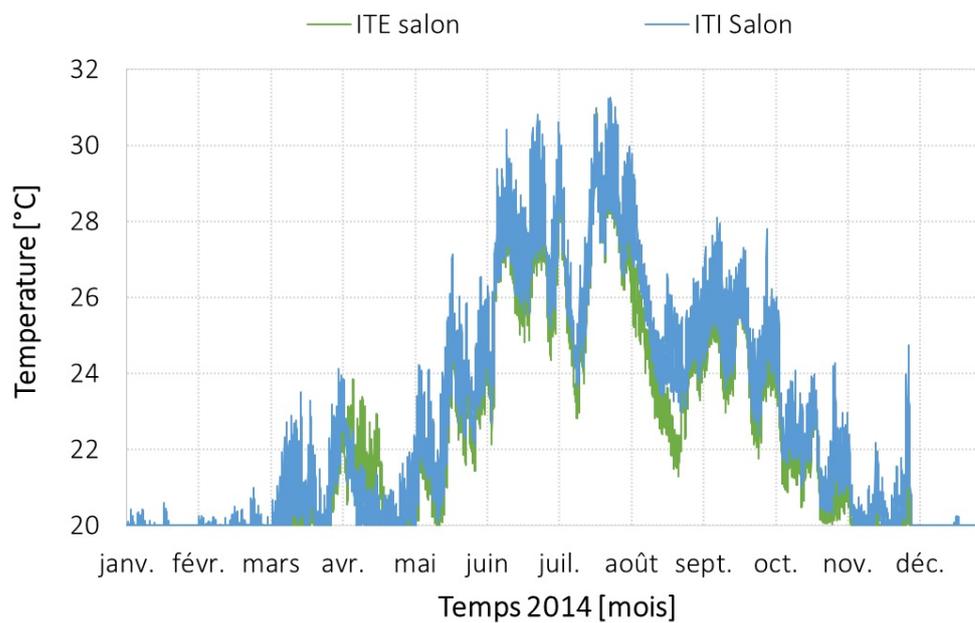


FIGURE E.1 – Température (T) simulée dans le salon des logements en ITI et en ITE dans des conditions obtenues par les simulations durant l’année 2014

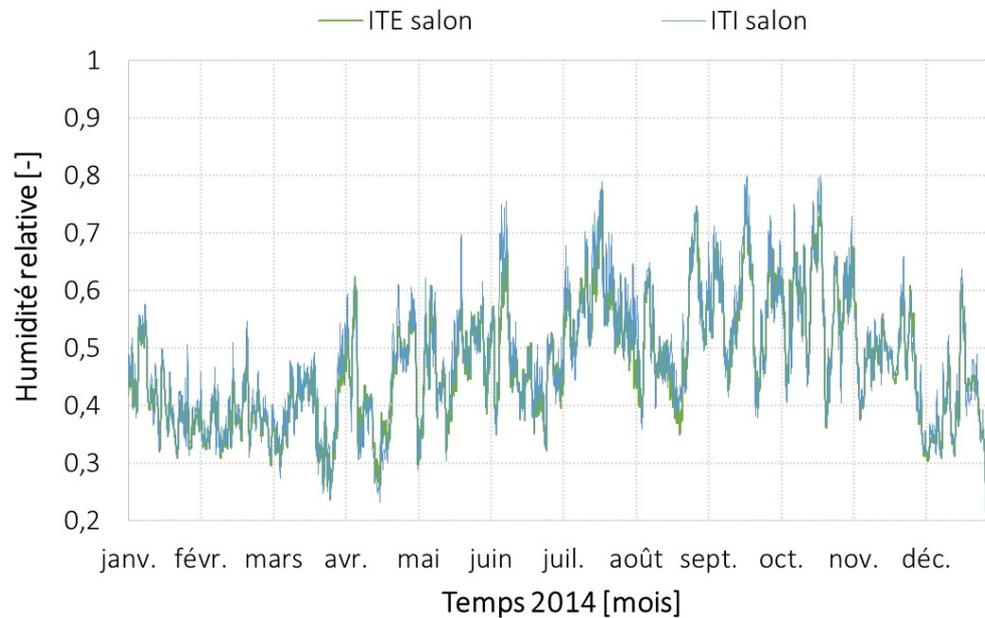


FIGURE E.2 – Humidité relative (φ) simulée dans le salon des logements en ITI (courbe bleu) et en ITE (courbe verte) dans des conditions obtenues par les simulations durant l'année 2014

E.2 Conditions aux limites à la surface extérieure

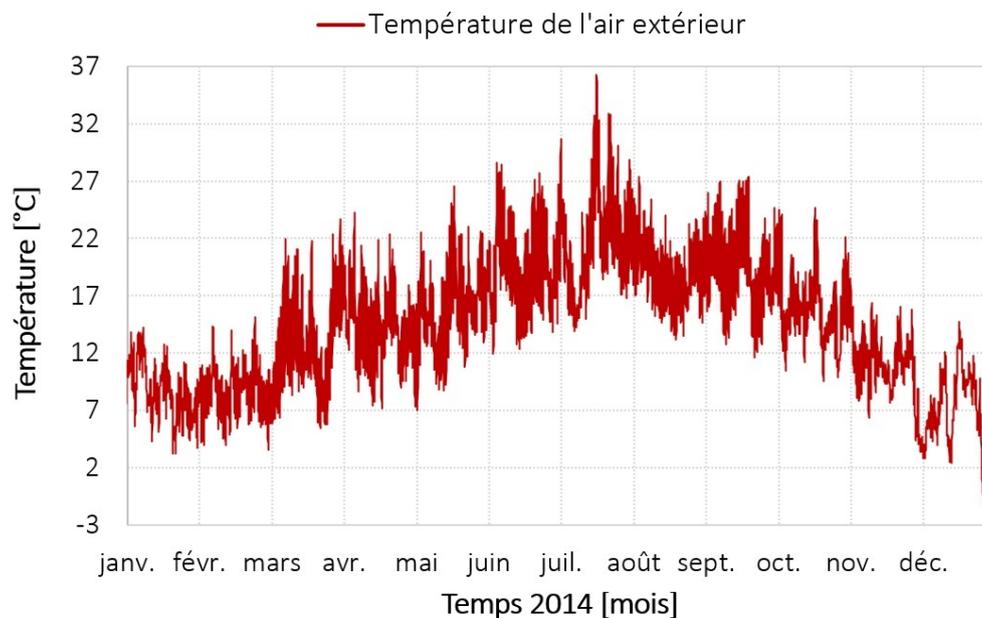


FIGURE E.3 – Température extérieure enregistrée par la station météo durant l'année 2014

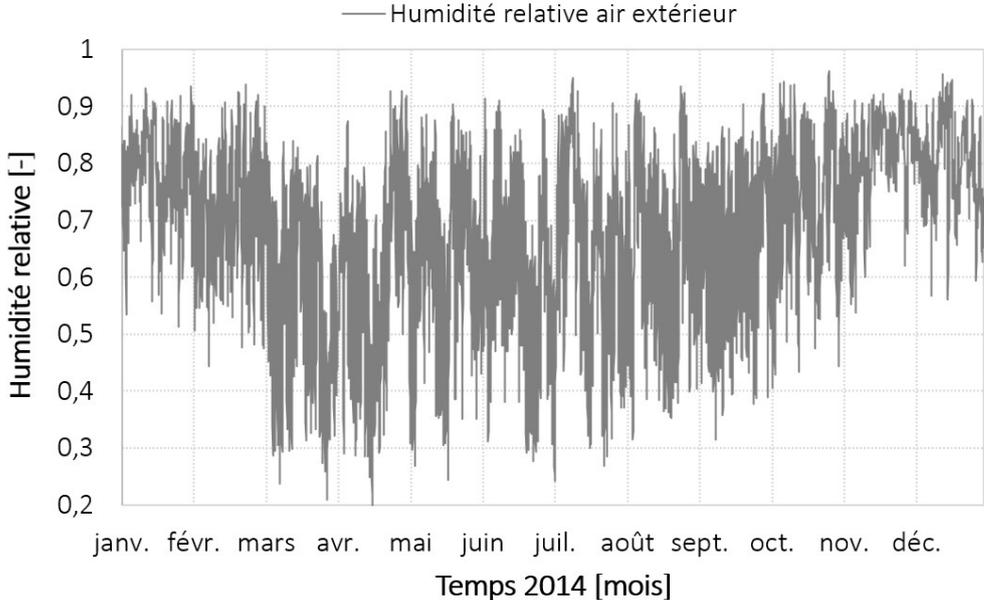


FIGURE E.4 – Humidité relative extérieure enregistrée par la station météo durant l’année 2014

Conditions aux limites “vague de chaleur”

F.1 Conditions aux limites à la surface intérieure

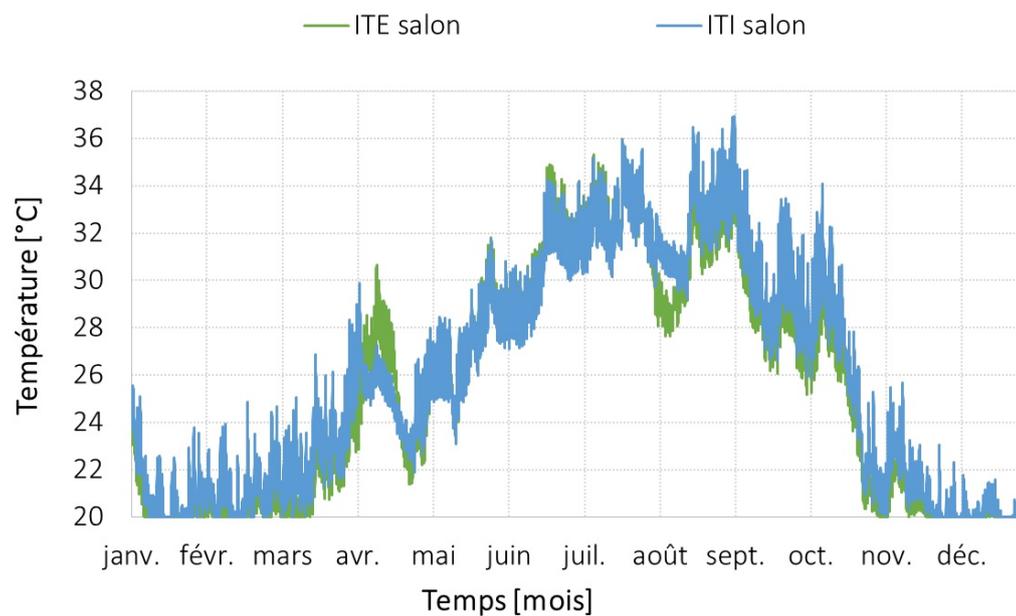


FIGURE F.1 – Température (T) simulée dans le salon des logements en ITI et en ITE dans des conditions de “vague de chaleur”

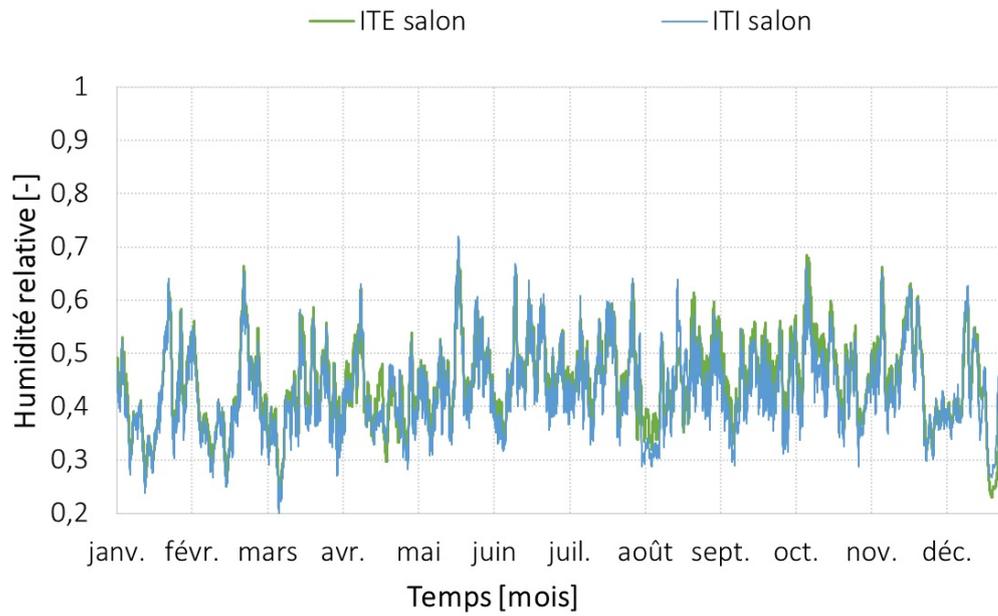


FIGURE F.2 – Humidité relative (φ) simulée dans le salon des logements en ITI (courbe bleu) et en ITE (courbe verte) dans des conditions de “vague de chaleur”

F.2 Conditions aux limites à la surface extérieure

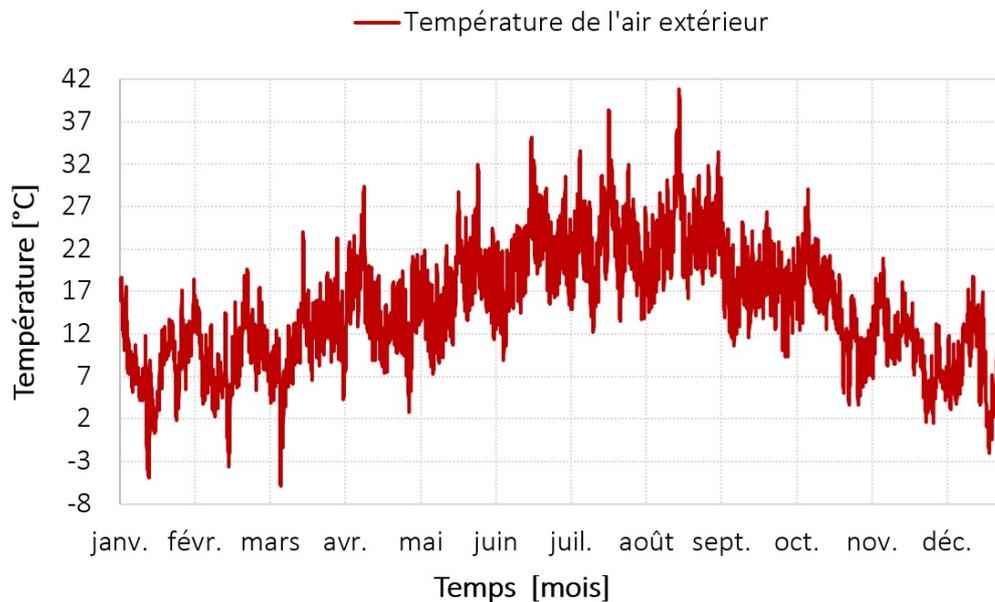


FIGURE F.3 – Température extérieure Meteonorm des conditions de “vague de chaleur”

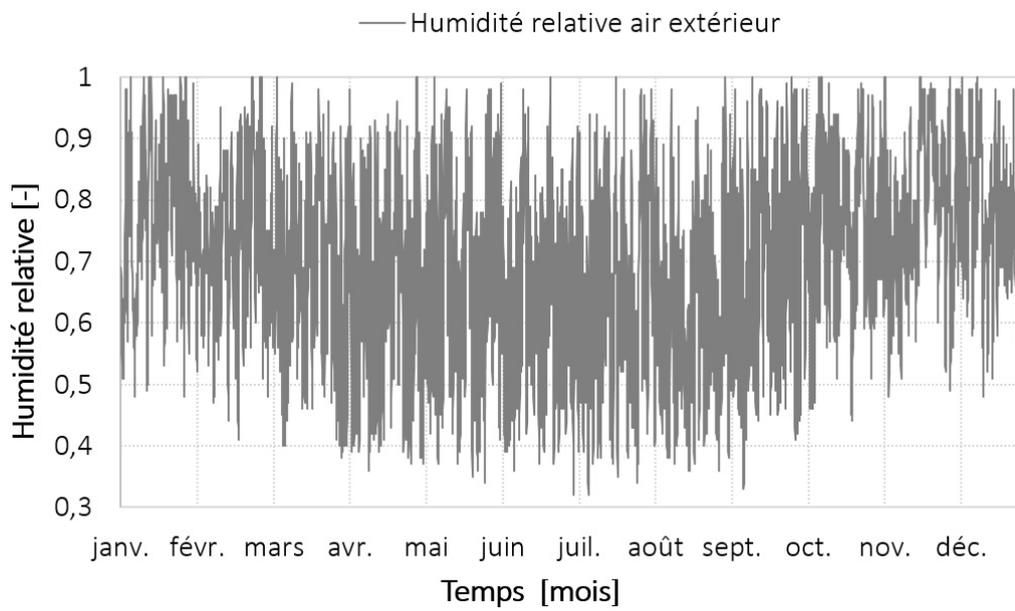


FIGURE F.4 – Humidité relative extérieure Meteonorm conditions de "vague de chaleur"

Pression de vapeur “Cas 2014”

G.1 Différence de pression de vapeur Intérieur et extérieur

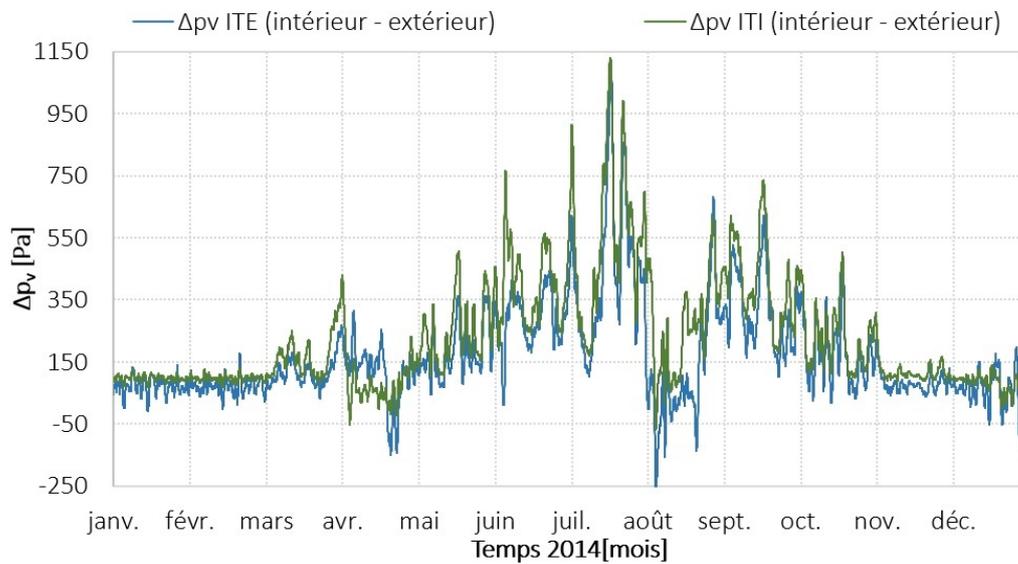


FIGURE G.1 – Différence de pression de vapeur Intérieur et extérieur

G.2 Pression de vapeur Interface pierre-isolant paroi ITI et ITE

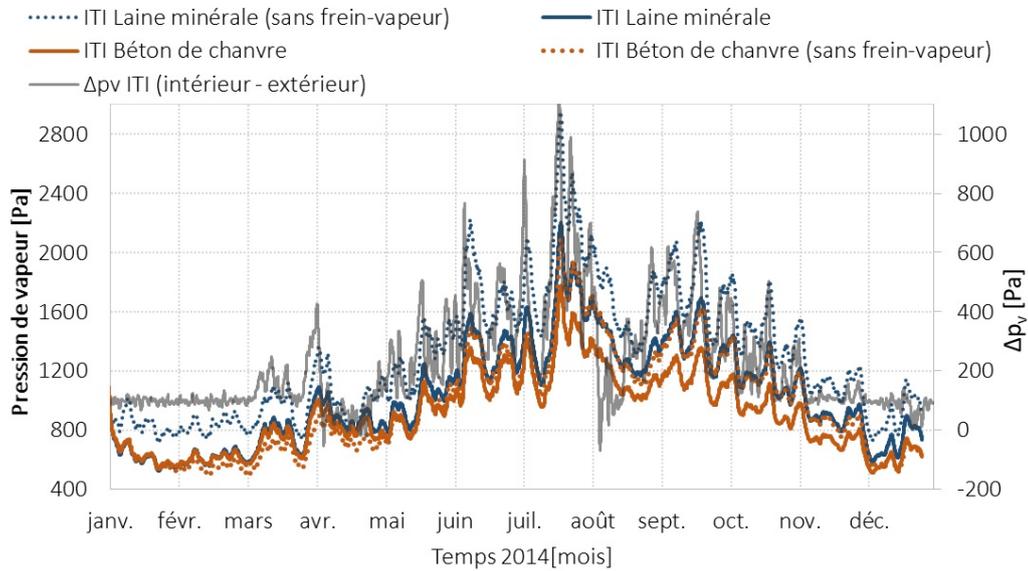


FIGURE G.2 – Pression de vapeur Interface pierre-isolant paroi ITI

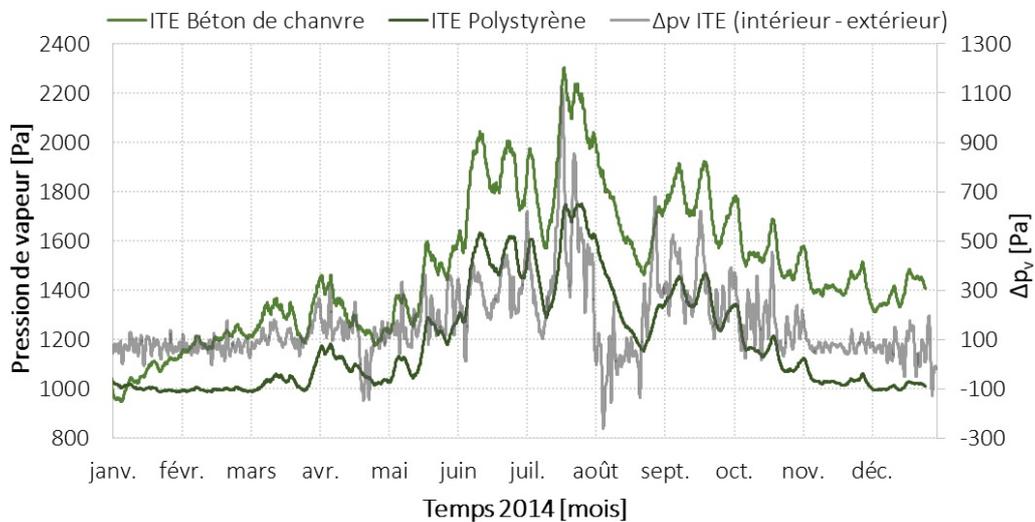


FIGURE G.3 – Pression de vapeur Interface pierre-isolant paroi ITE

Bibliographie

- [Abelé *et al.* 2009] C. Abelé, B. Abraham, J.-L. Salagnac, J. Fontan, D. Quenard, S. Guiliot et C. Pompéo. *Transfert d'humidité à travers les parois - Évaluer les risques de condensation*. Rapport technique, Centre scientifique et technique du bâtiment CSTB, September 2009. (Cité en pages vii, 11, 27, 38, 39, 55 et 71.)
- [Acre & Wyckmans 2015] F. Acre et A. Wyckmans. *Dwelling renovation and spatial quality : The impact of the dwelling renovation on spatial quality determinants*. International Journal of Sustainable Built Environment, vol. 4, no. 1, pages 12–41, 2015. (Cité en page 11.)
- [ADEME 2014] ADEME. *Chiffres clés climat air énergie 2014*. Rapport technique, ADEME, 2014. (Cité en page 1.)
- [Aelenei & Henriques 2008] D. Aelenei et F. M. A. Henriques. *Analysis of the condensation risk on exterior surface of building envelopes*. Energy and Buildings, vol. 40, pages 1866–1871, 2008. (Cité en page 15.)
- [ASH 2004] *Thermal environmental conditions for human occupancy, American society of heating, refrigeration and air-conditioning engineers*. Rapport technique, ANSI/ASHRAE, 2004. (Cité en pages 102, 103 et 104.)
- [Aste *et al.* 2009] N. Aste, A. Angelotti et M. Buzzetti. *The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings*. Energy and Buildings, vol. 41, no. 11, pages 1181–1187, 2009. (Cité en page 8.)
- [Berger *et al.* 2012] J. Berger, S. Tasca-Guernouti, M. Woloszyn et C. Buhe. *L'humidité dans les bâtiments : Pathologies et paramètres gouvernants*. In Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, numéro 6, page 55. Editions ESKA, 2012. (Cité en page 15.)
- [Bigorgne *et al.* 2011] J. Bigorgne, F. L'Hénaff, H. Terminassian et J. Rezé. *Analyse de la performance thermique des logements parisiens*. Rapport technique, Atelier Parisien d'urbanisme APUR, 2011. (Cité en pages 1, 7, 15 et 127.)
- [Brown *et al.* 2013] N. W. Brown, T. Malmqvist, W. Bai et M. Molinari. *Sustainability assessment of renovation packages for increased energy efficiency for multi-family buildings in Sweden*. Building and Environment, vol. 61, pages 140–148, 2013. (Cité en pages 12, 13, 14 et 16.)
- [Brun *et al.* 2009] A. Brun, C. Spitz, E. Wurtz et L. Mora. *Behavioural comparison of some predictive tools used in a low-energy building*. In Eleventh International IBPSA Conference, pages 27–30, 2009. (Cité en pages vii, 31 et 32.)
- [Brunetière *et al.* 2013] J.-R. Brunetière, S. Alexandre, M. d'Aubreby, G. Debiesse, A.-J. Guérin, B. Perret et D. Schwarz. *Le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050*. Rapport technique, Conseil général de l'Environnement et du Développement durable, Février 2013. (Cité en page 16.)

- [Camiz 2005] S. Camiz. *The Guttman effect : Its interpretation and a new redressing method*. Data Analysis Bulletin, vol. 5, pages 7–34, 2005. (Cité en page 142.)
- [Candas 2000] V. Candas. *Confort thermique*. In Confort thermique, numéro BE9085. Techniques de l'ingénieur, oct 2000. (Cité en page 102.)
- [Cantin & Guarracino 2012] R. Cantin et G. Guarracino. *Performance Énergétique des bâtiments existants-Etude de cas*. In Environnement et construction, numéro C8101. Techniques de l'ingénieur, feb 2012. (Cité en pages 7, 13, 14, 36 et 130.)
- [Cantin et al. 2010] R. Cantin, J. Burgholzer, G. Guarracino, B. Moujalled, S. Tamelikecht et B. Royet. *Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France*. Building and Environment, vol. 45, no. 2, pages 473–484, 2010. (Cité en pages 14 et 15.)
- [Cerezon 2005] V. Cerezon. *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*. PhD thesis, INSA Lyon, 2005. (Cité en page 131.)
- [Chantrelle et al. 2011] F. P. Chantrelle, H. Lahmidi, W. Keilholz, M. El Mankibi et P. Michel. *Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings*. Applied Energy, vol. 88, no. 4, pages 1386–1394, 2011. (Cité en pages 11 et 12.)
- [Chenu et al. 2005] E. Chenu, S. Plawinski et O. Sidler. *Etude sur la basse énergie appliquée aux bâtiments anciens*. Rapport technique, Energivie, 2005. (Cité en pages 14 et 15.)
- [Chesné 2012] L. Chesné. *Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques*. PhD thesis, Lyon, INSA, 2012. (Cité en pages 44, 46 et 142.)
- [Chow et al. 2013] D. H. C. Chow, Z. Li et J. Darkwa. *The effectiveness of retrofitting existing public buildings in face of future climate change in the hot summer cold winter region of China*. Energy and Building, vol. 57, pages 176–186, 2013. (Cité en pages 12 et 17.)
- [Ciobanu et al. 2014] D. Ciobanu, E. Eftimie et C. Jaliu. *The Influence of Measured/simulated Weather Data on Evaluating the Energy Need in Buildings*. Energy Procedia, vol. 48, pages 796–805, 2014. (Cité en page 62.)
- [Cipriano et al. 2015] J. Cipriano, G. Mor, D. Chemisana, D. Pérez, G. Gamboa et X. Cipriano. *Evaluation of a multi-stage guided search approach for the calibration of building energy simulation models*. Energy and Buildings, vol. 87, pages 370–385, 2015. (Cité en pages 32, 33 et 47.)
- [Crawley et al. 2001] B. D. Crawley, K. L. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, R. K. Strand, R. J. Liesen, D. E. Fisher, M. J. Witte et J. Glazer. *EnergyPlus : creating a new-generation building energy simulation program*. Energy and buildings, vol. 33, pages 319–331, 2001. (Cité en pages 26, 27 et 28.)
- [Crawley et al. 2008] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert et B. T. Griffith. *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Building and environment, vol. 43, no. 4, pages 661–673, 2008. (Cité en page 19.)

- [Dascalaki & Santamouris 2002] E. Dascalaki et M. Santamouris. *On the potential of retrofitting scenarios for offices*. *Building and Environment*, vol. 37, no. 6, pages 557–567, 2002. (Cité en page 16.)
- [Delgado 2014] J. M. Delgado. *Drying and wetting of building materials and components*, volume 4. Springer, 2014. (Cité en page 111.)
- [Denfer 1891] J. Denfer. *Architecture et constructions civiles*. Librairie polytechnique, 1891. (Cité en page 129.)
- [Dudley 2010] J. H. Dudley. *Comparison of demand response performance with an energyplus model in a low energy campus building*. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010. (Cité en page 34.)
- [Dugué *et al.* 2010] A. Dugué, F. Betbeder, J. Lopez et P. Lagièrre. *Evaluation des risques liés à l'humidité dans le cas d'une isolation thermique par l'intérieur de murs anciens : étude de cas*. IBPSA France 2010, 2010. (Cité en page 131.)
- [EnergyPlus 2013] EnergyPlus. *Getting Started with EnergyPlus Basic Concepts Manual Essential Information you need about Running EnergyPlus*. Rapport technique, 2013. (Cité en pages vii, 26, 27, 28, 29, 30, 63 et 77.)
- [Faisandier 2014] A. Faisandier. *Notion de système et d'ingénierie de systèmes*. Sinergy'Com, 2014. (Cité en page 19.)
- [Ferrante & Semprini 2011] A. Ferrante et G. Semprini. *Building energy retrofitting in urban areas*. *Procedia Engineering*, vol. 21, pages 968–975, 2011. (Cité en page 16.)
- [Ferrari 2007] S. Ferrari. *Building envelope and heat capacity : re-discovering the thermal mass for winter energy saving*. In 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advance Ventilation Technologies in the 21st Century, Greece, pages 346–351, 2007. (Cité en page 8.)
- [Fraunhofer IBP 2014] Fraunhofer IBP. *WUFI Wärme Und Feuchte Instationär (heat and moisture transiency)*, 2014. (Cité en pages xi, 55 et 135.)
- [Galvin 2012] R. Galvin. *German Federal policy on thermal renovation of existing homes : a policy evaluation*. *Sustainable Cities and Society*, vol. 4, pages 58–66, 2012. (Cité en page 12.)
- [Givoni 1976] B. Givoni. *Man, climate and architecture*. Elsevier Science Ltd, 1976. (Cité en page 103.)
- [Givoni 1992] B. Givoni. *Comfort, climate analysis and building design guidelines*. *Energy and buildings*, vol. 18, no. 1, pages 11–23, 1992. (Cité en page 103.)
- [Gnip *et al.* 2006] I. Gnip, S. Vėjelis et V. Keršulis. *Isotherms of sorption and desorption of water vapour by thermal insulating mineral wool products*, 2006. (Cité en page 38.)
- [Guimarães *et al.* 2012] A. S. Guimarães, V. P. de Freitas et J. M. Delgado. *Treatment of Rising Damp in Historical Buildings*. In *Heat and Mass Transfer in Porous Media*, pages 1–23. Springer, 2012. (Cité en pages vii et 38.)

- [Hagentoft 2002] C.-E. H. Hagentoft. *Final report : Methodology of HAM-modeling, HAMSTAD-project*. Rapport technique, Chalmers University of technology, December 2002. (Cité en pages x, xi, 119, 120, 121, 123 et 125.)
- [Harmer & Henze 2015] L. C. Harmer et G. P. Henze. *Using calibrated energy models for building commissioning and load prediction*. Energy and Buildings, vol. 92, pages 204–215, 2015. (Cité en page 34.)
- [H berl  et al. 2014]  . H berl , J. Borderon, J. Burholzer et R. Cantin. *Influence d’un défaut d’étanchéité   l’air sur la teneur en eau de quatre types de murs traditionnels rénovés*. In Conference IBPSA France-Arras, 2014. (Cité en page 15.)
- [Hémon et al. 2003] D. Hémon, E. Jougla, J. Clavel, F. Laurent, S. Bellec et G. Pavillon. *Surmortalité liée   la canicule d’août 2003 en France*. Bulletin épidémiologique hebdomadaire, pages 45–46, 2003. (Cité en pages 2 et 17.)
- [Hendel et al. 2015a] M. Hendel, M. Colombert, Y. Diab et L. Royon. *An analysis of pavement heat flux to optimize the water efficiency of a pavement-watering method*. Applied thermal engineering, vol. 78, pages 658–669, 2015. (Cité en pages xv, 60 et 61.)
- [Hendel et al. 2015b] M. Hendel, P. Gutierrez, M. Colombert, Y. Diab et L. Royon. *Measuring the effects of urban heat island mitigation techniques in the field : an application to the case of pavement-watering in Paris*, 2015. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01113917v3/document>. (Cité en page 60.)
- [Heo et al. 2012] Y. Heo, R. Choudhary et G. Augenbroe. *Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty*. Energy and Buildings, vol. 47, pages 550–560, 2012. (Cité en page 33.)
- [Jannot 2008] Y. Jannot. *Isothermes de sorption : Modèles et détermination*, 2008. <http://www.thermique55.com/principal/sorption.pdf>. (Cité en page 39.)
- [Janssens et al. 2008] A. Janssens, M. Woloszyn, C. Rode, A. Sasic-Kalagasidis et M. De Paepe. *From EMPD to CFD – overview of different approaches for Heat Air and Moisture modeling in IEA Annex 41*. In IEA ECBCS Annex 41, 2008. (Cité en pages xv, 20, 21 et 22.)
- [Jiři kov  et al. 2006] M. Jiři kov , Z. Pavl k, L. Fiala et R.  ern . *Thermal conductivity of mineral wool materials partially saturated by water*. International journal of thermophysics, vol. 27, no. 4, pages 1214–1227, 2006. (Cité en page 131.)
- [Juan et al. 2010] Y.-K. Juan, P. Gao et J. Wang. *A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement*. Energy and buildings, vol. 42, no. 3, pages 290–297, 2010. (Cité en page 12.)
- [Judkoff & Neymark 1995] R. Judkoff et J. Neymark. *International Energy Agency building energy simulation test (BESTEST) and diagnostic method*. Rapport technique, National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US), 1995. (Cité en page 31.)
- [Judkoff et al. 2010a] R. Judkoff, B. Polly, M. Bianchi et J. Neymark. *Building energy simulation test for existing homes (BESTEST-EX) : Instructions for implementing the test procedure, calibration test reference results, and example acceptance-range criteria*. National Renewable Energy Laboratory, 2010. (Cité en pages vii, 32 et 33.)

- [Judkoff *et al.* 2010b] R. Judkoff, B. Polly, M. Bianchi et J. Neymark. Example procedures for developing acceptance-range criteria for BESTEST-EX. National Renewable Energy Laboratory, 2010. (Cité en pages 32 et 47.)
- [KEILHOLZ & SETTE 2005] W. KEILHOLZ et P. SETTE. *Les  volutions de TRNSYS–La version 16*. Journée Th matique SFT–IBPSA, La Rochelle, 2005. (Cité en page 25.)
- [Kiefl 1983] K. Kiefl. *Kapillarer und dampff rmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen*. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Essen, jan 1983. (Cité en page 35.)
- [Künzel *et al.* 2005] H. Künzel, A. Holm, D. Zirkebach et A. Karagiozis. *Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope*. Solar Energy, vol. 78, pages 554–561, 2005. (Cité en pages vii, 9, 10 et 22.)
- [Künzel 1995] H. Künzel. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*. Dissertation, Fraunhofer Institute of Building Physics, Janvier 1995. (Cité en pages xv, xvi, 10, 11, 35, 36, 37, 39, 41, 113, 114, 115, 116, 122, 132 et 137.)
- [Kolaitis *et al.* 2013] D. I. Kolaitis, E. Malliotakis, D. A. Kontogeorgos, I. Mandilaras, D. I. Katsourinis et M. A. Founti. *Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings*. Energy and Buildings, vol. 64, pages 123–131, 2013. (Cité en pages 15 et 158.)
- [Kossecka & Kosny 2002] E. Kossecka et J. Kosny. *Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building*. Energy and Buildings, vol. 34, no. 4, pages 321–331, 2002. (Cité en page 15.)
- [Kumaran 1996] K. Kumaran. *Heat, Air and moisture transfert through New and retrofitted insulated Envelope : Final report Task 3*. Rapport technique, International Energy Agency (IEA) Annex 24 HAMTIE, 1996. (Cité en page 135.)
- [Künzel & Kiefl 1996] H. M. Künzel et K. Kiefl. *Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components*. International Journal of heat and mass transfer, vol. 40, no. 1, pages 159–167, 1996. (Cité en page 35.)
- [Laaidi *et al.* 2012] K. Laaidi, A. Ung, V. Wagner, P. Beaudeau et M. Pascal. *Système d’alerte canicule et santé : principes, fondements et évaluation*. Rapport technique, Institut de veille sanitaire InVS, mars 2012. (Cité en page 17.)
- [Lacroix & Zacc i 2010] V. Lacroix et E. Zacc i. *Quarante ans de politique environnementale en France :  volutions, avancées, constante*. 2010. (Cité en page 12.)
- [Lebart *et al.* 1995] L. Lebart, A. Morineau et M. Piron. *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. Dunod, 1995. (Cité en pages vii, 44, 45 et 46.)
- [Lemonsu *et al.* 2013] A. Lemonsu, R. Koukou-Arnaud, J. Desplat, J.-L. Salagnac et V. Masson. *Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate*. Climatic change, vol. 116, no. 3-4, pages 679–692, 2013. (Cité en pages 16 et 17.)
- [Lienhard 2013] J. H. Lienhard. *A heat transfer textbook*. Courier Corporation, 2013. (Cité en page 42.)

- [Maile *et al.* 2007] T. Maile, M. Fischer et V. Bazjanac. *Building energy performance simulation tools-a life-cycle and interoperable perspective*. Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Working Paper, vol. 107, pages 1–49, 2007. (Cité en page 31.)
- [Manyes *et al.* 2013] A. Manyes, L. Sisó et J. Salom. *Block level study and simulation for residential retrofitting*. In BS2013 Conference, 2013. (Cité en page 15.)
- [Maugard 2013] A. Maugard. *Évaluation des risques de pathologies liées à l'humidité*. Rapport technique, Programme d'accompagnement des professionnels Règles de l'art Grenelle de l'environnement 2012, 2013. (Cité en page 15.)
- [Mchirgui 2012] W. Mchirgui. *Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique : Application aux matériaux cimentaires*. PhD thesis, Université de La Rochelle, 2012. (Cité en page 40.)
- [MEDDE 2013] MEDDE. *Projet HYGROBA : Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes*. Rapport technique, DGALN / CETE Est / Ecole d'architecture de Toulouse / LDMC de Toulouse MPF, 2013. (Cité en pages 7, 36 et 130.)
- [Mendes & Philippi 2005] N. Mendes et P. Philippi. *A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradients*. International journal of heat and mass transfer, vol. 48, pages 37–51, 2005. (Cité en pages 35 et 41.)
- [Mendes *et al.* 2002] N. Mendes, P. Philippi et R. Lambert. *A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and transfer in porous media*. International journal of heat and mass transfer, vol. 45, pages 509–518, 2002. (Cité en pages 35 et 40.)
- [Meteotest 2015a] Meteotest. *Handbook Part I : Software Meteoronorm Global Meteorological Database*. Rapport technique, 2015. (Cité en page 62.)
- [Meteotest 2015b] Meteotest. *Handbook Part II : Theory Meteoronorm Global Meteorological Database*. Rapport technique, 2015. (Cité en page 62.)
- [Molle & Patry 2013] D. Molle et P.-M. Patry. *Rt 2012 et rt existant : Réglementation thermique et efficacité énergétique-construction et rénovation*. Editions Eyrolles, 2013. (Cité en pages vii et 13.)
- [Mora 2003] L. Mora. *Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet*. PhD thesis, Université de la Rochelle, 2003. (Cité en page 23.)
- [Morelli *et al.* 2012] M. Morelli, L. Romby, S. E. Mikkelsen, M. M.G., T. Kildemoes et H. Tommerup. *Energy retrofitting of a typical old Danish multi-family building to a nearly zero energybuilding based on experiences from a test apartment*. Energy and Buildings, vol. 54, pages 395–406, 2012. (Cité en page 16.)
- [Mustafaraj *et al.* 2014] G. Mustafaraj, D. Marini, A. Costa et M. Keane. *Model calibration for building energy efficiency simulation*. Applied Energy, vol. 130, pages 72–85, 2014. (Cité en pages vii et 34.)
- [Noël & Roux 2007] J. Noël et J.-J. Roux. *CoDyBa manuel Utilisateur*. Rapport technique, 2007. (Cité en page 26.)

- [Noël *et al.* 2005] J. Noël, J.-J. Roux et V. Joseph. *Presentation et perspectives du logiciel CoDyBa*. In Journée thématique SFT-IBPSA, 2005. (Cité en page 26.)
- [Orosa & Oliveira 2012] J. A. Orosa et A. C. Oliveira. *A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment*. *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, pages 89–96, 2012. (Cité en page 8.)
- [Ouyang *et al.* 2009] J. Ouyang, J. Ge et K. Hokao. *Economic analyses of energy-saving renovation measures for urban existing residential buildings in China based on thermal simulation and site investigation*. *Energy Policy*, vol. 37, pages 140–149, 2009. (Cité en pages 12, 14 et 16.)
- [Ozel 2014] M. Ozel. *Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness*. *Energy and Buildings*, vol. 72, pages 288–295, 2014. (Cité en page 15.)
- [Pan *et al.* 2007] Y. Pan, Z. Huang et G. Wu. *Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai*. *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 6, pages 651–657, 2007. (Cité en page 32.)
- [Pedersen 1992] C. Pedersen. *Prediction of moisture transfer in building constructions*. *Building and Environment*, vol. 27, pages 387–397, 1992. (Cité en pages 35 et 41.)
- [Pedrini *et al.* 2002] A. Pedrini, F. S. Westphal et R. Lamberts. *A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates*. *Building and Environment*, vol. 37, no. 8, pages 903–912, 2002. (Cité en page 32.)
- [Peña 2002] D. Peña. *Análisis de datos multivariantes*, volume 24. McGraw-Hill Madrid, 2002. (Cité en pages vii, 44 et 45.)
- [Philip & De Vries 1957] J. Philip et D. De Vries. *Moisture movement in porous materials under temperature gradients*. *Transactions American Geophysical Union*, vol. 38, pages 222–232, 1957. (Cité en pages 35, 40 et 41.)
- [Poel *et al.* 2007] B. Poel, G. van Cruchten et C. A. Balaras. *Energy performance assessment of existing dwellings*. *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 4, pages 393–403, 2007. (Cité en page 11.)
- [Rivallain *et al.* 2012] M. Rivallain, O. Baverel et B. Peuportier. *Genetic multi criteria optimization for existing buildings holistic retrofit*. In *International Symposium Life Cycle Assessment and Construction*, 2012. (Cité en pages 12 et 14.)
- [Roulet 2008] C.-A. Roulet. *Conditions de confort et de logement sain*. 2008. (Cité en page 102.)
- [Roux 1984] J.-J. Roux. *Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments*. PhD thesis, INSA Lyon, 1984. (Cité en page 25.)
- [Royapoor & Roskilly 2015] M. Royapoor et T. Roskilly. *Building model calibration using energy and environmental data*. *Energy and Buildings*, vol. 94, pages 109–120, 2015. (Cité en page 34.)

- [Royet *et al.* 2007] B. Royet, J. Burgholzer, G. Guarracino, R. Cantin, M. Fontaine et S. Tammelikecht. *Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie*. Rapport technique, DGUHC, CETE DE L'EST, DGCB-LASH, MPF, 2007. (Cité en pages vii, 8, 14, 19 et 130.)
- [Sahlin & Bring 1991] P. Sahlin et A. Bring. *IDA Solve : A tool for building and energy Systems simulation*. In IBPSA, 1991. (Cité en page 24.)
- [Sahlin 1996] P. Sahlin. *Modelling and simulation methods for modular continuous systems in building*. Dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Mai 1996. (Cité en page 24.)
- [Salomon *et al.* 2005] T. Salomon, R. Mikolasek et B. Peuportier. *Outil de simulation thermique du bâtiment, COMFIE*. La Rochelle, 2005. (Cité en pages 20 et 25.)
- [Samri 2008] D. Samri. *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*. PhD thesis, INSA Lyon, 2008. (Cité en pages xi, 127, 131, 133 et 135.)
- [Santamouris *et al.* 2001] M. Santamouris, N. Papanikolaou, I. Livada, I. Koronakis, C. Georgakis, A. Argiriou et D. Assimakopoulos. *On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings*. *Solar energy*, vol. 70, no. 3, pages 201–216, 2001. (Cité en page 17.)
- [Saporta 2006] G. Saporta. *Probabilités, analyse des données et statistique*. Editions Technip, 2006. (Cité en page 44.)
- [Smargiassi *et al.* 2009] A. Smargiassi, M. S. Goldberg, C. Plante, M. Fournier, Y. Baudouin et T. Kosatsky. *Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands*. *Journal of epidemiology and community health*, vol. 63, no. 8, pages 659–664, 2009. (Cité en page 17.)
- [SPARK 2003] SPARK. *Spark 2.0 Reference manual*. Rapport technique, 2003. (Cité en page 24.)
- [Spitz 2012] C. Spitz. *Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments*. Dissertation, Université de Grenoble, Août 2012. (Cité en pages xv, 19, 20, 24, 25 et 26.)
- [Stazi *et al.* 2013] F. Stazi, A. Vegliò, C. Di Perna et P. Munafò. *Experimental comparison between 3 different traditional wall constructions and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies*. *Energy and Buildings*, vol. 60, pages 429–441, 2013. (Cité en pages 14 et 158.)
- [Stéphane *et al.* 2013] E. Stéphane, A. Caucheteux, R. Cantin, S. Tasca-Guernouti et P. Michel. *Sensitivity analysis of an EnerPlus simulation model of the ambient humidity in an old building*. In BS2013, editeur, IBPSA, pages 2890–2897, 2013. (Cité en pages 12, 13, 14 et 55.)
- [Stéphane *et al.* 2014] E. Stéphane, R. Cantin, A. Caucheteux, S. Tasca-Guernouti et P. Michel. *Experimental assessment of thermal inertia in insulated and non-insulated old limestone buildings*. *Building and Environment*, vol. 80, pages 241–248, 2014. (Cité en pages 8 et 36.)

- [Tadeu *et al.* 2003] A. o. Tadeu, N. Simões et F. Brando. *Steady-state moisture diffusion in curved walls, in the absence of condensate flow, via the BEM : a practical Civil Engineering approach (Glaser method)*. Building and Environment, vol. 38, pages 677–688, 2003. (Cité en page 40.)
- [Tariku *et al.* 2010] F. Tariku, K. Kumaran et P. Fazio. *Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media*. International journal of Heat and Mass Transfer, vol. 53, pages 3035–3044, 2010. (Cité en pages vii, x, 37, 41, 121 et 122.)
- [Tittlein 2012] P. Tittlein. *Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation*. PhD thesis, Université de Savoie, 2012. (Cité en pages xv, 20, 24 et 25.)
- [Trechsel 2001] H. Trechsel. *Moisture Analysis and condensation control in building envelope*. Rapport technique, ASTM International, 2001. (Cité en pages 55 et 134.)
- [Tremeac *et al.* 2012] B. Tremeac, P. Bousquet, C. de Munck, G. Pigeon, V. Masson, C. Marchadier, M. Merchat, P. Poef et F. Meunier. *Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures*. Applied Energy, vol. 95, pages 102–110, 2012. (Cité en page 17.)
- [Trucano *et al.* 2006] T. G. Trucano, L. P. Swiler, T. Igusa, W. L. Oberkampf et M. Pilch. *Calibration, validation, and sensitivity analysis : What's what*. Reliability Engineering & System Safety, vol. 91, no. 10, pages 1331–1357, 2006. (Cité en page 32.)
- [Velazques & Calberg-Ellen 2014] O. Velazques et P. Calberg-Ellen. *Analyse du comportement hygrothermique des parois : immuebles 37 et 39 rue des Orteaux et 13 passage Fréquel 75020 Paris*. Rapport technique, Manexi Environnement Energie, 2014. (Cité en pages 53, 54, 55 et 130.)
- [Verbeeck & Hens 2005] G. Verbeeck et H. Hens. *Energy savings in retrofitted dwellings : economically viable ?* Energy and buildings, vol. 37, no. 7, pages 747–754, 2005. (Cité en page 15.)
- [Vorger 2015] E. Vorger. *Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment*. Dissertation, Institut des sciences et technologies PariTech, Avril 2015. (Cité en pages 13, 25, 75 et 95.)
- [Vrána 2007] T. Vrána. *Impact of moisture on long term performance of insulating products based on stone wool*. 2007. (Cité en pages xi, 134 et 136.)
- [Wang *et al.* 2015] X. Wang, M. Lu, W. Mao, J. Ouyang, B. Zhou et Y. Yang. *Improving benefit-cost analysis to overcome financing difficulties in promoting energy-efficient renovation of existing residential buildings in China*. Applied Energy, vol. 141, pages 119–130, 2015. (Cité en page 12.)
- [Woods *et al.* 2013] J. Woods, J. Winkler et D. Christensen. *Evaluation of the effective moisture penetration depth model for estimating moisture buffering in buildings*. Rapport technique, National Renewable Energy Laboratory NREL, 2013. (Cité en page 20.)

- [Yan *et al.* 2015] D. Yan, W. O'Brien, T. Hong, X. Feng, H. B. Gunay, F. Tahmasebi et A. Mahdavi. *Occupant behavior modeling for building performance simulation : Current state and future challenges*. Energy and Buildings, vol. 107, pages 264–278, 2015. (Cité en page 13.)
- [Yilmaz 2007] Z. Yilmaz. *Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones : Comparison of thermal performance of buildings in temperate-humid and hot-dry climate*. Energy and Buildings, vol. 39, no. 3, pages 306–316, 2007. (Cité en page 14.)
- [Yin *et al.* 2011] H. Yin, P. Stack et K. Menzel. *Decision support for building renovation strategies*. In Computing in Civil Engineering (2011), pages 834–841. ASCE, 2011. (Cité en page 16.)
- [Yucel *et al.* 2003] K. Yucel, C. Basyigit et C. Ozel. *Thermal insulation properties of expanded polystyrene as construction and insulating materials*. In 15th Symposium in Thermophysical Properties, pages 54–66, 2003. (Cité en page 131.)

Étude multi-échelle des transferts de chaleur et de masse appliquée à un bâtiment parisien rénové, en condition météorologique normale et en période de vague de chaleur

Résumé :

À Paris environ 44% des bâtiments ont été construits avant 1914 avec des murs épais non isolés et des matériaux poreux, caractérisés par une forte inertie thermique et des propriétés hygroscopiques. Les propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés dans les constructions anciennes ont des effets qui : (i) confèrent (aux bâtiments) de bonnes qualités thermiques en période estivale et (ii) contribuent à réguler la température et l'humidité relative intérieure. En France les politiques d'économie d'énergie et la régulation thermique ont abouti à la mise en place de l'isolation thermique afin de réduire les consommations d'énergie pendant l'hiver. L'installation de l'isolation thermique dans la rénovation des bâtiments existants pose cependant des difficultés. Premièrement, lorsqu'elle est installée à l'intérieur, mis à part la possible dégradation des performances estivales, la zone de vie est réduite et des ponts thermiques peuvent être générés. Deuxièmement, la mise en place de l'isolation thermique par l'extérieur est, dans la plupart des cas, limitée ou interdite en raison de l'héritage patrimonial et architectural des façades dans une vieille ville comme Paris. D'autre part, il est prévu que des conditions extrêmes de chaleur deviennent plus fréquentes dans des scénarios du climat futur. Ainsi, les évolutions possibles du climat futur doivent être intégrés dans l'évaluation des stratégies de rénovation dans le bâtiment ancien. Ce travail de thèse porte sur l'évaluation du comportement hygrothermique des constructions anciennes (en pierre calcaire) rénovés à Paris, dans des conditions météorologiques actuelles et de vague de chaleur. À l'échelle des logements un modèle a été construit sur un outil de simulation thermique dynamique (EnergyPlus), calé et validé à travers des données enregistrées dans une campagne de mesure lancé en 2014 dans les logements étudiés. À l'échelle de la paroi un modèle macroscopique en 2D, sur COMSOL, est proposé afin d'étudier les transferts de chaleur et de masse dans un mur poreux constitué de plusieurs couches avec de l'isolation thermique par intérieur (ITI) et par l'extérieur (ITE).

Mots clés : Simulation, modélisation multi-échelle, bâtiment ancien, rénovation, vague de chaleur, transferts de chaleur et de masse

Multiscale study of heat and mass transfer applied to a renovated Parisian building in normal weather conditions and heat wave period

Abstract :

In Paris 44% of the dwellings were built before 1914 with uninsulated thick walls made of porous materials, characterized by high thermal inertia and hygroscopic properties. The hygrothermal properties of existing buildings materials have effects that : (i) give (to these buildings) good thermal qualities in summer and (ii) help to regulate indoor temperature and relative humidity. In France the energy saving policies and thermal regulation have resulted in the implementation of thermal regulation to reduce energy consumption during winter. Though the installation of thermal insulation in existing buildings poses a number of difficulties. Firstly, when put inside, besides the possible degradation of summer performances, the living area is reduced and thermal bridges could be generated. Secondly, because the patrimonial and architectural heritage of façades in an old city like Paris, the external thermal insulation is, in most cases, restricted or prohibited. Moreover, it is expected that extreme heat conditions become more frequent in future climate scenarios. Thus, the possible evolutions of future climate must be integrated into the evaluation of renovation strategies in old buildings. This thesis focuses on the assessment of the hygrothermal behavior of old renovated Parisian buildings (made of limestone), in current and heat wave weather. At the building scale (housing), a model was built in dynamic thermal simulation tool (EnergyPlus). The model was calibrated and validated through recorded data from a measurement campaign launched in 2014 on the studied housings. At the wall scale, a macroscopic model in 2D (build in COMSOL) is proposed to study the heat and mass transfer through a multilayered porous wall, renovated with internal thermal insulation (ITI) and external thermal insulation (ETI).

Keywords : Simulation, multiscale modeling, renovation, heat wave, heat and mass transfer, dynamic thermal simulation
